

ВЕСТНИК

ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

Выпуск 3 (25)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- С. Г. Чулкин, д.т.н., проф. (*главный редактор*) • В. И. Решняк, д.т.н., проф. (*зам. гл. редактора*)
- О. К. Безюков, д.т.н., проф. • В. В. Веселков, д.т.н., проф. • П. А. Гарибин, д.т.н., проф.
- Д. П. Голоскоков, д.т.н., проф. • Б. П. Ивченко, д.т.н., проф. • Ю. М. Искандеров, д.т.н., проф.
- О. Г. Каратаев, д.т.н., д.ю.н., проф. • А. В. Кириченко, д.т.н., проф. • М. А. Колосов, д.т.н., проф.
- Е. А. Королева, д.э.н., проф. • Е. А. Лаврентьева, д.э.н., проф. • А. Ю. Ластовцев, к.т.н., проф.
- С. Б. Лебедев, д.э.н., проф. • Г. В. Макаров, д.т.н., проф. • А. М. Никитин, д.т.н., проф.
- В. Е. Марлей, д.т.н., с.н.с. • А. П. Нырков, д.т.н., проф. • Т. А. Пантина, д.э.н., проф.
- П. М. Лысенков, д.т.н. • Л. И. Погодаев, д.т.н., проф. • Н. В. Растрьгин, к.т.н., доц.
- А. Е. Сазонов, д.т.н., проф. • А. А. Сикарев, д.т.н., проф. • И. П. Скобелева, д.э.н., проф.
- С. В. Смоленцев, д.т.н., проф. • А. Л. Степанов, д.т.н., проф. • Г. В. Ушакова, д.и.н., проф.
- В. И. Черненко, д.т.н., проф. • В. Б. Чистов, д.т.н., проф. • А. А. Ершов, д.т.н., доц.
- В. В. Романовский, д.т.н., проф. • А. П. Горобцов, к.т.н., доц. • Б. А. Смыслов, к.ю.н., проф.
- М. В. Сухотерин, д.т.н., проф. • А. Ю. Шаронов, к.г.н., доц.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- С. О. Барышников — ректор Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, д.т.н., проф. • Ю. Н. Горбачев — генеральный конструктор ОАО «Инженерный центр судостроения», д.т.н., проф. • С. Гуца — ректор Морской академии (г. Щецин, Польша), д.т.н., проф. • Г. В. Егоров — генеральный директор ЗАО «Морское инженерное бюро — СПб», д.т.н., проф. • Ф. В. Кармазинов — генеральный директор ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», д.т.н., проф. • И. И. Костылев — заведующий кафедрой ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, д.т.н., проф. • А. И. Пошивай — заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта • С. В. Орлов — директор Санкт-Петербургского монетного двора (филиал ФГУП «Гознак»), к.т.н. • Н. Г. Смирнов — вице-президент Ассоциации судоходных компаний, к.т.н. • Р. М. Юсупов — директор Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, д.т.н., проф., член-корреспондент РАН • Р. Качиньски — проректор по развитию и сотрудничеству Технического университета (г. Белосток, Польша), д.т.н., проф.

Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — Вып. 3. — 189 с.

ISSN 2309-5180

«Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации средства массовой информации от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по следующим основным направлениям: **судовождение и безопасность на водном транспорте; судовые энергетические установки, системы и устройства; судостроение и судоремонт; морские и внутренние водные пути, гидротехнические сооружения и порты; логистика и транспортные технологии; экономика, организация, управление, планирование и прогнозирование на водном транспорте; экология и охрана окружающей среды; информационные технологии; международное морское право; разработка морских и шельфовых месторождений нефти и газа.**

Статьи публикуются на русском и английском языках.

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте. По содержанию статьи должны соответствовать названию журнала, его целям и задачам.

Статьи рецензируются независимыми экспертами.

Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний; сообщения и статьи к юбилейным датам и знаменательным событиям университета и его ведущих ученых.

Вестник включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Вестнику присвоен международный стандартный номер сериального периодического издания ISSN 2309-5180.

С 2009 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

Индекс для подписки: 37276.



СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лукинский В. С., Степанов А. Л.</i> Международный симпозиум логистики и инновации	7
--	---

СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ 9

<i>Ксенофонов Ю. Г.</i> Методология проектирования антенны Френеля применительно к спутниковым мобильным телевизионным системам	9
<i>Маликова Т. Е.</i> Применение теории катастроф для классификации сценариев потери остойчивости судна при смещении груза	15
<i>Ильин А. А.</i> К расчету параметров спутниковых радиоперехватов для связи с нефтедобывающей платформой	19
<i>Каретников В. В., Яснов А. П., Волков Р. В.</i> К вопросу определения зоны действия системы мониторинга средств навигационного ограждения	24
<i>Сикарев А. А., Шахнов С. Ф.</i> К расчету напряженности поля в радиоканалах речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS средневолнового диапазона	27

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 32

<i>Покусаев М. Н., Овсянников М. К., Сибряев К. О., Хмельницкий К. Е.</i> Анализ характеристик крутильных колебаний в гребном вале судов класса «река–море»	32
<i>Боровикова И. А.</i> Оптимизация работы судовой энергетической установки	42
<i>Данцевич И. М., Каракаев А. Б., Луканин А. В.</i> Обеспечение контролепригодности электрических сетей, схем и электрооборудования судовых электроэнергетических систем на основе управляемых разрывов функциональных сигналов	45
<i>Приходько В. М., Приходько И. В.</i> Математическая модель при сушке судовых асинхронных двигателей по энергосберегающей технологии	54
<i>Жадобин Н. Е., Лебедев А. И., Данилов О. Г.</i> Нечеткие регуляторы в системах управления судовыми энергетическими установками	62
<i>Черный С. Г., Жиленков А. А.</i> Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем	68
<i>Галышев Ю. В., Шабанов А. Ю., Макарин А. В.</i> Оценка необходимой точности задания граничных условий теплового нагружения головки цилиндра двигателя внутреннего сгорания	75

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 81

<i>Сахаров В. В., Кузьмин А. А., Чертков А. А.</i> Алгоритм принятия оптимальных решений в судоремонте с применением матрицы Крылова	81
<i>Клочков Б. Ф.</i> Устойчивость движения неравножесткого ротора в упругих опорах	89

<i>Леонов В. Е., Рублев И. И.</i> Исследование коррозионной устойчивости металлических корпусов судов, обработанных эффективным наполнителем	99
<i>Вычужанин В. В., Бойко В. Д., Рудниченко Н. Д.</i> Метод оценки влияния состояния межагрегатных связей на структурную живучесть сложных технических систем	105
<i>Иванов В. Ю.</i> Актуальные вопросы методики расчета прочности проушин шарнирных узлов порталных кранов	113
<i>Ольховик Е. О., Резник Ю. А.</i> Разработка технологии лазерной сварки сильфонных сборок для судовой трубопроводной арматуры	119
<i>Чулкин С. Г., Петров В. М., Буцанец А. А.</i> Перспективные технологические методы повышения износостойкости поверхности деталей судовой запорной аппаратуры	122

МОРСКИЕ И ВНУТРЕННИЕ ВОДНЫЕ ПУТИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ПОРТЫ

127

<i>Колосов М. А., Ладенко С. Ю.</i> О необходимости подготовки Павловского шлюза к пропуску паводковых вод	127
<i>Бойков И. М.</i> Исследования волновых процессов в нижнем подходном канале судоходного шлюза и их влияние на условия стоянки судна, ожидающего шлюзования у причальной стенки	136
<i>Синельников В. С., Мартьянов И. Ю.</i> Влияние зазоров между вкладышами опорно-упорных подушек на распределение контактных усилий и на напряженно-деформированное состояние двустворчатых шлюзовых ворот	146

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ, ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

154

<i>Корюкин Н. С.</i> Конкурентные преимущества как цель и результат использования инновационного потенциала портовых терминалов	154
<i>Иванова С. Е., Митрофанова Н. В.</i> Методические основы формирования платы в контейнерном судоходстве	159
<i>Басов Е. А.</i> Оптимизация высоты складирования контейнеров	166

РАЗРАБОТКА МОРСКИХ И ШЕЛЬФОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

171

<i>Фирсов Ю. Г.</i> Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки	171
<i>Лебедев Г. В., Румянцев Г. Е.</i> Перспективы развития арктической морской транспортной системы	179

CONTENST

NAVIGATION AND SAFETY ON WATER TRANSPORT	9
<i>Ksenofontov Y. G.</i> The Frenel antenna design methodology applicable for satellite mobile television systems	9
<i>Malikova T. E.</i> Applying catastrophe theory for classification of scenarios of ship stability loss due to cargo shifting	15
<i>Iljin A. A.</i> Parameters calculations of satellite radio links for communications with the oil-extracting platform	19
<i>Karetnikov V. V., Yasnov A. P., Volkov R. V.</i> On the question of the definition of range monitoring system aids to navigation	24
<i>Sikarev A. A., Shakhnov S. F.</i> To calculation of the field strength in the radiochannels of the local river differential subsystem GLONASS/GPS of medium wave range	27
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND EQUIPMENT	32
<i>Pokysaev M. N., Ovsyannikov M. K., Sibryaev K. O., Khmel'nitsky K. E.</i> Analysis of torsional vibrations characteristics in the propeller shaft of "river-sea" class ships	32
<i>Borovikova I. A.</i> Optimization of ship power plants work	42
<i>Dancevich I. M., Karakayev A. B., Lukanin A. V.</i> Controllability ensuring of electrical grids, schemes and equipment of ship electrical power systems on basis of under-control breakings of functional signals	45
<i>Prikhod'ko V. M., Prikhod'ko I. V.</i> Mathematical model of ship induction motors drying by energy saving technology	54
<i>Zhadobin N. E., Lebedev A. I., Danilov O. G.</i> Fuzzy control of dynamic systems	62
<i>Cherny S. G., Zhilenkov A. A.</i> Intellectual decision support at the optimum system for ships electrical power systems	68
<i>Galyshev Y. V., Shabanov A. Y., Makarin A. V.</i> Assessment of necessary accuracy of the boundary conditions task of cylinder head thermal loading of the internal combustion engine	75
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	81
<i>Saharov V. V., Kuzmin A. A., Chertkov A. A.</i> Adopting optimal decisions with application Krylov matrix algorithm in ship-repair companies	81
<i>Klochkov B. F.</i> Stability of various stiffness rotor motion in elastic supports	89
<i>Leonov V. E., Rubljev I. I.</i> Study corrosion resistance of metallic hulls of ships treated by effective fillers	99
<i>Vichujanin V. V., Boyko V. D., Rudnichenko N. D.</i> Method of estimating the impact on the state of inter-aggregate bonds on structural robustness of complex engineering systems	105
<i>Ivanov V. Y.</i> Topical questions of methodology for calculation of eyes strength of hinge units for gantry cranes	113
<i>Olkhovik E. O., Reznik J. A.</i> Development of laser welding technology of bellows assemblies for ship pipeline valves	119
<i>Chulkin S. G., Petrov V. M., Butsanets A. A.</i> Promising technologocal methods to increase wear resistance of surfaces of ship locking devices parts	122

MARINE AND INLAND WATERWAYS, PORTS AND WATERWORKS	127
<i>Kolosov M. A., Ladenko S. Y.</i> On the preparation of the Pavlovsk gateway for passage of high waters	127
<i>Boykov I. M.</i> A study of wave processes in the bottom approach channel of a navigable lock and their influence on conditions of moorage of the vessel expecting sluicing at a mooring wall	136
<i>Sinelnikov V. S., Martianov I. U.</i> Influence of gaps in abutment inserts on contact forces distribution and stress-strain state of doublewing lock gate	146
ECONOMICS, ORGANIZATION, MANAGEMENT, LANNING AND FORECASTING IN WATER TRANSPORT	154
<i>Koryukin N. S.</i> Competitive advantage as the goal and the result of using innovative potential of port terminals	154
<i>Ivanova S. E., Mitrofanova N. V.</i> Methodical bases of making of price on marine container transport	159
<i>Basov E. A.</i> Container yard stacking height optimization	166
DEVELOPMENT OF MARINE AND OFFSHORE OIL AND GAS	171
<i>Firsov Y. G.</i> The main requirements for the bathymetric (topographic) surveying quality control	171
<i>Lebedev G. V., Rumyantsev G. E.</i> The prospects of arctic marine transportation system's development	179

В. С. Лукинский,
А. Л. Степанов

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ЛОГИСТИКИ И ИННОВАЦИИ

Апрельское научное явление сформировалось в «апрельские чтения» как Международный симпозиум логистики и инноваций, в составе которого проводились следующие научно-практические конференции:

— 10–11 апреля — *Логистика и системный анализ в организации перевозок. ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова — фак-т МТМ (организаторы: И. А. Русинов, А. В. Кириченко);*

— 15 апреля — *Международная молодежная конференция. Системный анализ и логистика. РАН. Дом ученых (организаторы: И. Б. Арефьев, В. В. Сахаров);*

— 16 апреля — *II Международная научно-практическая конференция. «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении». Горный университет;*

— 24–25 апреля — *XIII Международная научно-практическая конференция. ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова.*

Надо отметить, что многие из названных конференций имеют давние традиции (см. порядковые номера) и особенно приятно, что это ценится новыми поколениями выпускников, большой процент которых является продолжателями транспортного дела. Студенческие научные общества и научное общество курсантов — форма созидания и воспитания молодых ученых, а на уровне профессорско-преподавательского состава практика показала результативность творческих встреч и взаимообогащение для формирования инновационных образовательных программ и воспитания «привлекательных лекторов».

Дом ученых Академии наук более 15 лет предоставляет профессору Игорю Борисовичу Орефьеву Дубовый зал во дворце на Неве для межвузовских международных конференций. Студенты и курсанты нашего вуза — постоянные участники этих встреч. Конференция факультета МТМ (уже вторая) ориентирована как на молодежь, так и на старшее поколение производственников и преподавателей, что способствует реальной передаче производственного опыта и постановке научных исследований. Надеемся, что работа организаторов, декана И. А. Русинова и зав. кафедрой А. В. Кириченко позволит стать этой конференции регулярной и продолжит традиции прошлых десятилетий.

Горный университет по инициативе кафедры организации перевозок провел II Международную научно-практическую конференцию «Инновационные системы планирования и управление на транспорте и машиностроении». Логистическая эффективность (транспортные расходы в цене продукции) формируется не только конструктивными решениями, но и режимом эксплуатации и использованием в цепях поставок на стыке производства и эксплуатации, и поэтому наш опыт совместного решения проблем во времена «химизации всей страны» показал эффективность межотраслевого взаимодействия (производители продукции и транспортники), а он крайне необходим для решения насущных проблем.

XIII Международная научно-практическая конференция «Логистика: современные тенденции развития» имеет значительный опыт систематизации и генерации идей логистики и подготовки новых поколений логистов. За прошедшие годы многие начинающие ученые стали кандидатами и докторами наук и пополнили ряды ППС. Регулярные «встречи логистов», опытных и начинающих, из ВШЭ, ГУУ, МАДИ, МИИТа, ГУПС, ГМА + СПГУВКа (ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) и вузов многих регионов РФ позволили внедрить в практику транспортной работы новейшие методы управления цепями поставок, создать транспортные терминалы, усовершен-

ствовать работу портов, управление мультимодальными перевозками, а также способствовали развитию контейнеризации и созданию условий для подъема экономики.

Традиции этой конференции были заложены в конце 1990-х гг. после серий зарубежных стажировок для ППС, организованных Министерством транспорта РФ. Необходимо было адаптировать образование и транспортную работу в евро-азиатском направлении применительно к новым экономическим условиям. Встречные усилия министерств транспорта в Голландии и Германии образовали фундамент логистических конференций, которые получили опору в российском инженерно-экономическом образовании. Необходимо отметить эффективную работу организационного комитета на базе кафедр транспортной логистики (зав. кафедрой Е. А. Королева, Е. С. Панова) и логистики и организации перевозок (профессора В. С. Лукинский, Н. Г. Плетнева) с координацией от ректората ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова (профессор А. Л. Степанов), за которыми стоит опыт создания логистических школ в ИНЖЕКОНе, СПГУВКе и ГМА имени адмирала С. О. Макарова.

Популярность логистики как нового инновационного направления и научно-практической деятельности привлекла на конференцию коллег из многих российских и зарубежных вузов.

На конференции работали две секции: научно-практическая и образовательная. Особый интерес вызвала информация выпускников МТМ 1980–1990-х гг., ставших за это время генеральными директорами и предоставивших это образование своим детям на родном факультете. Было четко определено, какие дисциплины «срабатывают» на постигаемых ступенях роста и какие временные коррективы необходимы в образовательной программе «Логистика».

В организации конференции активное участие приняла кафедра транспортной логистики, созданная в 2003 г. на базе факультета экономики и финансов Университета водных коммуникаций (ныне — ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) на основе преобразования кафедры коммерческой эксплуатации, основным направлением деятельности которой стало формирование школы логистики в области организации и управления смешанными (мультимодальными) перевозками с использованием водного транспорта. При этом существенное внимание стало уделяться снижению транспортной составляющей в цене продукции за счет глубокой технической проработки организационно-технологических аспектов взаимодействия субъектов транспортного рынка в цепях поставок, моделям и методам оптимального использования технических средств транспорта. Это нашло отражение в докладах, представленных выпускниками и ППС кафедры, например Е. А. Королевой, И. О. Шиховой «Оценка возможностей переключения грузопотоков со смежных видов транспорта на внутренний водный», О. А. Деняком, М. А. Терентьевой «Постановка и решение задачи позиционирования контейнерного депо морского оператора контейнерных перевозок».

В заключение необходимо подчеркнуть для ППС — ваше участие в конференциях позволяет сформировать вам востребованное содержание дисциплин, а также собственный и вузовский рейтинг и ориентировать студентов и курсантов на актуальность логистической профессии.

СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 621.396.67

Ю. Г. Ксенофонов,
ст. преподаватель кафедры радиосвязи на морском флоте,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНТЕННЫ ФРЕНЕЛЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СПУТНИКОВЫМ МОБИЛЬНЫМ ТЕЛЕВИЗИОННЫМ СИСТЕМАМ

THE FRENEL ANTENNA DESIGN METHODOLOGY APPLICABLE FOR SATELLITE MOBILE TELEVISION SYSTEMS

Рассмотрены вопросы применения антенны Френеля в мобильных системах спутникового телевизионного вещания, представлена методология ее расчета и получены электрические и геометрические параметры данной антенны для K_u -диапазона.

The questions of use of the antenna of Frenel in mobile satellite television broadcasting systems are considered, the methodology of its calculation is presented and electric and geometrical parameters of this antenna for K_u -band are received.

Ключевые слова: однополупериодная зона, фазокорректирующая зона, патч, интерференция, зональная пластина, диаграмма направленности, коэффициент усиления, уровень боковых лепестков.

Key words: one-half-period zone, faze correcting zone, patch, interference, zone plate, directional pattern, gain, level of lateral petals.

В

НАСТОЯЩЕЕ время бурно развивается рынок мобильных систем спутниковой связи. Они главным образом предназначены для приема сигналов космического телевидения.

Для обеспечения телевизионного приема на подвижных объектах (речных и морских судах любого водоизмещения и назначения) применяются установки специальных спутниковых мобильных телевизионных систем, предназначенных для приема спутникового телевидения и индивидуального или коллективного просмотра телепрограмм. С этой целью используются новейшие разработки спутниковых телевизионных антенн, обеспечивающих точный и бесперебойный прием сигнала независимо от положения и состояния приемной антенны на месте и в движении с любой скоростью. Массогабаритные параметры антенн позволяют размещать и устанавливать их на любых подвижных объектах, в том числе на морских и речных судах и яхтах. Данные антенны обеспечивают телевизионный прием на всех акваториях территории России. В состав судовой телевизионной системы входят: антенный блок, блок управления, соединительный кабель и приемный ресивер. Качество телевизионного приема обеспечивается цифровыми технологиями телевизионных систем и является предельно высоким для существующих стандартов вещательного телевидения. Система также может быть использована для асимметричного высокоскоростного доступа в глобальную сеть Интернет.

Наиболее важным элементом судовой телевизионной системы является антенна. Это достаточно сложное и дорогостоящее устройство, от параметров которого зависит качество принимаемого телевизионного сигнала. В связи с этим вопросам разработки антенн и поиску оптимальных технологических решений при их производстве уделяется особое внимание.

В данной статье рассматривается антенна Френеля как разновидность антенн с плоским отражателем, характеристики которых сопоставимы с характеристиками параболических антенн, что позволяет использовать их при приеме сигналов с мощных вещательных ИСЗ.

Физико-механические свойства приемных антенн позволяют использовать их круглосуточно на открытом воздухе в любых погодных условиях и воздействиях окружающей среды с условиями практически всех климатических зон России.

Принцип работы антенны Френеля отражен на рис. 1. Плоская волна распространяется в свободном пространстве. Принцип Гюйгенса постулирует, что электромагнитное поле в точке F

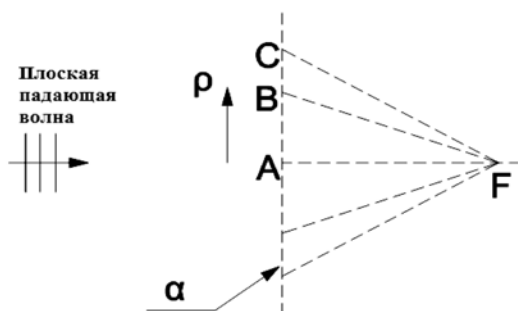


Рис. 1. Иллюстрация концепции зон Френеля

может быть описано как суперпозиция бесконечного числа точечных излучателей сферических волн на плоскости α . Например, в точке F есть вклад от источника в точке A . Для любой другой точки на плоскости расстояние до F будет больше, чем расстояние AF , что означает, что фаза от вкладов этих точек различна. Фаза вклада от точки B , например, сдвинута на некоторую величину от вклада от точки A . Расстояние между A и B может быть выбрано таким образом, что при данной частоте фазы вкладов от двух точек будут раз-

ниться на π радиан. Тогда вклады в поле в точке F от A и B будут находиться в противофазе и интерферировать с ослаблением. Подобным образом, точка C может быть выбрана так, что вклады от A и C будут в фазе (то есть различны на 2π радиан) и будут складываться. Эта особенность повторяется, то есть на плоскости α , далее от точки A , есть точки, вклады которых сдвинуты кратно 2π радиан. Каждая из этих точек отмечает двухполупериодную зону Френеля. Это означает, что на рис. 1 каждая точка между A и C находится в одной и той же двухполупериодной зоне. Разумеется, геометрическое место точек, которые отмечают границы каждой двухполупериодной зоны, есть окружность на плоскости α .

Каждая точка на плоскости α имеет соответствующую точку в пределах той же самой двухполупериодной зоны, вклад которой точно противоположен по фазе. Также каждая точка между A и B имеет соответствующую противоположную по фазе точку между B и C . Жак-Луи Соре указывал, что если противоположные по фазе вклады могут быть удалены, то оставшиеся вклады будут в точке F складываться с взаимным усилением. Делая перемежающиеся участки каждой зоны на плоскости прозрачными и непрозрачными для электромагнитного излучения, зонная пластина может быть построена так, что будет иметь фокусирующие свойства линзы [1, р. 11–25]. Поэтому есть две однополупериодные зоны на каждой двухполупериодной зоне.



Рис. 2. Геометрия зональной пластины Соре

Простейший тип зонной пластины (зонная пластина Соре) сделан из колец проводника (perfect electrical conductors — PEC), которые блокируют каждую вторую однополупериодную зону, как и предложил Соре. Эта зонная пластина представлена на рис. 2. Из него видно, что часть падающего поля будет отражаться непрозрачными (PEC) однополупериодными зонами, тогда как остальное будет проходить сквозь прозрачные зоны.

Однополупериодные зоны конструируются так, что только та часть поля, которая будет с усилением интерферировать на расстоянии F перед зонной пластиной, будет отражаться непрозрачными частями зонной пластины. Подобная интерференция с усилением также будет иметь место для проходящего поля на расстоянии F за зонной пластиной. Поэтому у этой конструкции имеются две точки фокуса, и она может быть использована или как отражающая зонная пластина, если потребление с той же стороны от зонной пластины, что и падающая волна, или как проходная зонная пластина, если потребление организовано на противоположной стороне зонной пластины.

Для обеспечения усиливающей интерференции радиусы зон вычисляются исходя из требования, чтобы расстояние от точки фокуса до границы зоны было на половину длины волны больше, чем расстояние от точки фокуса до границы предыдущей зоны.

На рис. 2 ρ_1 и ρ_2 выбраны так, чтобы $r_2 = r_1 + \lambda/2$.

Применение этих требований к каждой последовательной зоне ведет к хорошо известной расчетной формуле для зонных пластин Соре, внешний радиус n -й однополупериодной зоны вычисляется по формуле

$$\rho_n = \sqrt{\left(\frac{n\lambda}{2}\right)^2 + n\lambda F}, \quad (1)$$

где n — номер однополупериодной зоны; λ — требуемая длина волны в свободном пространстве, м; F — расстояние до точки фокуса, м.

В общее количество однополупериодных зон N_{soret} включены как прозрачные, так и непрозрачные зоны.

При вычислении радиусов, которые ограничивают каждую однополупериодную зону, никогда не устанавливается, четная или нечетная зона должна быть сделана непрозрачной. Основанные на зонном принципе Френеля, эти дополняющие друг друга конфигурации работают одинаково хорошо. Выбор, какие зоны должны быть сделаны непрозрачными, зависит главным образом от назначения зонной пластины. Обычно четные зоны непрозрачны у проходных зонных пластин. В этом случае общее количество однополупериодных зон N_{soret} четное. Нечетные зоны непрозрачны для отражательных зонных пластин, как на рис. 2, и N_{soret} нечетно.

Методика расчета плоского печатного отражателя Френеля представлена на рис. 3.

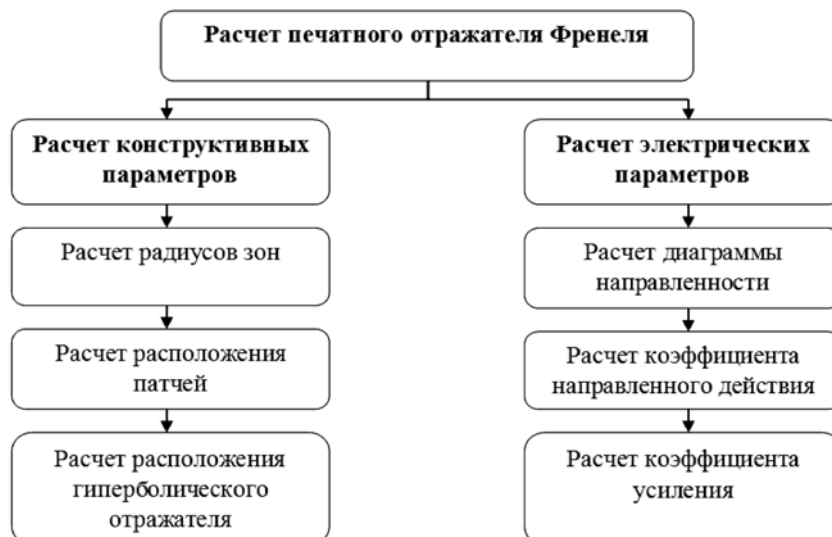


Рис. 3. Блок-схема этапов расчета плоского печатного отражателя Френеля

Внешний радиус зон Френеля r_n определен по формуле [2, р. 324]:

$$r_n = \sqrt{2nf \frac{\lambda}{P} + \left(n \frac{\lambda}{P}\right)^2}, \quad (2)$$

где r_n — внешний радиус фазокорректирующей зоны, то есть подзоны полноволновой (двухполупериодной) зоны Френеля, мм;

n — номер зоны, центральная зона имеет номер 1;

f — фокусное расстояние, мм;

λ — длина волны в мм, вычисляется по формуле $\lambda = \frac{299792458}{\nu \cdot 1000000}$ при частоте ν в ГГц;

P — число фазокорректирующих подзон в полноволновой зоне Френеля.

Результаты расчета и расположения патчей представлены на рис. 4.

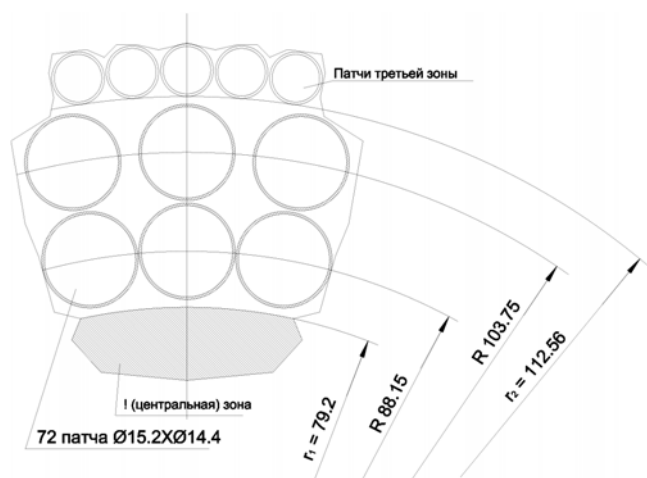


Рис. 4. Первая (полностью металлизированная) и вторая зоны с примыкающим участком

В работе [5, р. 350–355] исследована фазосдвигающая способность бесконечных плоских решеток при отражении плоской перпендикулярной волны, образованных прямоугольной расстановкой проводящих плоских колец на диэлектрической подложке. Показано, что расстояние между кольцами влияет на сдвиг фазы много меньше, чем средний диаметр колец. То есть можно обеспечить нужный сдвиг фаз по зонам Френеля круговой расстановкой подходящих по среднему диаметру колец. Кроме того, чем меньше размеры кольца, тем больше фазовый сдвиг, что связано с преобладанием емкостных свойств с уменьшением размера.

Принимая, что первая четвертьволновая подзона ($P = 1$) дает эффективный

фазовый сдвиг фазы в фокусе антенны $17,3^\circ$, остальные зоны ($P = 2, 3, 4$) должны обеспечивать соответственно $107,3, 197,3$ и $287,3^\circ$.

Расчет диаграммы направленности (ДН) произведен в программе MATLAB. Полученный по результатам расчета график приведен на рис. 5.

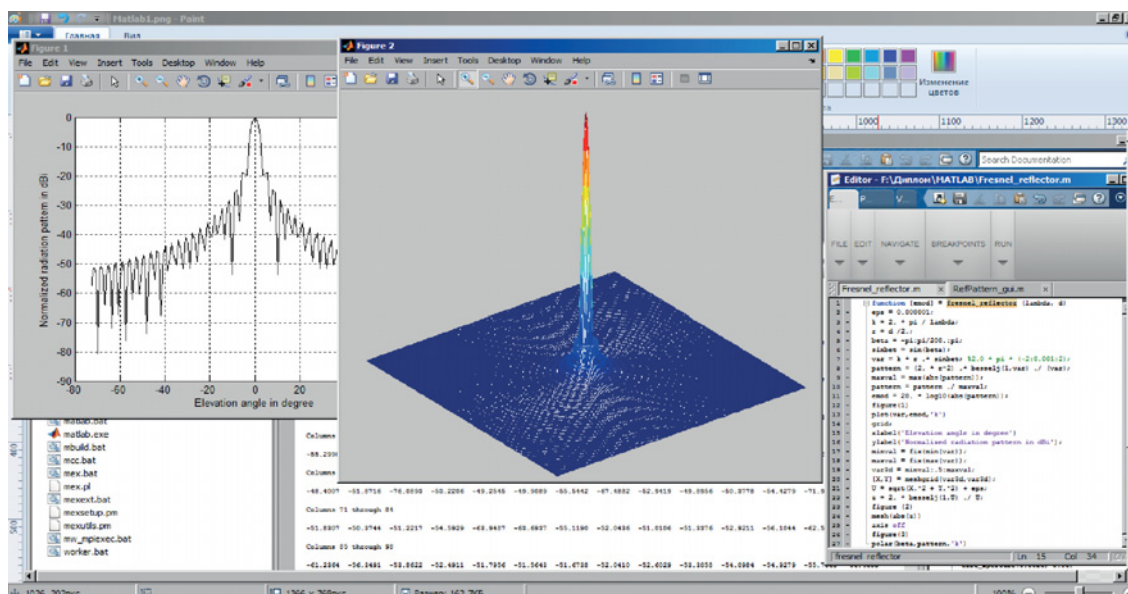


Рис. 5. ДН, рассчитанная в программе MATLAB

На рис. 6 приведена форма диаграммы направленности и значение максимального коэффициента усиления, коэффициент усиления антенны дан в декартовых координатах в логарифмическом масштабе.

Согласно полученному графику (рис. 6):

— $2\theta_{0,5}^E = 5,1$ — ширина ДН по мощности на уровне 0,5 в плоскости E ;

— $2\theta_{0,5}^H = 5,1$ — ширина ДН по мощности на уровне 0,5 в плоскости H (уровню 0,5 по мощности соответствует уровень 0,707 по напряженности поля или уровень -3 дБ в логарифмическом масштабе);

— УБЛ = -23 дБи — относительный уровень боковых лепестков.

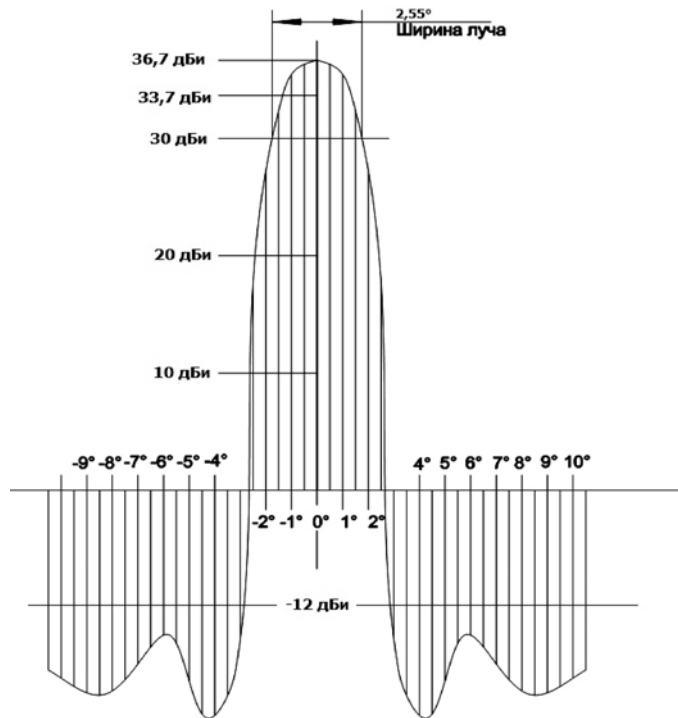


Рис. 6. ДН печатной зональной антенны Френеля

Расчетное значение КНД:

$$D_0 = 36,45 \text{ дБи.}$$

При расчете апертурным методом, при коэффициенте использования апертуры $e_a = 43 \%$ [5], расчетный коэффициент усиления (КУ) определяется по формуле

$$G = 10 \log \left(4\pi \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot \frac{e_a}{\lambda^2} \right), \quad (3)$$

где $G = 36,1$ дБи; $D = 600$ мм — расчетный диаметр антенны; $e_a = 43 \%$ — коэффициент использования апертуры; $\lambda = 26,23$ мм — длина волны.

Расчетная относительная полоса пропускания на уровне 3 дБ по мощности определяется по формуле [2]:

$$S_0 = \left(\frac{1}{N} \right) = 16 \%, \quad (4)$$

где $N = 6$ — число полуволновых зон.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента усиления от частоты, откуда видно, что антенна имеет полосу пропускания не менее 10 % на уровне 3 дБ.

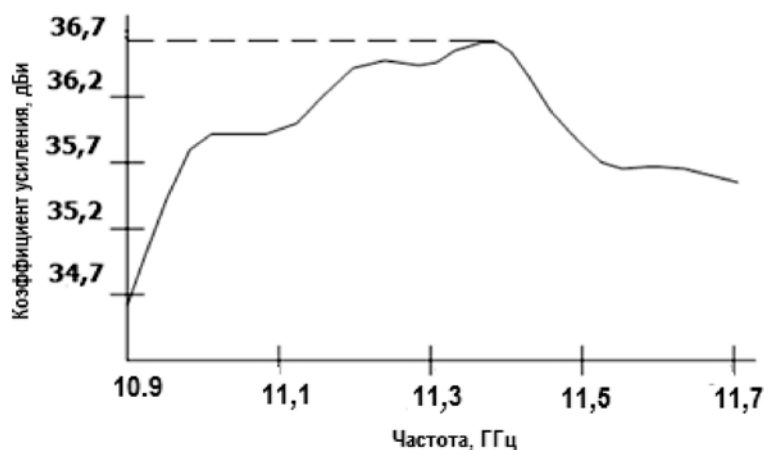


Рис. 7. График зависимости КУ от частоты

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величина	Ширина ДН, град	Уровень боковых лепестков, дБи	D_0 , дБи	G, дБи
Полученное значение	2,55	-23	36,45	36,1

Из нее следует, что предложенная антенна имеет электрические характеристики, которые соизмеримы с аналогичными характеристиками зеркальных антенн и соответствуют требованиям, предъявляемым к спутниковым телевизионным системам.

Список литературы

1. *Soret J.-L.* Studies on the density of the Fresnel zone / J.-L. Soret // Ann. Phy. Chem. — 1875. — Vol. 156. — P. 99–113. Reprinted in Selected Papers on Zone Plates. J. Ojeda-Castaneda and C. Gomez-Reino / eds. Bellingham — WA : SPIE, 1996.
2. *Hristov H. D.* Fresnel Zones in wireless links, zone plate lenses and antennas. — L.: Artech House Boston, 2000.
3. *Guo Y. J.* High-Efficiency Zone Plate Reflector Incorporating Printed Resonators / Y. J. Guo, S. K. Barton // On Antennas and Propagat. (ICAP'93): Prop. Int. Conf. — Edinburgh, UK, 1993. — P. 620–622.
4. *Pozar D. M.* Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarray / D. M. Pozar, S. D. Targonski, H. D. Syrigos // IEEE Trans. Antennas and Propagat. — 1997. — Vol. 45, № 2. — P. 287–296.
5. *Guo Y. J.* Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings / Y. J. Guo, S. K. Barton // IEEE Trans. Antennas and Propagat. 1995. — Vol. 43, № 4.

УДК 51-7:629.5.015.12

Т. Е. Маликова,
канд. техн. наук, доцент,
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СЦЕНАРИЕВ ПОТЕРИ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА ПРИ СМЕЩЕНИИ ГРУЗА

APPLYING OF CATASTROPHE THEORY FOR CLASSIFICATION OF SCENARIOS OF SHIP STABILITY LOSS DUE TO CARGO SHIFTING

Рассматривается возможность адаптации моделей теории катастроф для исследования остойчивости судов при смещении груза. В частности, анализируется применение математической модели катастрофы сборки для описания развития опасных ситуаций, связанных со смещением груза.

A possibility of accommodating of catastrophe theory models for studying ship stability when her cargo shifts is considered. In particular, application of mathematical cusp catastrophe model for describing evolution of dangerous situations pertaining to cargo shifting is analyzed.

Ключевые слова: эксплуатационная безопасность, смещающиеся грузы, опасные ситуации, теория катастроф, катастрофа сборки.

Key words: safety in operation, shifting cargoes, dangerous situations, catastrophe theory, cusp catastrophe.

И Обеспечение эксплуатационной безопасности судов, перевозящих смещающиеся грузы, является важной задачей мореплавания. Несмотря на внедрение современных средств и способов крепления грузов на морских судах, количество аварий со смещением груза не уменьшается, что требует поиска и исследования новых подходов к их предотвращению, одним из которых, несомненно, является эффективный анализ потенциально опасных ситуаций, связанных с потерей остойчивости судна при смещении груза, которые являются предшественниками аварий.

Для обеспечения безопасности судов, перевозящих смещающиеся грузы, необходимо знать и уметь анализировать не только причины возникновения самих аварий, но и сценарии развития потенциально опасных ситуаций и причины их возникновения.

Для классификации опасных ситуаций и их моделирования можно использовать метод, основанный на прикладной теории катастроф [5], который позволяет изобразить графически множество опасных ситуаций и сценариев их возникновения.

В статье исследуется катастрофа сборки как модель, описывающая состояние системы «судно–груз» (СГ-система). Следует отметить, что выбранный метод может быть использован в случае, если отклонение от правила, определяющего безопасное поведение системы, можно измерить [3, с. 399–403]. Под катастрофой здесь в соответствии с теорией понимается внезапное изменение состояния системы при малом изменении ее управляющих параметров [1; 5]. Такое изменение состояния системы возможно лишь тогда, когда она находится в точке неустойчивого равновесия. Состояние устойчивого и неустойчивого равновесия СГ-системы можно описать с помощью потенциальной функции.

Введем в качестве характеристики СГ-системы наклонения судна, возникающие из-за смещения груза. При этом вследствие действия кренящего момента судно будет уходить из положения равновесия, и для приведения его в исходное состояние необходимо создать восстанавливающий момент, образующийся силой плавучести (поддержания) и силой тяжести (веса).

Для нахождения зависимостей скоростей изменения крена судна и восстанавливающего момента (динамических переменных) от самих этих величин рассмотрим расчетную схему (рис. 1). Если задать наклонения θ_i судна как переменную относительно предполагаемой постоянной ве-

личины θ_m , а состояние остойчивости положением его метacentра — величиной Z_M относительно центра тяжести Z_G , то получим две аналитические зависимости безразмерных параметров:

— $\eta = (\theta_i - \theta_m) / \theta_m$ — наклонение судна относительно максимального угла диаграммы статической остойчивости;

— $\lambda = (Y_c - Y_G) / Y_G$ — взаимное положение сил веса и сил поддержания при наклонениях судна.

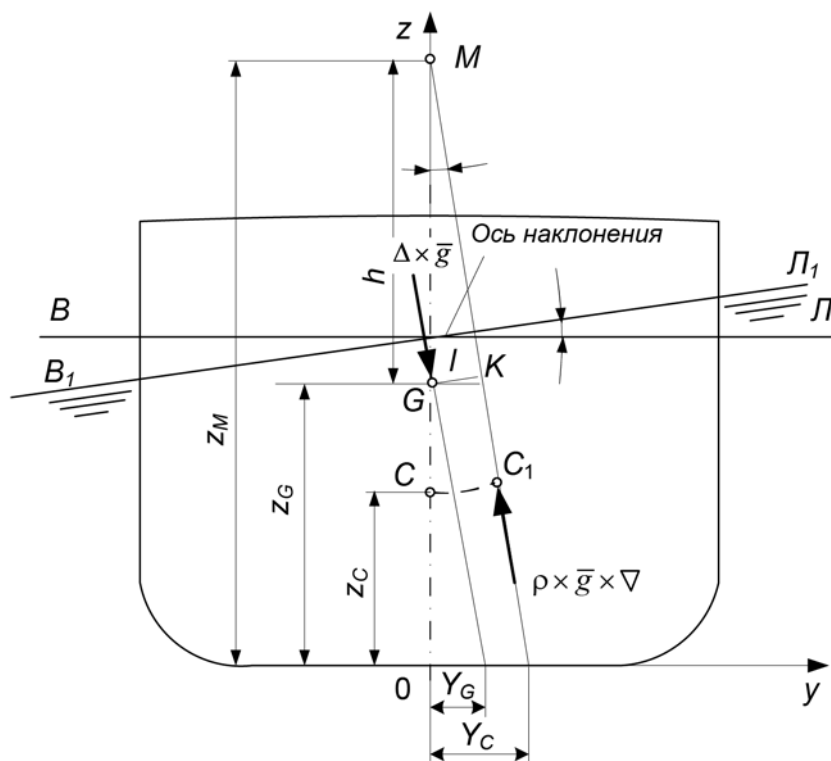


Рис. 1. Расчетная схема

Известно, что в общем случае для удержания судна от опрокидывания необходимо управлять взаимным положением сил веса и сил поддержания при наклонениях судна. Следует отметить, что в соответствии с принципом минимума потенциальной энергии СГ-система всегда будет стремиться к состоянию устойчивого равновесия, которое обуславливает возникновение опасной эксплуатационной ситуации, когда система достигает наибольшего кренящего момента, который судно может выдерживать, не опрокидываясь.

Такая система может быть представлена с помощью катастрофы сборки, потенциальная функция которой определяется следующим каноническим выражением [4]:

$$V_{\lambda\eta} = x^4/4 + \lambda x^2/2 + \eta x. \quad (1)$$

Для заданной пары (λ, η) критические точки функции (1) определяются из условия

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{4} x^4 + \frac{1}{2} \lambda x^2 + \eta x \right) = x^3 + \lambda x + \eta = 0. \quad (2)$$

Природа корней уравнения (2) зависит от значений η и λ , а именно от дискриминанта рассматриваемого кубического уравнения:

$$D = 4 \lambda^3 + 27 \eta^2. \quad (3)$$

Известно, что если $D > 0$, имеются один вещественный и пара взаимно сопряженных комплексных корней. Если $D < 0$, имеются три различных вещественных корня. Если $D = 0$, то име-

ются три вещественных корня, но некоторые из них совпадают между собой: при $\eta \neq 0$ или $\lambda \neq 0$ совпадают два корня, а при $\eta = \lambda = 0$ совпадают все три корня. Геометрически это означает, что природа корней, а значит, и равновесие системы зависят от положения судна на плоскости (η, λ) по отношению к бифуркационной кривой, определенной в координатах η, λ уравнением

$$4\lambda^3 + 27\eta^2 = 0. \quad (4)$$

Довольно сложное поведение потенциальной функции можно геометрически представить в виде многообразия катастрофы сборки M (рис. 2) или поверхности равновесия в пространстве $x\lambda\eta$. Это множество точек (x, λ, η) , удовлетворяющих уравнению (2). Оно имеет вид поверхности со сборкой в точке P .

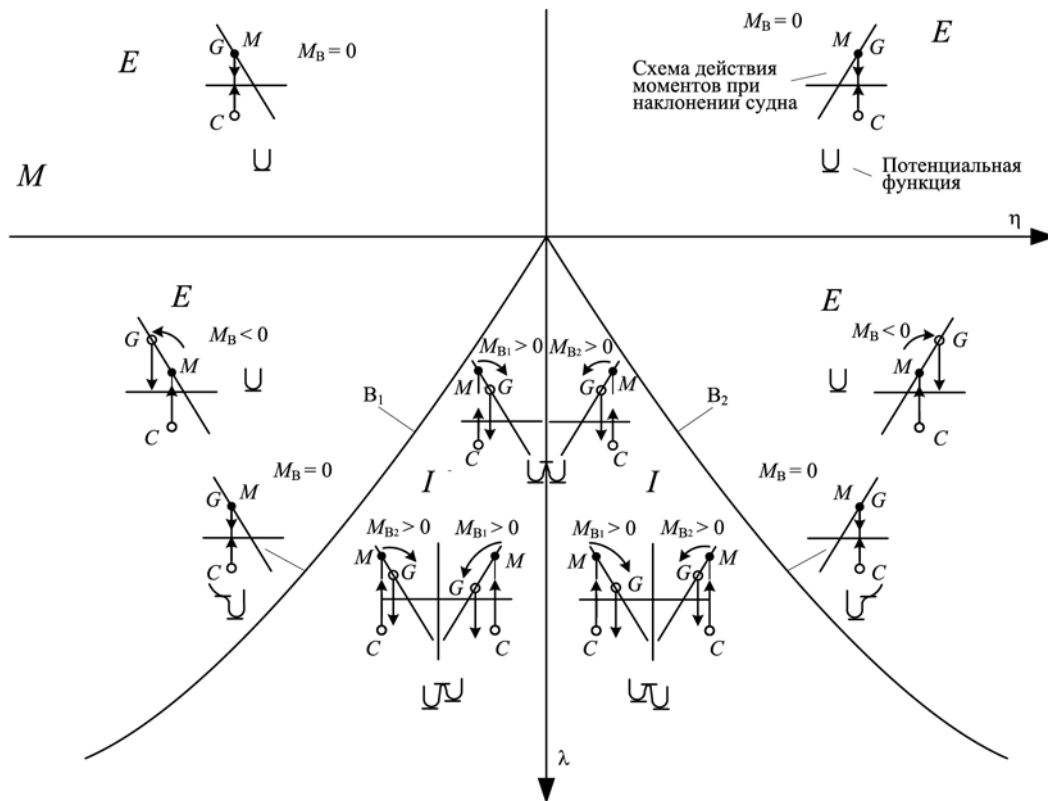


Рис. 2. Модель поведения судна в СГ-системе

Геометрическое описание положения равновесия СГ-системы. Для данной пары значений параметров (λ, η) все положения равновесия определяются значениями корней уравнения (2).

Разделим плоскость M (рис. 2) на пять подмножеств: область E — от слова “external” — «вне кривой»; область I — от слова “internal” — «внутри» кривой; две ветви B_1 и B_2 кривой от слова “bifurcation” (бифуркация) и начало координат — точка P . Если состояние системы описывается точкой $(\lambda, \eta) \in E$, то она находится в устойчивом состоянии. Если $(\lambda, \eta) \in I$, то между двумя устойчивыми состояниями есть неустойчивое состояние. Если $(\lambda, \eta) \in B_1$ или $(\lambda, \eta) \in B_2$, то система находится в устойчивом и неустойчивом состоянии, и если $(\lambda, \eta) \in P$, то состояние системы устойчиво.

Выполненный анализ и геометрическое описание положений равновесия СГ-системы позволяют построить модель поведения судна в СГ-системе, рассмотрев положения равновесия с изменением (λ, η) .

Математическая модель-интерпретация. Пусть СГ-система описывается множеством параметров (x, λ, η) и наклонение судна (рис. 1) интерпретируется как изменение параметров этой системы на некоторой траектории, расположенной на поверхности равновесия M (рис. 2) или на ее проекции в пространстве управления C .

Рассмотрим рис. 2, на котором изображены траектории движения судна в плоскости относительно оси наклона (схемы действия моментов при наклонении судна), а также потенциальные функции поведения СГ-системы.

Положение точки (λ, η) внутри бифуркационной кривой (область I) характеризует некоторый колебательный процесс удержания судна в остойчивом положении с помощью управления силой, обеспечивающей несмещаемость груза и компенсирующей воздействие внешнего возмущения. Причем если точка (λ, η) лежит на оси λ , то эти колебания симметричны относительно оси наклона (рис. 2) и положение судна можно считать безопасным при условии, что кренящий момент не достигает своего максимального значения. Приближение точек (λ, η) к бифуркационным кривым вызывает изменение характера колебаний — увеличивается угол наклона корпуса судна от оси наклона в одну сторону и соответственно уменьшается в другую. Появление асимметрии в траектории движения корпуса судна относительно оси наклона является предвестником потенциально опасной ситуации, устойчивого крена судна на один из бортов.

При удалении от точки P внутри области I происходит увеличение амплитуды колебаний судна (например, из-за смещения груза или штормовых условий), что так же может быть причиной создания потенциально опасной ситуации.

Если положение судна характеризуется параметрами (λ, η) в области E , это означает, что судно непригодно для перевозки данного вида груза и ситуация может быть квалифицирована как устойчиво опасная.

Если точка (λ, η) совпадает с началом координат системы P (точка сборки), это состояние СГ-системы теоретически устойчиво, так как $\eta = \lambda = 0$.

Если точка (λ, η) лежит на бифуркационной кривой, то колебания системы таковы, что углы крена судна соответствуют воздействию на него наибольшего кренящего момента. При этом если появится избыток кренящего момента, который будет еще больше кренить судно, то точка (λ, η) перейдет в область неустойчивого состояния системы E и судно опрокинется. Этот предел асимметричности траектории движения судна относительно оси наклона характеризуется появлением неустойчивого состояния СГ-системы в виде точки перегиба потенциальной функции вместо ее максимума. Другими словами, переход от максимума потенциальной функции к точке перегиба характеризует снижение уровня технологической безопасности в связи с зарождением тенденции неуправляемого смещения груза, что может привести к выводу положения судна из зоны I в устойчиво опасную зону E (рис. 2).

Выполненный анализ на модели катастрофы сборки позволил изобразить графически все множество возможных аварийных ситуаций, связанных со смещением груза, и сценариев их возникновения и развития. Развитие ситуации может быть определено траекторией состояния системы на многообразии катастрофы сборки или на плоскости управляющих параметров [2, с. 217–218]. Появление асимметрии в траектории движения судна в пространстве управляющих параметров является сигналом к снижению уровня безопасности, то есть к переходу СГ-системы в опасное состояние.

Список литературы

1. Арнольд В. И. Теория катастроф: [Текст] / В. И. Арнольд. — 2-е изд., доп. — М.: Изд-во МГУ, 1983. — 80 с.
2. Москаленко М. А. Адаптация моделей теории катастроф для исследования остойчивости судов при смещении грузов: [Текст] / М. А. Москаленко, Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: пленар. докл. X юбил. Междунар. науч.-практ. конф. — Владивосток: ДВО ПАТ, 2013.

3. *Острейковский В. А.* Прогнозирование техногенного риска динамических систем методами катастроф: [Текст] / В. А. Острейковский, С. П. Саакян, Л. В. Силин // *Фундаментальные исследования*. — Пенза: Академия естествознания, 2012. — № 3. — Ч. 2.

4. *Poston T.* Catastrophe Theory and Its Applications / T. Poston, I. Stewart. // *Dover Books on Mathematics*. — N. Y.: Dover Publications, 2012. — 512 p.

5. *Thom R.* Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models / R. Thom. — 2nd ed. — Boston: Addison-Wesley, 1989.

УДК 621.396.946.2

А. А. Ильин,

зав. кафедрой радиосвязи на морском флоте,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛИНИЙ ДЛЯ СВЯЗИ С НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ

PARAMETERS CALCULATIONS OF SATELLITE RADIO LINKS FOR COMMUNICATIONS WITH THE OIL-EXTRACTING PLATFORM

В статье рассматривается обобщенный алгоритм расчета основных параметров широкополосных (Broadband) спутниковых пользовательских радиолоний. Для упрощения понимания сути расчетов алгоритм разделен на четыре блока. В примерах используются данные о спутнике Inmarsat-4 и терминале класса 3 системы Inmarsat BGAN. Методику предлагается использовать в инженерных расчетах, курсовом и дипломном проектировании.

In article the generalized algorithm for calculation of key parameters of broadband satellite user radio links is considered. For understanding simplification the algorithm is shared into four parts. For examples the specifications of the Inmarsat-4 satellite and Class 3 Inmarsat BGAN terminal are used. The technique is offered to be used in engineering calculations, course and degree design.

Ключевые слова: угол места и азимут, топоцентрическое расстояние, наклонная дальность, эффективная изотропная излучаемая мощность, подводимая к антенне мощность, потери на свободное пространство, дополнительные потери, добротность и эквивалентная шумовая температура, скорость и эффективность кадра передачи.

Key words: elevation angle and azimuth, topocentric distance, inclined distance, the effective isotropic radiated power, free space losses, additional losses, the quality and equivalent noise temperature, binary rate and efficiency of the frame.



ЛЯ спутниковой связи с нефтедобывающими платформами широко применяются терминалы класса 3 широкополосной (Broadband) системы Inmarsat BGAN и доступ в Internet/Intranet через ИСЗ Inmarsat-4 [1; 2].

Исходные данные. Допустим, что нефтедобывающая платформа, помещенная в Северном море (61°17'2" N, 0°14'31" W), будет использовать службу BGAN Inmarsat, чтобы получить доступ к ее корпоративной сети через соединение с виртуальной частной сетью (Virtual Private Network — VPN), следуя схеме, изображенной на рис. 1. Спутник Inmarsat-4 F2 (ЕМЕА, орбита GEO 25° E) предоставляет на нисходящей линии эффективную изотропную излучаемую мощность: $EIRP_d = 67$ дБВт, а станция спутникового доступа (SAS) находится в Buzum (53°16'55" N,

6°12'47" E), Нидерланды. Соединение между спутником и нефтедобывающей платформой реализуется в L -диапазоне на частотах 1525–1559 МГц для нисходящей линии и 1626,5–1660,5 МГц для восходящей линии. На нефтедобывающей платформе размещен терминал Explorer 110, чтобы устанавливать связь через спутник. Этот терминал работает с четырьмя несущими частотами и при «мультинесущем» способе требует для передачи снижения уровня выходного сигнала (Back-Off) 3 дБ. Коэффициент усиления антенны терминала, как на прием, так и на передачу, равен $G = 8,5$ дБ. На восходящей линии для соединения «нефтедобывающая платформа–спутник» система Inmarsat BGAN требует при передаче эффективную изотропную излучаемую мощность на одну несущую частоту: $EIRP_{a,car} = 10$ дБВт.

Высота орбиты геостационарного спутника: $H = 35\,786$ км над поверхностью Земли (земной радиус — $R = 6370$ км).

В нижеследующих вычислениях используем центральные частоты каждого диапазона.

Дополнительные потери (ошибка наведения, потери из-за деполяризации и т. д.): $L = 15$ дБ

Обобщенный алгоритм расчета состоит из четырех блоков:

1. Вычислим угол места ϵ и азимут A , с которыми нужно ориентировать антенну терминала нефтедобывающей платформы на спутник, и дистанцию D до спутника Inmarsat-4 [3].

Подспутниковая точка S' :

— широта 0° : $\varphi_s = 0^\circ$;

— долгота 25° E: $\lambda_s = 25^\circ$.

Нефтедобывающая платформа:

— широта $61^\circ 17' 2''$ N: $\varphi_m = 61,28^\circ$;

— долгота $0^\circ 14' 31''$ W: $\lambda_m = -0,24^\circ$.

Относительная долгота, то есть разность долготы подспутниковой точки S' и наблюдателя λ_m : $\Delta\lambda = |\lambda_s - \lambda_m| = 25,24^\circ$.

СХЕМА ДОСТУПА ТЕРМИНАЛА НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ К СЕТИ Internet ЧЕРЕЗ ИСЗ Inmarsat-4

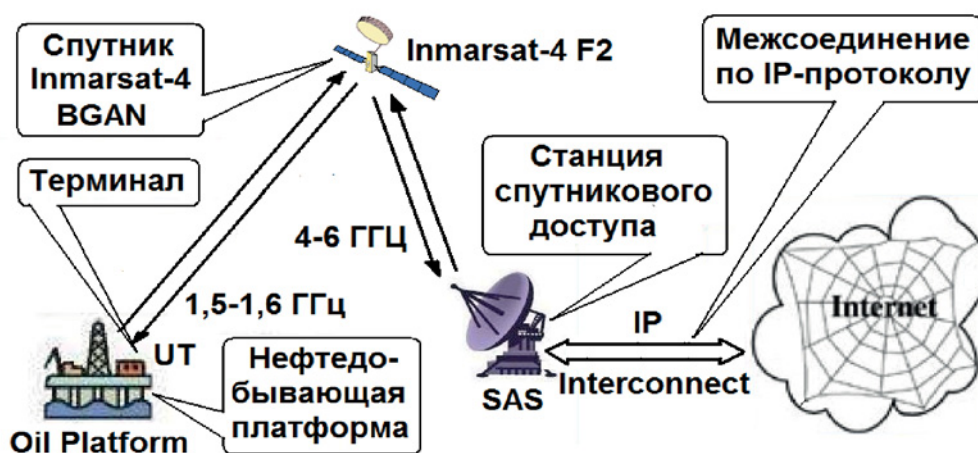


Рис. 1. Схема доступа терминала нефтедобывающей платформы к Сети

Дистанция D , известная как наклонная дальность, вычисляется по формуле

$$D = [R^2 + (R + H)^2 - 2 \cdot R \cdot (R + H) \cdot \cos(\rho)]^{0,5} = [6370^2 + (6370 + 35\,786)^2 - 2 \cdot 6370 \cdot 42\,156 \cdot 0,434654]^{0,5} = (40\,619\,056 + 1\,777\,128\,336 - 233\,438\,511,06576)^{0,5} = (1\,584\,308\,881)^{0,5} = 39803,38 \text{ км.} \quad (1)$$

Косинус топоцентрического расстояния $\cos(\rho)$ для геостационарного спутника вычисляется по формуле

$$\cos(\rho) = \cos(\varphi_m) \cdot \cos(\Delta\lambda) = \cos(61,28^\circ) \cdot \cos(25,24^\circ) = 0,480530 \cdot 0,904529 = 0,434654. \quad (2)$$

Топоцентрическое расстояние ρ определяем из выражения

$$\rho = \arccos [\cos(\varphi_m) \cdot \cos(\Delta\lambda)] = \arccos 0,434654 = 1,1211 \text{ рад} = 64,237^\circ. \quad (3)$$

Угол места ε вычисляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varepsilon &= \operatorname{ctg} \rho - (R \cdot \operatorname{cosec} \rho) / (R + H) = \operatorname{ctg} 64,1284^\circ - 6370 \cdot (\operatorname{cosec} 64,237^\circ) / 42156 = \\ &= 0,482622 - (6370 \cdot 1,110371) / 42156 = 0,484961 - 0,167783 = 0,317178; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} 0,317178 = 0,3072 \text{ рад} = 17,598^\circ. \quad (5)$$

Азимут A вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} \sin A &= \cos \varphi_s \cdot \sin \Delta\lambda \cdot \operatorname{cosec} \rho = \cos 0^\circ \cdot \sin 25,24^\circ \cdot \operatorname{cosec} 64,237^\circ = \\ &= 1 \cdot 0,426411 \cdot 1,110371 = 0,473474; \end{aligned} \quad (6)$$

$$A = \operatorname{arcsin} 0,473474 = 0,4932 \text{ рад} = 28,261^\circ. \quad (7)$$

Однако ввиду того, что нефтедобывающая платформа находится к западу от подспутниковой точки S' , мы должны брать северо-восточный NE квадрант, поэтому искомый азимут вычисляется по формуле

$$A_{NE} = 180 - A = 180 - 28,261^\circ = 151,739^\circ. \quad (8)$$

2. Вычислим необходимую эффективную изотропную излучаемую мощность $EIRP_a$ [дБ·Вт] терминала Explorer 110 с нефтедобывающей платформы, которая насыщает транспондер спутника Inmarsat-4, и мощность P_t [Вт], которую должен выдавать усилитель НРА терминала в антенну.

Число несущих n_{car} определяется из выражения

$$n_{car} = 10^{[(EIRP_a + IBO)/10]} / 10^{(EIRP_{a,car}/10)}, \text{ шт.}, \quad (9)$$

где $\wedge$ — операция возвышения в степень, $EIRP_a$ — эффективная изотропная излучаемая антенной мощность, дБ·Вт; IBO — потери мощности ретранслятора при приеме сигналов от нескольких несущих (Input Back-Off – IBO), дБ; $EIRP_{a,car}$ — эффективная изотропная излучаемая антенной мощность, приходящаяся на одну на несущую, дБ·Вт.

Из выражения (9) следует формула

$$EIRP_a = 10 \cdot \log(n_{car}) + EIRP_{a,car} - IBO, \text{ дБ·Вт}. \quad (10)$$

Если:

— число несущих: $n_{car} = 4$;

— эффективная изотропная излучаемая мощность на несущую: $EIRP_{a,car} = 10$ дБ·Вт;

— потери мощности ретранслятора при приеме сигналов от нескольких несущих (Input Back-Off — IBO): $IBO = -3$ дБ,

то

$$EIRP_a = 10 \cdot \log(4) + 10 - (-3) = 6,02 + 10 + 3 = 19,02 \text{ дБ·Вт}. \quad (11)$$

Итак, эффективная изотропная излучаемая мощность терминала, которая насыщает транспондер спутника Inmarsat-4, равна $EIRP_a = 19,02$ дБ·Вт.

По определению, эквивалентная изотропная излучаемая мощность $EIRP_a$ [дБ·Вт] связана с подводимой к антенне мощностью P_t [дБ·Вт] и коэффициентом усиления передающей антенны G_t [дБ] выражением

$$EIRP_a [\text{дБ·Вт}] = P_t [\text{дБ·Вт}] + G_t [\text{дБ}]. \quad (12)$$

Декларируемый коэффициент усиления антенны терминала Explorer 110 на передачу: $G_t = 8,5$ дБ. Мощность P_t [дБ·Вт], которую должен выдавать усилитель в антенну, полагая, что практически нет потерь в питающем антенну фидере:

$$P_t [\text{дБ}\cdot\text{Вт}] = \text{EIRP}_a [\text{дБ}\cdot\text{Вт}] - G_t [\text{дБ}] = 19,02 - 8,5 = 10,52 \text{ дБ}\cdot\text{Вт}. \quad (13)$$

Мощность, подводимая к антенне усилителем терминала Explorer 110, равна

$$P_t [\text{Вт}] = 10^{\{P_t [\text{дБ}\cdot\text{Вт}]/10\}} = 10^{10,52/10} = 10^{1,052} = 11,27 \text{ Вт}, \quad (14)$$

где $\wedge$ — операция возвышения в степень.

3. Для нисходящей линии «спутник–нефтедобывающая платформа» специфицируется отношение сигнал/шум: $C/\text{No} = 73,7$ дБ. Вычислим необходимое отношение G_r/T_r [дБ/°К] и эквивалентную температуру шума в терминале Explorer 110:

$$(C/\text{No}) = \text{EIRP}_d - L_\Sigma + G_r/T_r - 10 \cdot \log k \quad (15)$$

Значение эффективной изотропной излучаемой со спутника Inmarsat-4 мощности EIRP_d специфицировано (смотри исходные данные):

$$\text{EIRP}_d = 67 \text{ дБ}\cdot\text{Вт} = 67 + 30 = 97 \text{ дБм}. \quad (16)$$

Вычислим потери на распространение сигнала в свободном пространстве:

$$L_{sp} [\text{дБ}] = 92,45 + 20 \cdot \log 1,542 [\text{ГГц}] + 20 \cdot \log 39803,38 [\text{км}] = 92,45 + 3,76 + 91,99 = 188,2 \text{ дБ}. \quad (17)$$

Имея в виду дополнительные потери $L = 15$ дБ, получаем полные потери L_Σ в нисходящей линии:

$$L_\Sigma = L_{sp} + L = 188,2 + 15 = 203,2 \text{ дБ}. \quad (18)$$

Добротность приемной системы G_r/T_r [дБ/°К] терминала Explorer 110 (см. формулу (15)):

$$G_r/T_r [\text{дБ}/^\circ\text{К}] = 73,7 - 67 + 203,2 - 228,6 = -18,7 \text{ дБ}/^\circ\text{К}. \quad (19)$$

Так как для терминала Explorer 110 на приеме усиление антенны $G_r = 8,5$ дБ, то эквивалентная шумовая температура T_r [дБ/°К] терминала Explorer 110 вычисляется по формуле

$$T_r [\text{дБ}/^\circ\text{К}] = G_r [\text{дБ}] - G_r/T_r [\text{дБ}/^\circ\text{К}] = 8,5 + 18,7 = 27,2 \text{ дБ}\cdot^\circ\text{К}. \quad (20)$$

Потенцируя (20), получаем, что эквивалентная шумовая температура терминала Explorer 110 (в градусах Кельвина) равна

$$T_r [^\circ\text{К}] = 10^{(27,2/10)} = 10^{2,72} = 524,81 \text{ }^\circ\text{К}. \quad (21)$$

4. В системе Inmarsat BGAN на восходящей линии терминал применяет множественный доступ типа FDMA/TDMA и использует модуляцию 16-QAM с символьной скоростью $V_s = 151,2$ киосимволов в секунду. Кадр передачи (Frame) типа R20T4.5X для восходящей линии имеет продолжительность $T_F = 20$ мс. Терминал пользователя может использовать единственный блок данных в каждом кадре. Полная структура кадра показана на рис. 2. Заметим, что система не предусматривает использование сигналов опорных станций в этом кадре.

СТРУКТУРА КАДРА TDMA ТИПА R20T4.5X НА ВОСХОДЯЩЕЙ ЛИНИИ ТЕРМИНАЛА BGAN

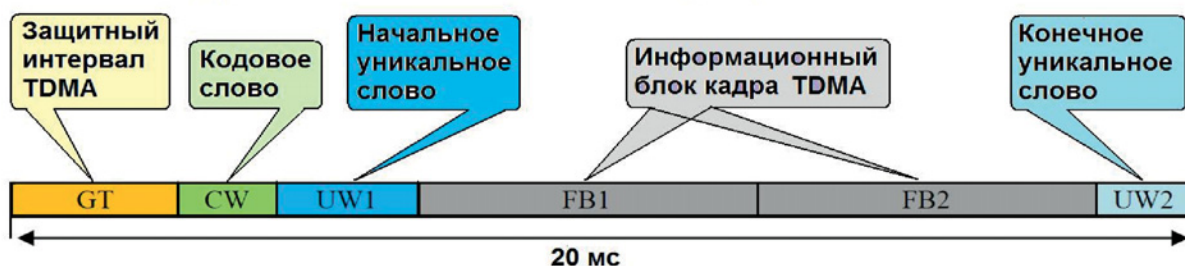


Рис. 2. Структура кадра TDMA типа R20T4.5X на восходящей линии терминала BGAN

На рис. 2 показаны следующие элементы кадра:

- защитный интервал TDMA (Guard Time = GT): GT = 0,36 мс;
- преамбула или кодовое слово (Code Word – CW): CW = 18 символов;
- начальное уникальное (ключевое) слово (Unique Word 1 – UW1): UW1 = 40 символов;
- блоки данных одинаковой длины FB1 = FB2;
- конечное уникальное (ключевое) слово (Unique Word 2 – UW2): UW2 = 20 символов.

Вычислим бинарную скорость информации, приходящуюся на пользователя в килобитах в секунду [кбит/с] и эффективность кадра типа R20T4.5X [4].

Длительность символа T_s [мс] есть величина, обратная символьной скорости V_s :

$$T_s \text{ [мс]} = 1 / V_s = 1/151,2 \text{ [ксимв/с]} = 0,0066 \text{ мс.} \quad (22)$$

Для продолжительности кадра можно записать соответствие (23):

$$T_F = 20 \text{ мс} = 0,36 + (18 + 40 + 2 \cdot I_i + 20) \cdot T_s, \quad (23)$$

из формулы (23) следует, что каждый блок I_i в кадре содержит

$$I_i \text{ [симв]} = [20 - (0,36 + 78 \cdot 0,0066)] / (2 \cdot 0,0066) = (20 - 0,8748) / 0,0132 = 1448 \text{ символов, то есть} \quad (24)$$

$$FB1 = FB2 = I_i = 1448 \text{ модуляционных символов 16QAM.} \quad (25)$$

Бинарная скорость информации R_i , приходящаяся на одного пользователя, с учетом того, что модуляционный символ 16QAM содержит 4 бита, равна

$$R_i = 4 \cdot I_i / T_F = 4 \cdot 1448 / 20 = 289,6 \text{ кбит/с.} \quad (26)$$

Вычислим эффективность кадра η в процентах по формуле

$$\eta = T_u / T_F = (2 \cdot I_i \cdot T_s) / T_F = 2 \cdot 1448 \cdot 0,0066 / 20 = 0,95568 = 95,57 \%. \quad (27)$$

Заключение. В работе рассмотрен обобщенный алгоритм инженерного расчета параметров пользовательских спутниковых восходящей и нисходящей радиолиний. Расчетные формулы разделены на четыре группы, а алгоритм расчета разбит на четыре блока. Приведен пример расчета основных параметров широкополосных (Broadband) пользовательских восходящей и нисходящей радиолиний между терминалом Explorer 110, установленным на нефтедобывающей платформе, и спутником Inmarsat–4. Методику можно использовать в инженерных расчетах, курсовом и дипломном проектировании.

Список литературы

1. inmarsat.com
2. Richharia M. Satellite Systems for Personal Applications: Concepts and Technology / M. Richharia, L. D. Westbrook. — N. Y.: Wiley, 2011. — 476 p.
3. Цифровые терминалы спутниковых систем связи: справ. изд. / А. А. Ильин [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Деан, 2005. — 192 с., с ил.
4. Ильин А. А. О скорости передачи в широкополосных Broadband системах спутниковой связи. НТК ППС, НС и курсантов: тез. докл. / А. А. Ильин. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2012. — Ч. 1. — 304 с.

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. П. Яснoв,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Р. В. Волков,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СРЕДСТВ НАВИГАЦИОННОГО ОГРАЖДЕНИЯ

ON THE QUESTION OF THE DEFINITION OF RANGE MONITORING SYSTEM AIDS TO NAVIGATION

В статье рассмотрен пример определения радиуса действия элементов системы мониторинга средств навигационного ограждения, функционирующей на основе каналов связи стандарта GSM с учетом влияния взаимных помех.

The article describes an example of determining the radius of the elements monitoring system aids to navigation functioning on the basis of GSM channels with the influence of interference.

Ключевые слова: система мониторинга плавучей навигационной обстановки, зона действия, взаимные помехи, коэффициент взаимного различия.

Key words: monitoring system of floating navigational aids, coverage, interference, coefficient of mutual differences.

В НАСТОЯЩЕЕ время на внутренних водных путях Российской Федерации (ВВП РФ) имеет место интенсивное внедрение современных инфокоммуникационных технологий, направленных на повышение безопасности и эффективности работы флота на ВВП РФ. Особое внимание специалисты водного транспорта уделяют проблеме определения зоны действия инфокоммуникационных систем, работающих для нужд внутреннего водного транспорта.

Внедрение речной системы мониторинга средств навигационного ограждения (СМ СНО) на ВВП РФ дает возможность повысить качество решения ряда производственных задач, в том числе накопленные данные о состоянии объектов мониторинга впоследствии используются для планирования обслуживания и определения эффективных эксплуатационных подходов работы системы в целом.

СМ СНО может быть реализована различными способами, в том числе на основе стандарта GSM. Тогда связь объектов мониторинга с центром системы и управления осуществляется по открытому каналу операторов сотовой связи стандарта GSM. В таком случае вопросы, связанные с эффективностью функционирования автоматизированной СМ СНО, в определенной степени зависят от сосредоточенных по спектру помех, комплексно воздействующих на канал связи.

Среди таких помех основное внимание стоит уделить взаимным помехам радиосредств, к тому же, учитывая особенности расстановки СНО на ВВП, стоит обратить внимание на неполосное излучение линий электропередач, а также на различные промышленные и индустриальные помехи.

С такой точки зрения оптимальный радиус действия СМ СНО может определяться следующим выражением:

$$R_{\text{БС}}^{\text{опт}} = \arg [p_{\text{ош}}(R) \leq p_{\text{треб}}], \quad (1)$$

где $p_{\text{треб}} = 10^{-2} \div 10^{-6}$ — требуемая вероятность ошибки приемника при передаче цифровой информации;

$p_{\text{ош}}(R)$ — зависимость ошибки поэлементного приема цифровой информации СМ СНО;

R — расстояния между ТЗ и БС.

Взаимными помехами по радиолинии «береговая станция (БС)—транспондер знака элемента СНО (ТЗ)» в диапазоне 900–1800 МГц могут являться прежде всего одновременно работающие транспондеры. В таком случае для решения соотношения (1) необходимо определить энергопотенциал:

— ТЗ:

$$\chi = \frac{P_{\text{и}} \lambda^2 G_1 \eta_1 G_2 \eta_2 (h_1^2 + h_0^2) \cdot (h_2^2 + h_0^2)}{2P_{\text{мин}}^{\text{пр}}}, \quad (2)$$

— ИП:

$$\chi_n = \frac{P_{\text{ип}} \lambda^2 G_n \eta_n G_2 \eta_2 (h_n^2 + h_0^2) \cdot (h_2^2 + h_0^2)}{2P_{\text{мин}}^{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{и}}, P_{\text{ип}}$ — мощности передатчиков ТЗ и источника помех (ИП);

$P_{\text{мин}}^{\text{пр}}$ — чувствительность приемника ТЗ;

$G_1, \eta_1, G_2, \eta_2, G_n, \eta_n$ — коэффициент направленного действия и КПД антенно-фидерной системы ТЗ и ИП;

h_1, h_2, h_n — высоты антенн ТЗ, БС и ИП;

λ — длина волны.

Для случая реализации СМ СНО на ВВП РФ в ЕГС ЕЧ можно считать $h_0^2 = 5$ м [1].

Решение уравнения (1) для случая незамирающего сигнала — помехи, замирающей по рэлеевскому закону распределения, будет иметь вид

$$R_{\text{БС(км)}}^{\text{опт}} = \left[\frac{\chi}{\left| \ln 2 p_{\text{треб}} \right| \left(2 + \frac{\chi_n \cdot g_{0r}}{R_{n(\text{км})}} \right)} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (4)$$

где g_{0r} — нормированный коэффициент взаимного различия частотно-временной структуры сигналов ТЗ и ИП должен быть равен или менее 1 [1]; R_n — расстояние между ИП и ТЗ.

Полагая, что $G_1 = G_2 = G_n = 1$; $\eta_1 = \eta_2 = \eta_n = 0,9$; $h_1 = 3$ м; $h_2 = 50$ м; $h_n = 11$ м, считалось выполненным вполне разумное условие $p_{\text{треб}} = 10^{-4}$ для взаимных помех.

Нормированный коэффициент взаимного различия можно найти следующим образом [2]:

$$g_{0r} = \left(\frac{\sin \frac{\Omega_r T}{2}}{\frac{\Omega_r T}{2}} \right)^2; \quad \Omega_r = |k_r \omega_0 - \omega_n|; \quad r = 1, 2; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad (5)$$

где $\omega_n = 2\pi f_n$ — частота помехи; T — длительность посылки цифрового сообщения.

Для расчетов были приняты весьма жесткие условия воздействия взаимных помех, для нормированного коэффициента взаимного различия $g_{0r} = 0,4053$.

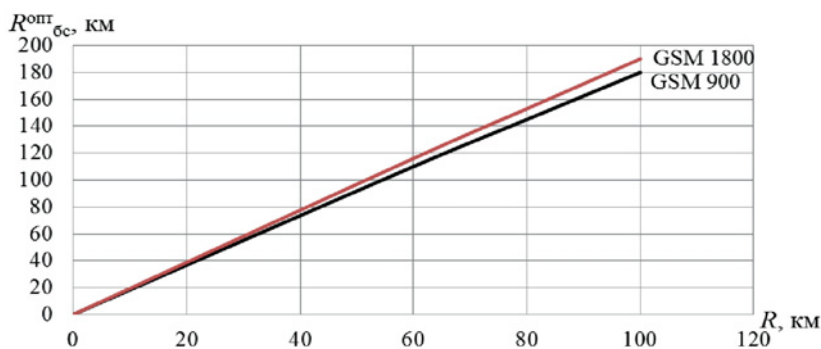


Рис. 1. График зависимости $R_{БС}^{опт}$ от R_n в диапазоне частот GSM 900 и GSM 1800

На рис. 1 показаны зависимости $R_{БС}^{опт}$ от R_n , построенные по (4), для принятых выше условий, где вариации расстояния источника помехи от транспондера существенно влияют на размеры зоны базовой станции. Так, например, для GSM 900 при $R_n = 20$ км радиус зоны составляет 38 км, а для GSM 1800 при тех же условия радиус будет равен 40 км.

Для сравнительного анализа были рассмотрены результаты расчета радиуса действия СМ СНО для каналов связи АИС 1 (161,9 МГц) и АИС 2 (162,02 МГц) для тех же условий, которые использовались и при определении $R_{БС}^{опт}$ в диапазоне частот GSM-связи. Полученный результат приведен на рис. 2 в виде графика зависимости $R_{БС}^{опт}$ от R_n .

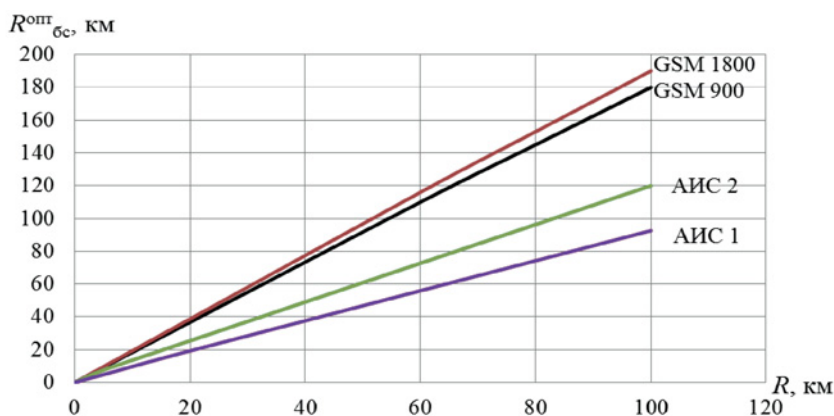


Рис. 2. График зависимости $R_{БС}^{опт}$ от R_n в случае АИС 1 и АИС 2

В случае АИС 1 при $R_n = 20$ км радиус зоны составляет 20 км, а в случае АИС 2 при тех же $R_n = 20$ км радиус действия будет равен 25 км.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что использование сотовой связи стандарта GSM 1800 весьма интересно, так как по-видимому при рассмотренных условиях обеспечивает наибольшую зону действия элементов СМ СНО.

Список литературы

1. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — СПб.: СПГУВК, 2008.

2. Сикарев А. А. Оптимальный прием дискретных сообщений / А. А. Сикарев, А. И. Фалько. — М.: Связь, 1978.

3. Петухов Ю. В. Электромагнитная защищенность базовых станций речных АИС в условиях взаимных помех / Ю. В. Петухов, И. А. Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2008. — Вып. 2.

УДК 656.61.052:621.396.6:629.12.018(075.8)

А. А. Сикарев,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

С. Ф. Шахнов,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

К РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ В РАДИОКАНАЛАХ РЕЧНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

TO CALCULATION OF THE FIELD STRENGTH IN THE RADIOCHANNELS OF THE LOCAL RIVER DIFFERENTIAL SUBSYSTEM GLONASS/GPS OF MEDIUM WAVE RANGE

В статье рассматривается методика расчета напряженности поля средневолнового диапазона от вертикального точечного диполя в зоне действия контрольно-корректирующих станций (ККС) речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS на внутренних водных путях (ВВП) России. Приведены условия, допускающие использование асимптотических решений.

The article describes a method of calculation of medium wave range field intensity from a vertical point dipole in the area of control and correction stations (CCS) of river local differential system GLONASS/GPS in the inland waterways (IWW) of Russia. The conditions which permit the use of asymptotic solutions are presented.

Ключевые слова: напряженность электромагнитного поля, комплексная диэлектрическая проницаемость, векторный потенциал, зоны Френеля, численное расстояние, функция ослабления, функция Грина, кусочно-неоднородная трасса.

Key words: electromagnetic field, integrated tension dielectric permittivity, vector potential, Fresnel zone, numerical distance, attenuation function, Green's function, piecewise heterogeneous route.

РАЗВЕРТЫВАНИЕ речных локальных дифференциальных подсистем (РЛДПС) ГЛОНАСС/GPS на ВВП России сопряжено с решением задачи по оптимизации расположения цепочек ККС, обеспечивающих сплошное покрытие ВВП при заданном качестве приема, с учетом влияния взаимных помех от соседних станций и промышленных помех. В свою очередь для этого необходимо определение напряженности поля излучателей в точках приема.

В общем виде решение данной задачи весьма затруднительно. Однако учет особенностей распространения радиоволн в конкретных условиях позволяет существенно упростить задачу. Так, рассмотрение задачи распространения радиоволн нижней границы средневолнового диапазона при предполагаемом размере зон действия ККС порядка 200÷300 км [1] позволяет не учитывать

пространственную волну, отраженную от ионосферы, и считать замирания сигнала и взаимной помехи отсутствующими.

Также существенное упрощение задачи может быть достигнуто учетом особенностей влияния подстилающей поверхности радиотрасс. Подстилающая поверхность на ВВП России характеризуется широким разбросом ее электрических свойств (вещественная диэлектрическая проницаемость ϵ' и удельная электропроводность σ). От сухих песков в нижнем течении Волги ($\epsilon' = 2$, $\sigma = 2 \cdot 10^6$) до болотистых почв среднего и нижнего течения Оби и Енисея ($\epsilon' = 80$, $\sigma = 10^9$) [2]. Здесь и далее все величины представляются в системе СГСЕ. Влиянию вышеназванных факторов на возможность аппроксимации общего решения задачи определения напряженности поля излучателей и посвящена данная статья.

Комплексная диэлектрическая проницаемость ϵ связана с удельной электропроводностью среды σ следующим соотношением:

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' = \epsilon' + i \frac{4\pi}{\omega} \sigma.$$

Напряженности магнитного и электрического полей H и E в воздухе при гармонических процессах связаны с плотностью тока в антенне J и проницаемостью среды ϵ уравнениями Максвелла вида:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= -i k_0 \epsilon E + \frac{4\pi}{c} J, \\ \operatorname{rot} E &= i k_0 H, \end{aligned} \quad (1)$$

где $k_0 = \omega/c$; ω — круговая частота гармонических колебаний; c — скорость света.

Диапазон частот, используемый при передаче дифпоправок по каналам РЛДПС, соответствует длине волны λ порядка 1000 м (средние волны) [1]. Так как эффективная высота вертикальной антенны много меньше длины волны, то излучающую антенну можно рассматривать как вертикальный диполь. Тогда для отыскания решений уравнений (1) удобно использовать векторный потенциал Герца Π , связанный с вектором H соотношением $H = -i k_0 \epsilon \operatorname{rot} \Pi$ и определяющий решение уравнений (1) в случае, если он удовлетворяет волновому уравнению:

$$\nabla^2 \Pi + \epsilon k^2 \Pi = -i \frac{4\pi}{\omega \epsilon} J, \quad (2)$$

где $k^2 = \epsilon \omega^2/c^2$.

Для упрощения расчетов сферическая поверхность земли в области решения может заменяться плоской. Критерием допустимости такой замены являются условия [3]:

$$R < \sqrt[4]{a^2 \lambda^3 \frac{\sigma}{2\pi^2 c}},$$

где R — расстояние от источника до точки наблюдения; a — радиус Земли. Для большинства почв, встречающихся на ВВП России, проводимость лежит в пределах $\sigma = 2 \cdot 10^7 \dots 10^9 \text{ с}^{-1}$ [2], что для погрешности замены в 5 % соответствует условию $R \leq 20 \div 60 \text{ км}$.

В случае плоской поверхности для вертикально поляризованного излучения вектор Π будет иметь только одну вертикальную составляющую и напряженность электрического поля в точке приема будет связана с потенциалом Герца выражением

$$E_z = \nabla^2 \Pi_z + \frac{\partial^2}{\partial^2} \Pi_z. \quad (3)$$

Для решения уравнения (2) необходимо задать граничные условия на поверхности раздела двух сред: атмосферы и земли. Для плоской задачи при вертикальной антенне граничные условия будут иметь вид

$$\epsilon_1 \Pi_z^{(1)} = \epsilon_2 \Pi_z^{(2)}, \quad z = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (2) с граничными условиями (4) для точечного источника приводит к интегральному уравнению вида [4, с. 16–22]:

$$\Pi(R) = -\frac{1}{i\varepsilon\omega} \int_{V'} \frac{J \exp(i k_0 R)}{R} dV' + \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \left\{ \frac{\partial \Pi(R')}{\partial n} \frac{\exp(i k_0 r)}{r} - \Pi(R') \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\exp(i k_0 r)}{r} \right) \right\} dS'. \quad (5)$$

Здесь объемный интеграл определяет векторный потенциал поля, создаваемый в точке наблюдения сферической волной в бесконечном однородном пространстве токами вертикальной антенны. Поверхностный же интеграл определяет поле от вторичных источников, индуцируемых на поверхности земли первичной волной и согласно принципу Гюйгенса накладывающихся на невозмущенное поле излучателя. Так как максимальный размер зон действия ККС на суше составляет порядка 300 км, то для излучения средневолнового диапазона с длиной волны 1000 м отражением от ионосферной можно пренебречь. Тогда поверхность интегрирования можно представить в виде бесконечной полусферы, охватывающей источник излучения 0 и точку наблюдения A, основанием которой является поверхность земли (рис. 1).

Вертикальную антенну можно рассматривать как точечный диполь при условии, что [3]:

$$l^2 \ll \frac{R\lambda}{\pi}, \quad (6)$$

где l — длина диполя.

При $\lambda = 1000$ м для $l = 10$ м условие (6) выполняется уже при R порядка километра. Тогда объемный интеграл в выражении (5) примет вид

$$\Pi_{zV}(R) = \frac{p \exp(i k_0 R)}{\varepsilon R}, \quad (7)$$

где p — дипольный момент, равный iIh/ω (I — ток в антенне, h — ее высота).

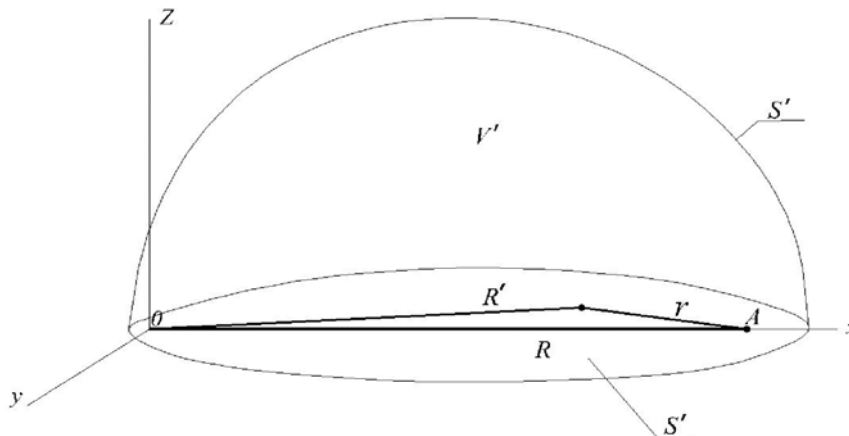


Рис. 1. Область интегрирования, R' — текущая точка интегрирования

Интеграл по поверхности бесконечной полусферы в пределе исчезает и остается только интеграл по поверхности земли. Тогда уравнение (5) с учетом (7) примет вид

$$\Pi_z(R) = \frac{p \exp(i k_0 R)}{\varepsilon R} + \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \left\{ \frac{\partial \Pi(R')}{\partial z} \frac{\exp(i k_0 r)}{r} - \Pi_z(R') \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\exp(i k_0 r)}{r} \right) \right\} dS'. \quad (8)$$

Для исключения одного из слагаемых в подынтегральной функции в выражении (8) можно ввести функцию Грина вида [3]: $v = v_0 + \varphi$, где $v_0 = \frac{\exp(i k_0 R)}{R}$.

При этом φ выбирается так, чтобы на поверхности интегрирования в нуль обращалось либо v (условие Дирихле), либо $\frac{\partial v}{\partial n}$ (условие Неймана). Тогда уравнение (8) преобразуется либо в выражение

$$\Pi_z(R) = \frac{p \exp(i k_0 R)}{\varepsilon R} + \frac{1}{2\pi} \int_{S'} \Pi_z(R') \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\exp(i k_0 r)}{r} \right) dS', \quad (9)$$

либо в выражение

$$\Pi_z(R) = \frac{p \exp(i k_0 R)}{\varepsilon R} + \frac{1}{2\pi} \int_{S'} \frac{\partial \Pi(R')}{\partial z} \frac{\exp(i k_0 r)}{r} dS'. \quad (10)$$

Для $\lambda = 1000$ м большинство видов почв, встречающихся на ВВП, включая русла рек и озер, дают $|\varepsilon| \gg 1$ [2]. Это условие позволяет упростить решение уравнений (9) и (10).

Волновая зона, в которой справедливы выражения (9) или (10), определяется условием [3]:

$$1 \leq \frac{2\pi R}{\lambda}, \text{ то есть } R \geq \frac{1000}{2\pi} \geq 160 \text{ м.}$$

Область поверхности земли, существенная для вычисления интеграла (8), при расположении источника и точки наблюдения вблизи плоской поверхности ($z = 0$), как показано в работе [3], определяется первой зоной Френеля, имеющей в этом случае форму вытянутого эллипса (рис. 2)

с полуосями: $a_1 = R + \lambda/8$, $b_1 = \sqrt{\frac{\lambda R}{8}}$.

Так как в средневолновом диапазоне при исследовании поля на расстояниях порядка 200÷300 км от источника $b_1 \ll a_1$, то интеграл по поверхности можно свести к интегралу вдоль линии, которую называют «трассой» радиосигнала.

Переход от уравнений Максвелла (1) к волновому уравнению (2) возможен только при постоянных значениях ε . Для расчета поля над кусочно-однородной поверхностью можно воспользоваться методом, предложенным Фейнбергом [3].

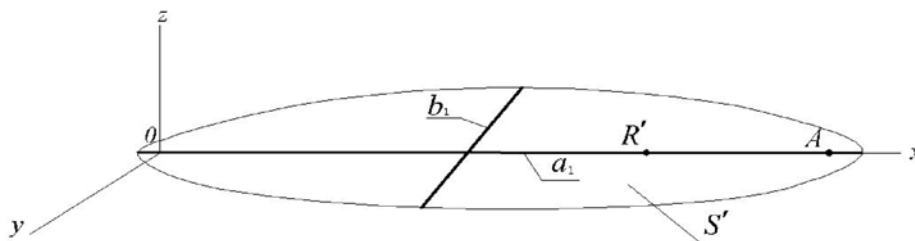


Рис. 2. Существенная зона поверхности интегрирования (первая зона Френеля)

В случае неоднородной почвы нельзя утверждать, что вектор Π будет иметь только вертикальную составляющую. Поэтому удобнее рассматривать сразу поле E , которое на поверхности земли можно представить как произведение в данной точке невозмущенного поля E_0 от источника и медленно меняющейся функции ослабления w . Тогда, с учетом выражений (3) и (7) имеем

$$E_z^0(R) = \frac{\exp(i k_0 R)}{R}, \quad E(R) = E_z^0(R) w(R). \quad (11)$$

При расположении источника и точки наблюдения на поверхности земли в качестве функции Грина выбираем $v_+ = \left\{ 2 \frac{\exp(i k_0 |R - R'|)}{|R - R'|} \right\} w_0 |R - R'|$, где w_0 — функция ослабления для диполя в точке (x', y') над условной вспомогательной поверхностью с ε_0 , обозначаемая как y_0 . Тогда с учетом уравнения (3) граничные условия на поверхности примут вид

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{i k E_z}{\sqrt{\varepsilon}} \text{ и по аналогии с выводом уравнения (10) получим}$$

$$E_z(R) = \frac{\exp(i k_0 R)}{\varepsilon R} y_0(s_0 R) + \frac{i k_0}{2\pi} \int_{S'} \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon(x)}} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0}} \right) \frac{\exp(i k_0 r) E_z(r) y_0(s_0 r)}{r} dS'. \quad (12)$$

Подставляя (12) в уравнение (11), при постоянстве ε по оси y получим функцию ослабления:

$$w(R) = y_0(s_0 R) + i \sqrt{\frac{R}{\pi}} \int_0^R \left(\sqrt{s(x')} - \sqrt{s_0} \right) w(x') \frac{y_0(s_0 r)}{\sqrt{x'(R - x')}} dx', \quad (13)$$

где $s(x') = \frac{ik_0}{2\varepsilon(x')}$, $s_0 = \frac{ik_0}{2\varepsilon_0} = \text{const}$.

Для кусочно-однородной трассы из уравнения (13) получим

$$w(R) = y_0(s_0 R) + i\sqrt{\frac{R}{\pi}} \sum_{j=1}^N \int_{x_{j-1}}^{x_j} \left(\sqrt{s_j(x')} - \sqrt{s_0} \right) w(x') \frac{y_0(s_0 R)}{\sqrt{x'(R-x')}} dx', \quad (14)$$

где N — число однородных участков трассы; j — номер участка; sx , $s(R-x)$, sR — численные расстояния.

При больших численных расстояниях каждого из участков ($|s_j(x_j - x_{j-1})| > 1$) нормированные функции ослабления $y(sx)$ можно заменить их асимптотическими значениями:

$$y(s_j(x_j - x_{j-1})) = -\frac{1}{2s_j(x_j - x_{j-1})}.$$

Тогда функция ослабления окончательно примет вид

$$w(R) = -\frac{1}{2R\sqrt{s_1 s_N}}. \quad (15)$$

Амплитуда напряженности поля точечного диполя в бесконечном однородном воздушном пространстве определяется выражением [3]:

$$|E(R)| = -\frac{3 \cdot 10^2 \sqrt{P}}{R} \text{ мВ/м}, \quad (16)$$

где P — мощность передатчика в кВт; R — в км.

Подставляя выражения (15) и (16) в формулу (11), окончательно получим

$$|E(R)| = -\frac{3 \cdot 10^2 \sqrt{P}}{2R^2 \sqrt{s_1 s_N}} \text{ мВ/м}. \quad (17)$$

Таким образом, выражение (17) позволяет рассчитывать напряженность поля контрольно-корректирующей станции при представлении ее излучающей антенны в виде точечного вертикального диполя. При этом рассматривается излучение средневолнового диапазона при распространении излучения вдоль плоской кусочно-однородной трассы с N участками, для которых известны ε' и σ . Существенная зона интегрирования принимается равной первой зоне Френеля, которая имеет форму сильно вытянутого эллипса. При этом считаем, что электрические параметры почвы на каждом из участков постоянны как в продольном, так и в поперечном направлении. Выражение (17) справедливо в диапазоне расстояний от источника 20÷60 км для большинства почв, присутствующих на ВВП России, и значительных размерах первого и последнего однородного участка ($sx > 1$), что часто имеет место при исследовании влияния промышленных помех на помехозащищенность радиоканалов ЛРДПС.

Список литературы

1. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — 2-е изд. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 525 с.
2. Кашпровский В. Е. Экспериментальное исследование распространения радиоволн / В. Е. Кашпровский. — М.: Наука, 1980. — 151 с.
3. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е. Л. Фейнберг. — 2-е изд. — М.: Наука: Физматлит, 1999. — 496 с.
4. Леонтович М. А. Об одном методе решения задач распространения радиоволн по поверхности земли / М. А. Леонтович // Изв. АН СССР. Сер. «Физика». — 1944. — Т. 8.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.12.03

М. Н. Покусаев,
д-р техн. наук, профессор,
Астраханский государственный технический университет;

М. К. Овсянников,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

К. О. Сибряев,
канд. техн. наук,
Астраханский государственный технический университет;

К. Е. Хмельницкий,
аспирант,
Астраханский государственный технический университет

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГРЕБНОМ ВАЛЕ СУДОВ КЛАССА «РЕКА–МОРЕ»

ANALYSIS OF TORSIONAL VIBRATIONS CHARACTERISTICS IN THE PROPELLER SHAFT OF “RIVER–SEA” CLASS SHIPS

В краткой форме представлены результаты расчетно-теоретического и экспериментального анализа характеристик крутильных колебаний судового вала во всем диапазоне эксплуатационных режимов его работы в сравнении со значениями, допускаемыми Правилами Морского и Речного регистров судоходства РФ.

Some results of theoretical, calculated and experimental researches of ship propeller shaft torsional vibration characteristics and their analyses in the range of operation conditions as compared with meanings assumed by the Rules of Sea and River Registers are presented in the article.

Ключевые слова: машинно-двигательный комплекс, главный дизель, крутильная схема, торсиографирование, силиконовый демпфер, гребной винт.

Key words: engine-propulsion complex, main diesel engine, torsional scheme, torcionalgrafic installation, silicon damper, ship propeller.

В УСЛОВИЯХ Волго-Каспийского бассейна на судах типа «река–море», судах рыбопромыслового и речного флотов широко распространены среднеоборотные дизели, выходной фланец коленчатого вала которых жестко соединен с валопроводом и винтом фиксированного шага.

Одной из важных особенностей эксплуатации этих судов (по сравнению с морскими) является частая смена режимов хода (по многочисленным и разным причинам). Это существенно влияет в целом на ресурс главных дизелей и валопроводов с их подшипниками — от упорных до дейдвудных.

Смена скорости вращения вала в любом случае изменяет его вибрационные характеристики, а вместе с ними и общую картину вибраций всех элементов судового набора с возможностью приближения их к опасным до аварийных.

В связи с этим изучение, как теоретическое, так и экспериментальное, включая натурные измерения крутильных колебаний в валах, представляло и представляет актуальный научный и практический интерес. В качестве объекта исследования выбран машинно-двигательный комплекс (МДК) судна пр. 1743 «Омский–99».

Главная установка двухвальная. В каждую линию вала входит: главный дизель 6NVD48A2U с силиконовым демпфером (типа В-790, эффективный момент инерции демпфера

285 Нм²), промежуточный вал с опорным подшипником и гребной вал на двух дейдвудных подшипниках.

По рекомендациям, изложенным в документе «Заключение по торсиографированию главных двигателей т/х «Омский–99»» № 95-02, принятым к сведению Балтийской инспекцией Российского морского регистра судоходства от 19 июня 2002 г., зону 275–285 об/мин следует считать ограничивающей для дизеля правого борта. Данная рекомендация сохранена без изменений Астраханской инспекцией Российского морского регистра судоходства 20 июня 2004 г. (№ 30-1743-01-04 «Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса»).

Крутильная схема МДК данного судна с демпфером, одноузловая и двухузловая формы колебаний представлены на рис. 1.

На основе проведенных расчетов крутильных колебаний валовой линии данного судна без демпфера методом Терских [1] сделан вывод, что в рабочем диапазоне частот вращения вала главного дизеля есть резонансная зона (около 275 об/мин при номинальной частоте вращения вала $n = 310$ об/мин), в которой прочность валопровода не гарантирована.

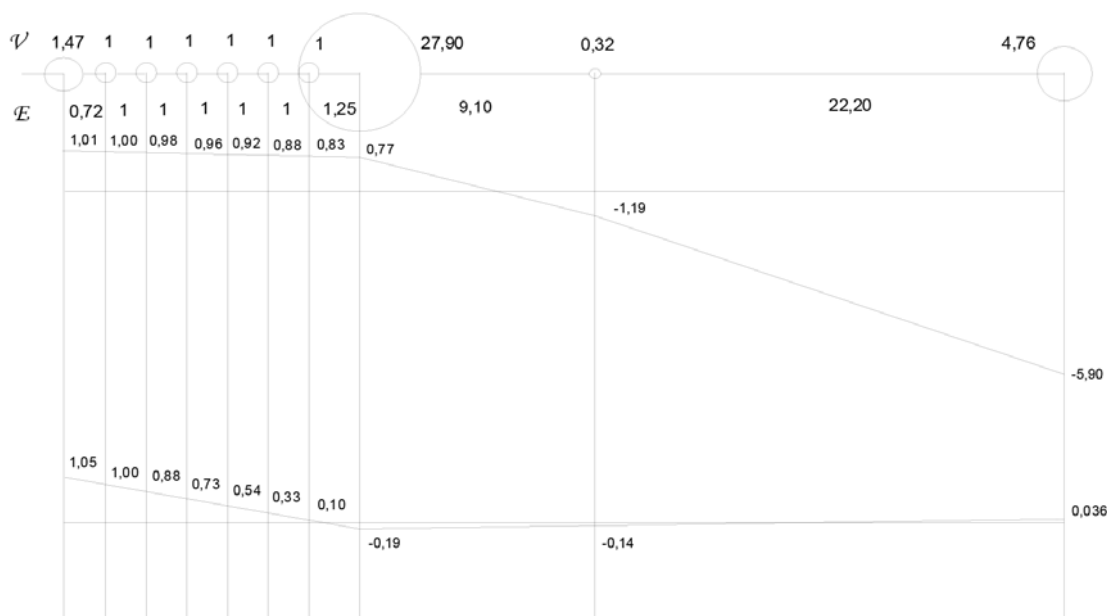


Рис. 1. Дискретная крутильная схема МДК судна с демпфером, одноузловая и двухузловая формы колебаний

Наиболее содержательными являются графики развития суммарных напряжений в коленчатых валах главных двигателей судна пр. 1743 «Омский–99» как с демпфером, так и без него. Данные графики и выделенные в результате гармонического анализа основные резонансы 6, 9 и 12-го порядков одноузловой и двухузловой форм колебаний представлены на рис. 2. Там же приведены допускаемые для длительной работы напряжения по правилам Российского морского регистра судоходства (РС) [2].

Правила классификации и постройки морских судов [2] регламентируют работу силового демпфера в составе судового дизеля, указывая в п. 8.8.4 нижнюю границу работоспособности демпфера, который должен обеспечивать снижение напряжений (следовательно, и амплитуд крутильных колебаний) не менее чем до 85 % от соответствующих допускаемых напряжений. В данном случае это условие не выполняется, то есть применение демпфера крутильных колебаний не обеспечивает необходимой эффективности снижения колебаний в опасных резонансных зонах.

Покажем влияние изменения частоты колебаний на развитие крутильных колебаний (рис. 2 и последующие).

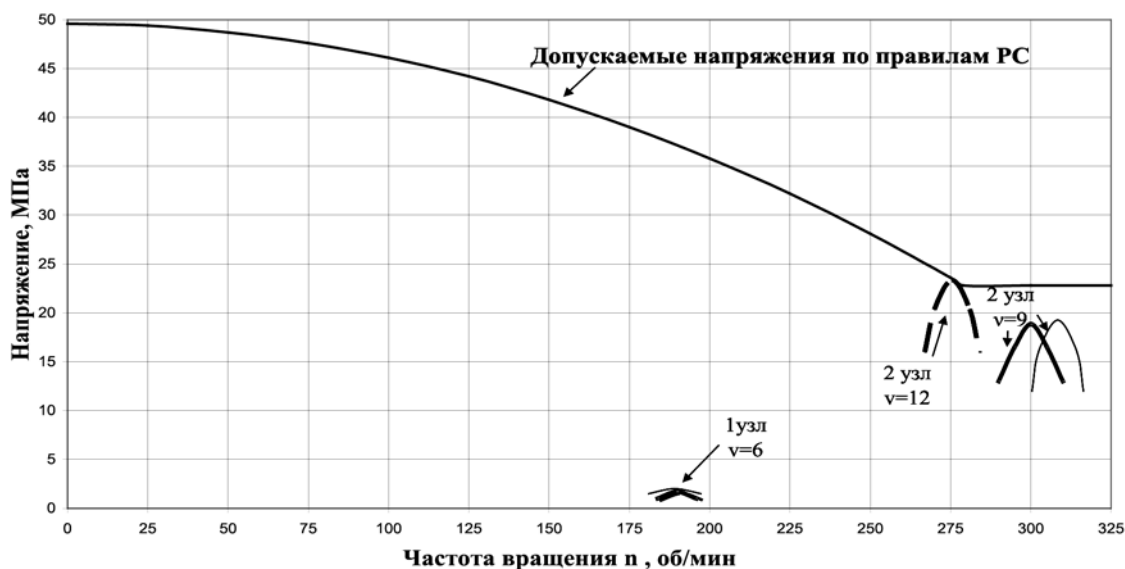


Рис. 2. Напряжения в коленчатых валах главных дизелей судна пр. 1743

(v — порядок колебаний)

----- — расчетные напряжения без демпфера;
 ————— — напряжения, полученные при тензометрировании с демпфером;
 ————— — расчетные напряжения с демпфером

Зависимость между частотой колебаний абсолютной системы N и безразмерной частотой $\sqrt{\Delta}$ свободных колебаний определяется по формуле [3]:

$$N = \frac{30}{\pi} \omega = \frac{30}{\pi \sqrt{\vartheta_0 e_0}} \sqrt{\Delta}, \quad (1)$$

где $\vartheta_0 e_0$ — постоянные системы.

Заменяем данную многомассовую систему эквивалентной ей трехмассовой (путем объединения близко расположенных масс в одну).

Ориентировочное значение частот одноузловой и двухузловой форм колебаний трехмассовой системы определяется по формуле [3]:

$$\Delta_1, \Delta_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{\vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \cdot E_{1,2}} + \frac{\vartheta_2 + \vartheta_3}{\vartheta_2 \cdot \vartheta_3 \cdot E_{2,3}} \right) \mp \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{\vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \cdot E_{1,2}} + \frac{\vartheta_2 + \vartheta_3}{\vartheta_2 \cdot \vartheta_3 \cdot E_{2,3}} \right)^2 - \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3}{\vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \cdot \vartheta_3 \cdot E_{1,2} \cdot E_{2,3}} \right)}. \quad (2)$$

При варьировании элементами системы (моментами инерции масс и податливостью участков вала) можно приблизительно оценить изменения частоты колебаний по формулам (1) и (2).

По методике Терских [1] амплитуда колебаний определяется по формуле

$$\frac{A_{\text{рез}}}{|\alpha_t|} = \frac{M_y (1 - S_{\text{дв}}) |m_z^{(1)} \alpha_z|}{H_{\text{дв}}^{\text{фр}} (\alpha_1^2 + \alpha_6^2) + H_{\text{пр}}^{\text{фр}} \alpha_{\text{пр}}^2 + H_{\text{в}}^{\text{фр}} \alpha_{\text{в}}^2}, \quad (3)$$

где $A_{\text{рез}}$ — расчетная резонансная амплитуда свободных колебаний (АСК) первой массы двигателя;

α_t — относительная АСК той же массы;

M_y — модуль безразмерной комплексной амплитуды возмущающего момента, приложенного к первой массе двигателя;

$S_{\text{дв}}$ — приведенный коэффициент сухого трения в валах дизеля;

$|m_z^{(1)}\alpha_z|$ — геометрическая сумма безразмерных амплитуд для главных порядков возмущающего момента;

$H_{дв}^{\Phi}$ — безразмерная фрикционная стойкость равных масс двигателя от вязкого трения;

$H_{п}^{\Phi}$ — безразмерная фрикционная стойкость приводов;

$H_{в}^{\Phi}$ — безразмерная фрикционная стойкость гребного винта;

$\alpha_1, \alpha_6, \alpha_{пр}, \alpha_v$ — амплитуды свободных колебаний двигателя, привода и винта соответственно.

Оценим зависимость параметров, входящих в формулу (3), от изменения частоты колебаний. Так как опасной является двухузловая форма (частота колебаний 3306,2 кол/мин), варьировать N будем от 1500 до 4000 кол/мин (25–66 Гц).

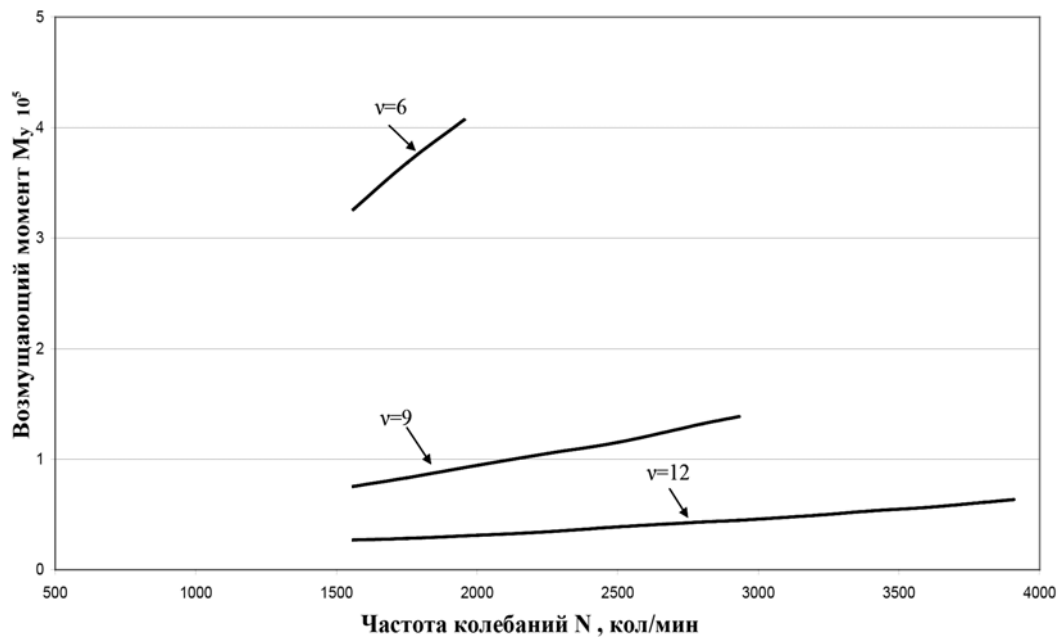


Рис. 3. Зависимость возмущающего момента от частоты колебаний

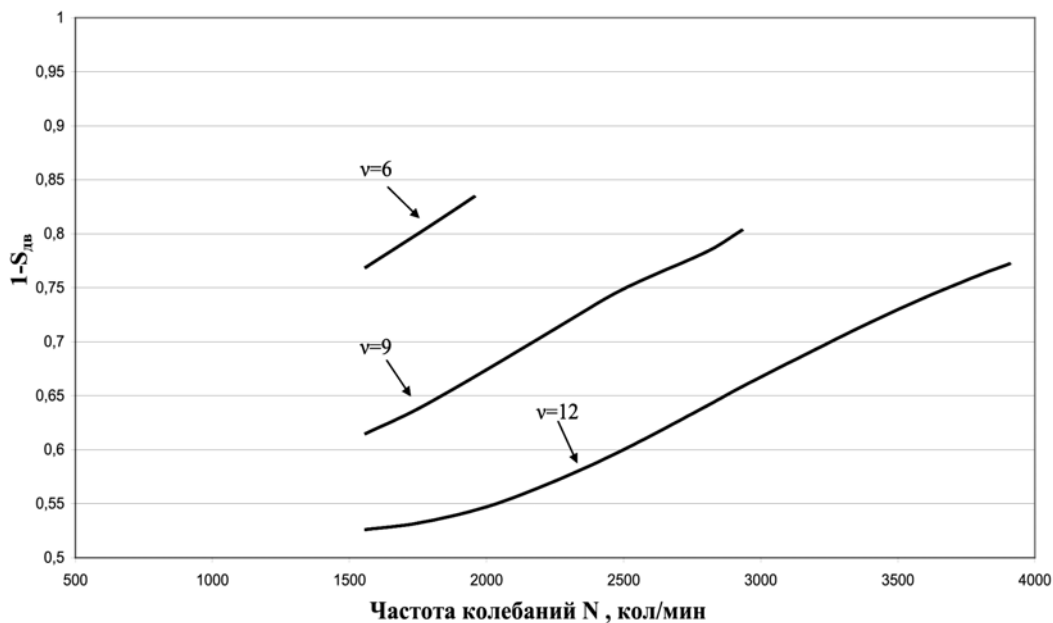


Рис. 4. Зависимость $(1 - S_{дв})$ от частоты колебаний

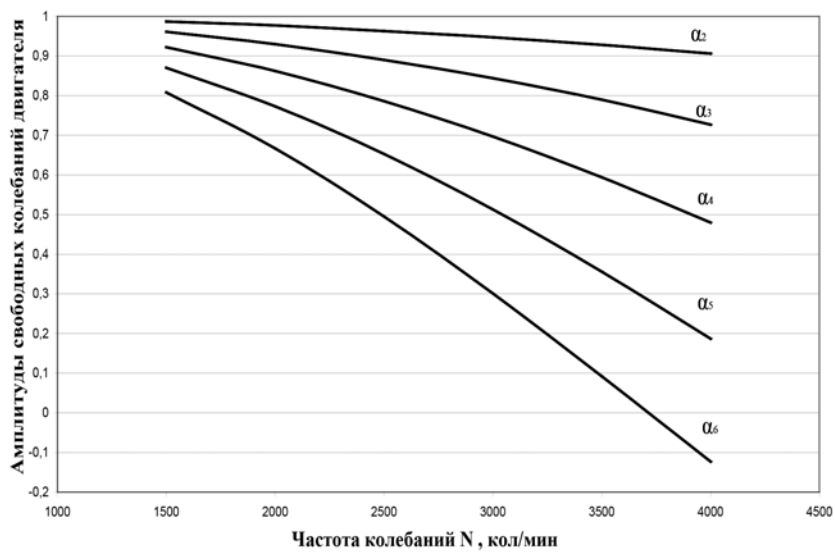


Рис. 5. Зависимость амплитуд свободных колебаний вала двигателя от частоты колебаний

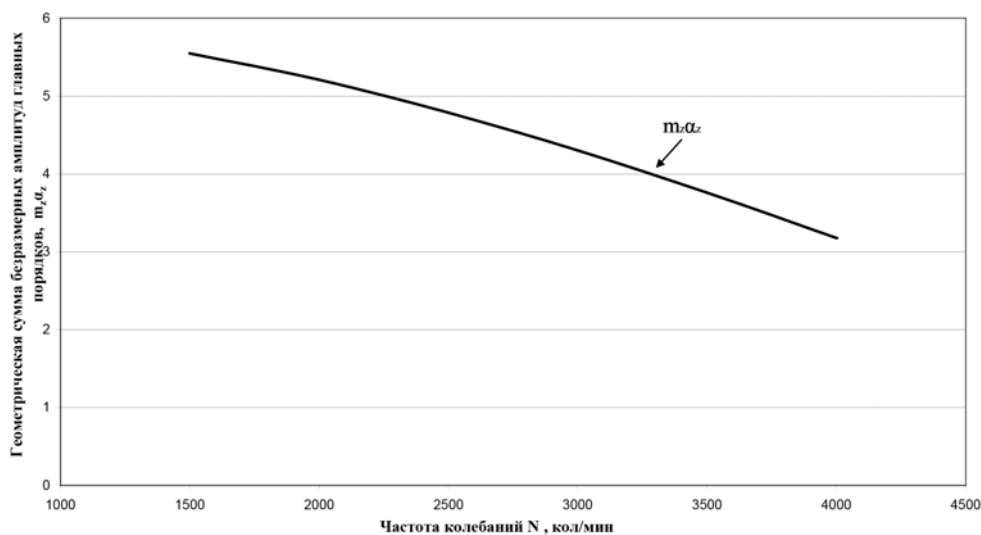


Рис. 6. Зависимость $|m_z^{(1)}\alpha_z|$ от частоты колебаний

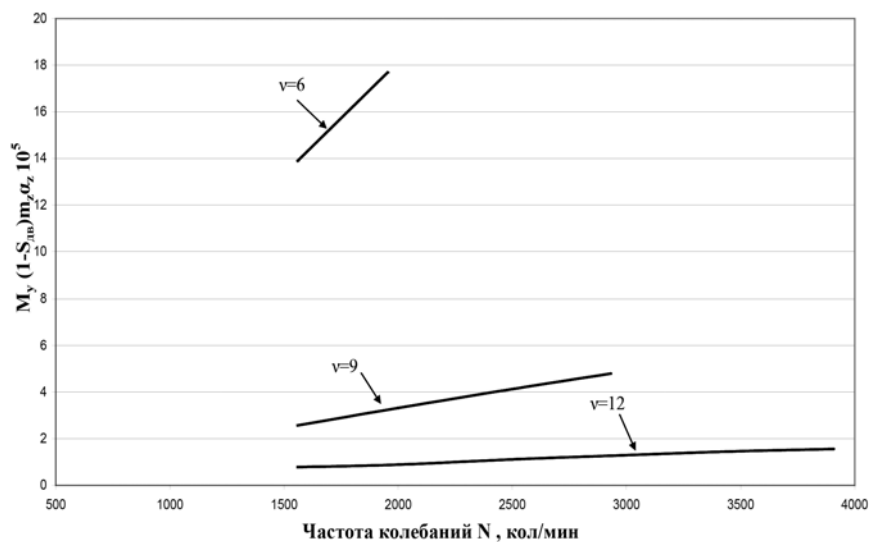


Рис. 7. Зависимость $M_y(1-S_{лв})|m_z^{(1)}\alpha_z|$ от частоты колебаний

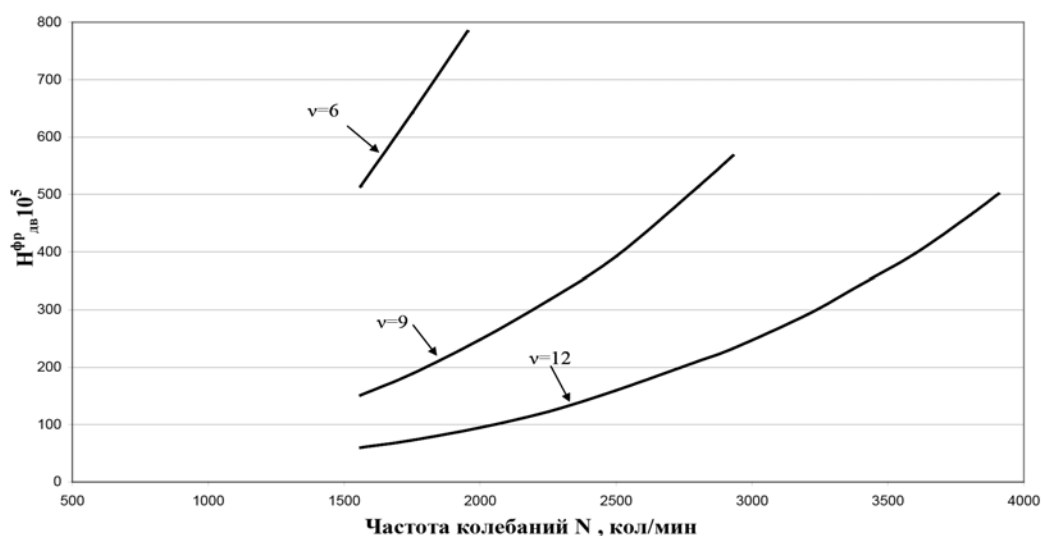


Рис. 8. Зависимость $H^{\phi}_{дв} \cdot 10^5$ от частоты колебаний

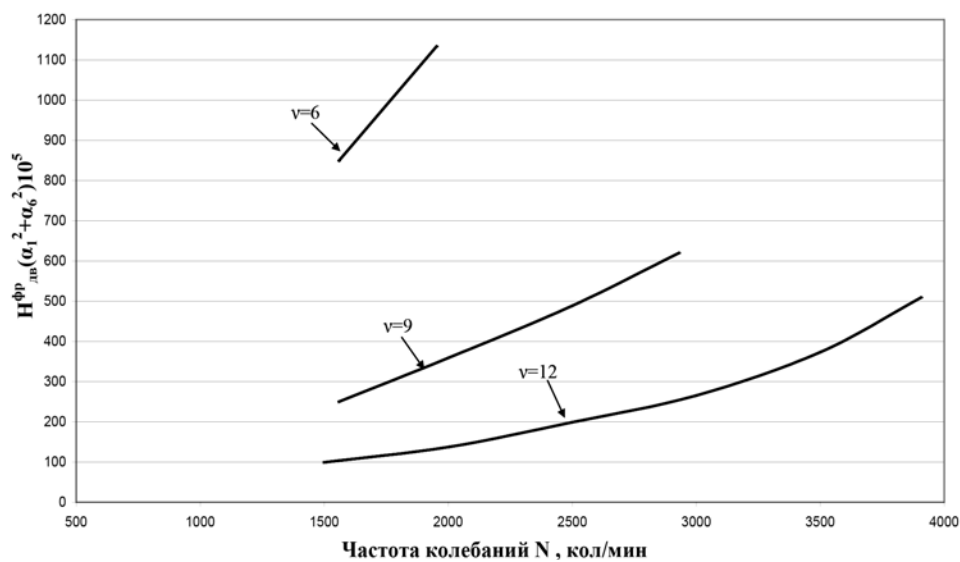


Рис. 9. Зависимость $H^{\phi}_{дв} (\alpha_1^2 + \alpha_c^2) \cdot 10^5$ от частоты колебаний

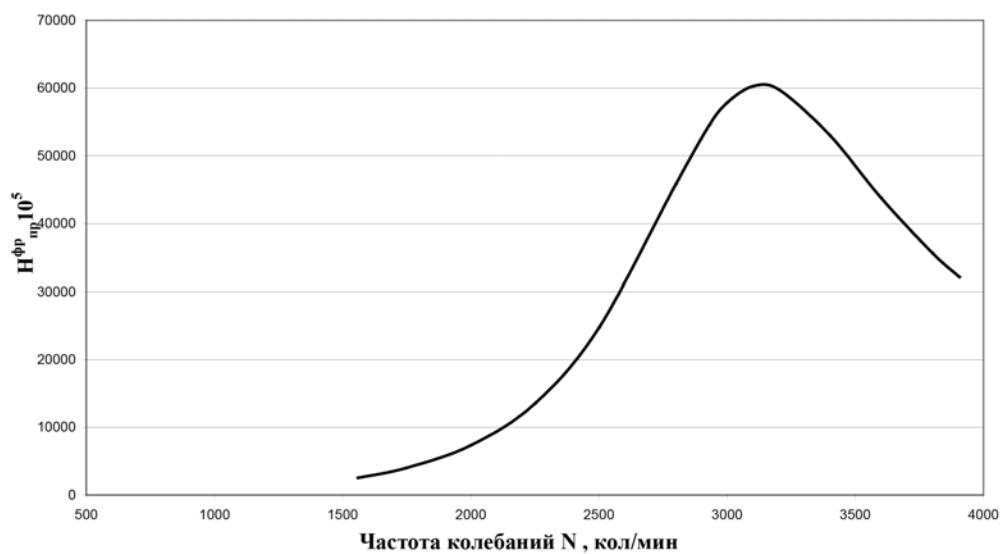


Рис. 10. Зависимость $H^{\phi}_{пр} \cdot 10^5$ от частоты колебаний

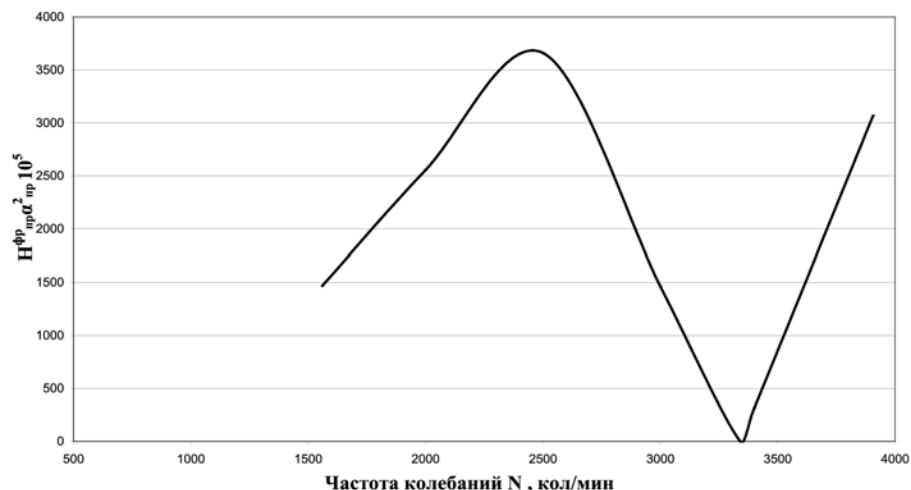


Рис. 11. Зависимость $H_{np}^{\Phi} \alpha_{np}^2 10^5$ от частоты колебаний

Безразмерная фрикционная стойкость гребного винта определяется по следующей формуле [1]:

$$H_{\text{в}}^{\text{фр}} = \left(\frac{D}{100} \right)^5 a_{\text{в}} N n_{\text{рез}} \frac{ek}{m} [1 - l x(x + 0,4)] \sqrt{\frac{\mu^2 + f}{\mu^2 + 0,35}} e_0, \quad (4)$$

где e, k, m, l, x — параметры элементов гребного винта, не зависящие от частоты колебаний, определяются согласно [1] в зависимости от относительной поступи винта λ .

$$\lambda = \frac{H}{D} - 0,3 \text{ (ходовой режим).}$$

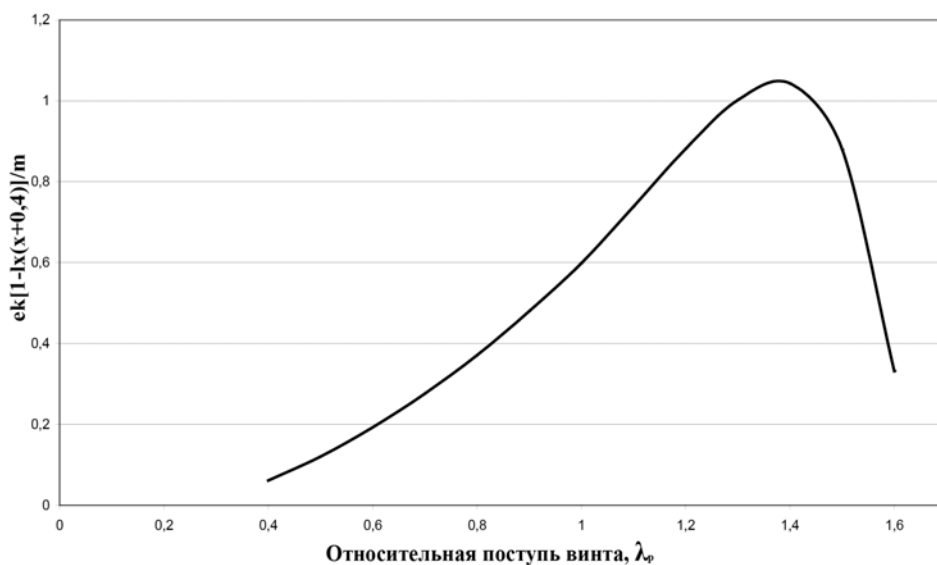


Рис. 12. Зависимость $\frac{ek}{m} [1 - l x(x + 0,4)]$ от относительной поступи винта

При увеличении относительной поступи винта до 1,4 будет увеличиваться фрикционная стойкость винта.

Относительная поступь винта данного судна равна 0,65 при ходовом режиме.

Увеличение относительной поступи винта до определенного предела благоприятно влияет на демпфирование крутильных колебаний.

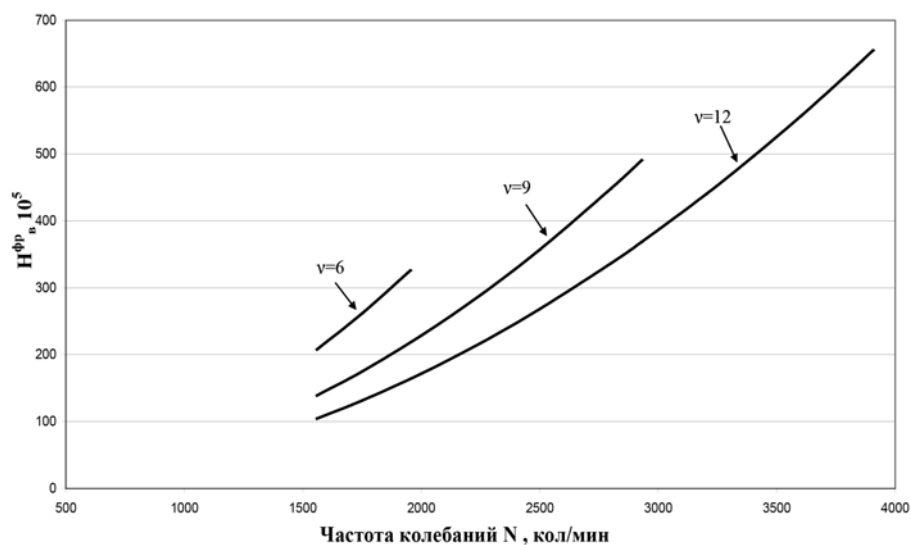


Рис. 13. Зависимость $H^{\phi}_B \cdot 10^5$ от частоты колебаний

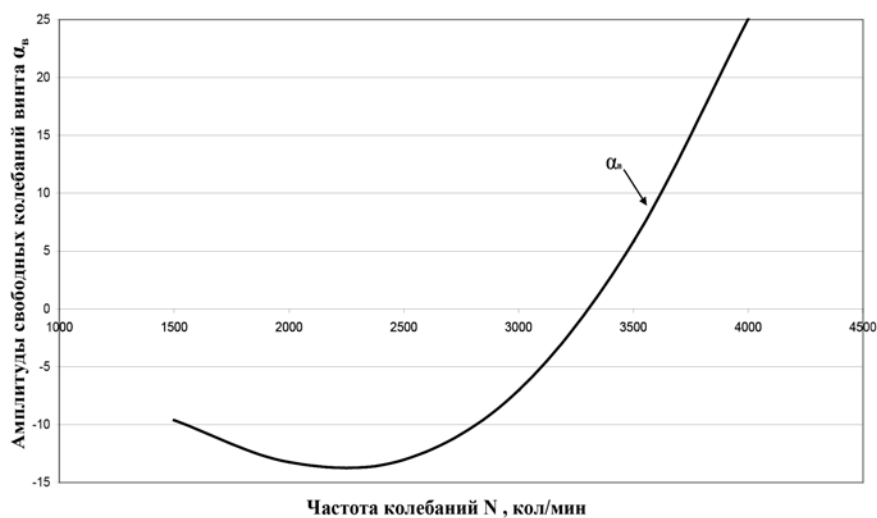


Рис. 14. Зависимость α_n от частоты колебаний

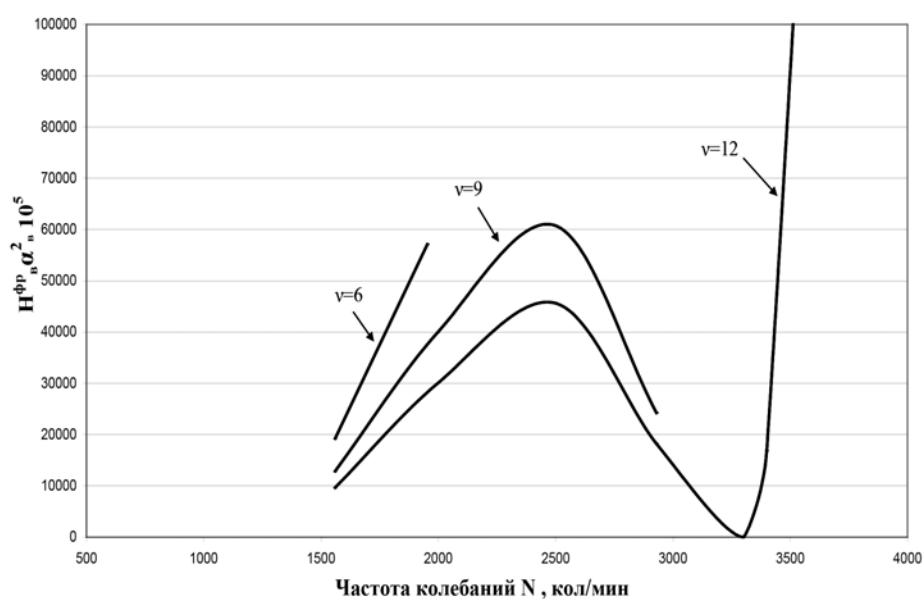


Рис. 15. Зависимость $H^{\phi}_{\alpha^2}_B \cdot 10^5$ от частоты колебаний

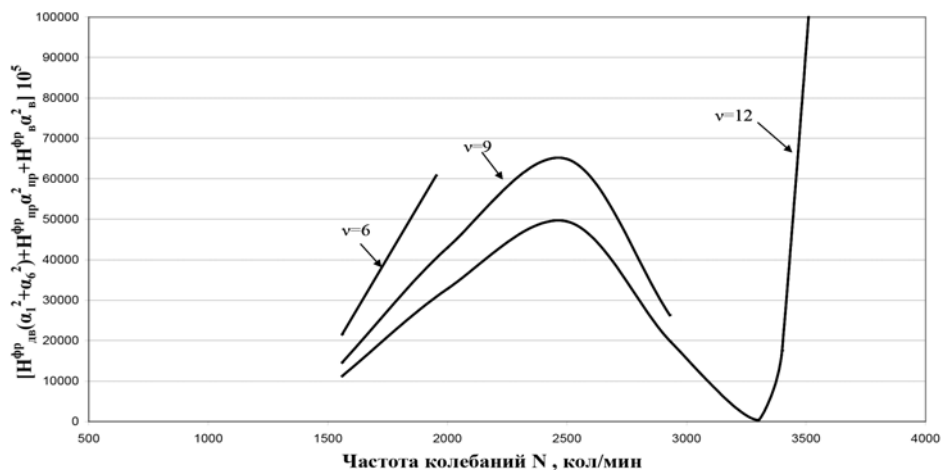


Рис. 16. Зависимость $[H_{дв}^{\Phi p}(\alpha_1^2 + \alpha_6^2) + H_{пр}^{\Phi p}\alpha_{пр}^2 + H_{в}^{\Phi p}\alpha_v^2] 10^5$ от частоты колебаний

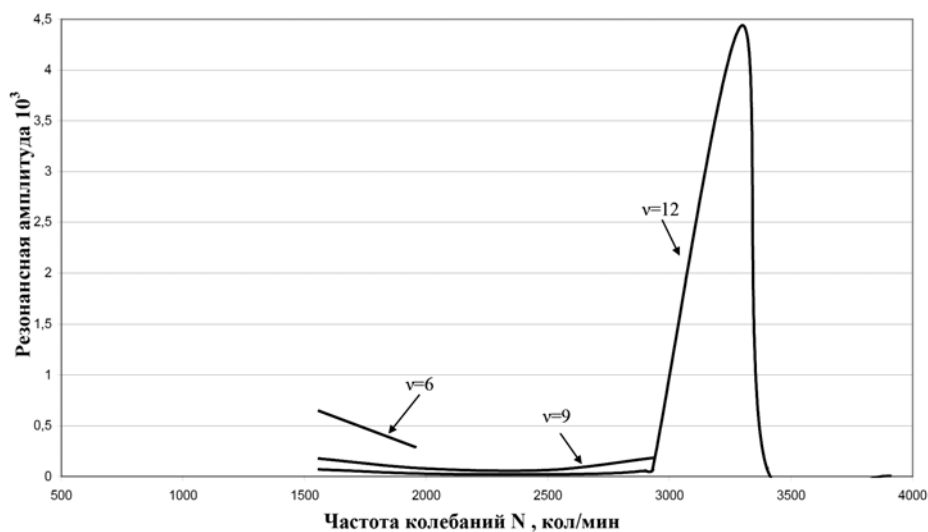


Рис. 17. Зависимость резонансной амплитуды от частоты колебаний

Чтобы определить напряжения в валах, необходимо резонансную амплитуду умножить на масштаб напряжений. Масштаб напряжений зависит от безразмерной амплитуды эластического момента вала при частоте свободных колебаний данной формы и диаметра вала.

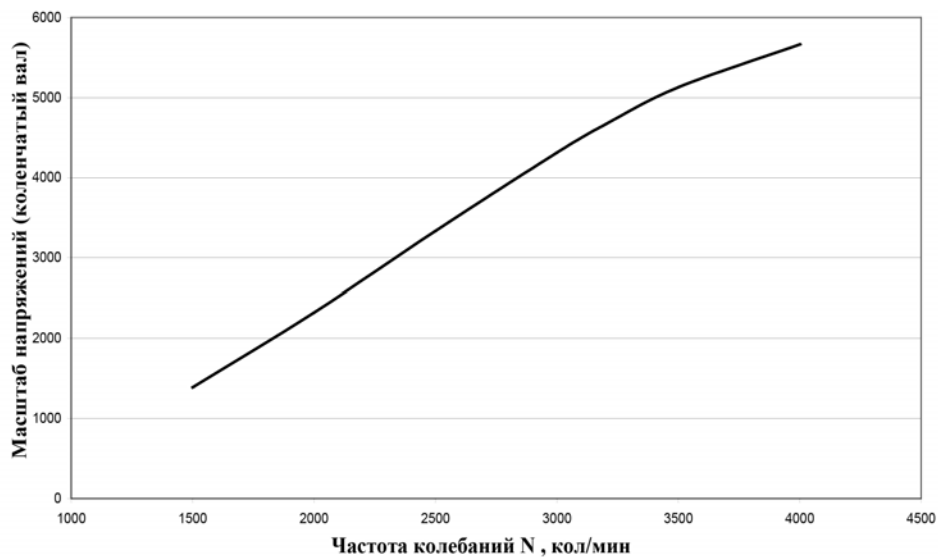


Рис. 18. Зависимость масштаба напряжений (коленчатый вал) от частоты колебаний

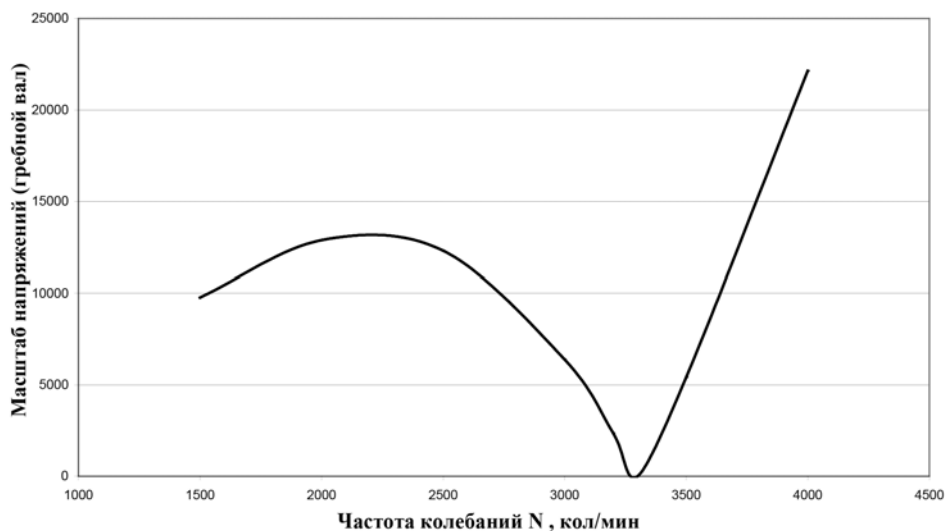


Рис. 19. Зависимость масштаба напряжений (гребной вал) от частоты колебаний

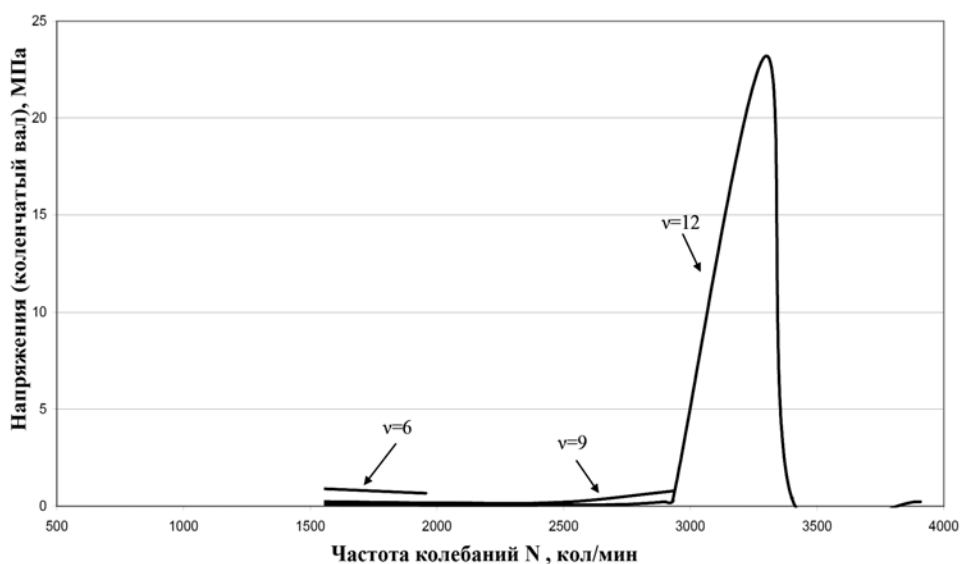


Рис. 20. Зависимость напряжений (коленчатый вал) от частоты колебаний

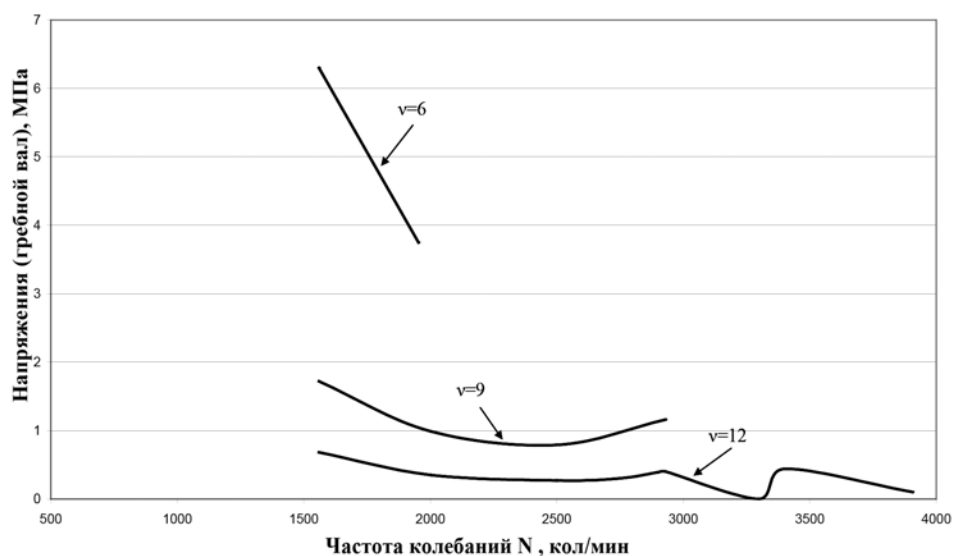


Рис. 21. Зависимость напряжений (гребной вал) от частоты колебаний

В нашем случае резонансная амплитуда при двухузловой форме колебаний (частота колебаний 3306 кол/мин) достигает максимальной величины, а следовательно, и напряжения будут максимальными. Варьируя элементами системы (моментами инерции масс и податливостью участков вала), можно сместить частоту колебаний и тем самым снизить резонансную амплитуду и напряжения, исключив запретную зону из диапазона частот вращения двигателя.

Для любого МДК на стадии проектирования варьированием элементами системы и приведенными выше зависимостями можно получить те частоты колебаний, при которых нет необходимости в установке демпфера крутильных колебаний.

Сложные современные инструментальный измерения вибро- и тензохарактеристик, технологию его использования в лабораторных и натурных (судовых) условиях, а также методику обработки результатов с оценкой возможных погрешностей авторы представят в отдельной статье.

Список литературы

1. Терских В. П. Крутильные колебания валопровода силовых установок / В. П. Терских. — Л.: Судостроение, 1969–1970. — Т. 1–4. Прил.
2. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб., 2008. — Т. 2. — 691 с.
3. Истомин П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС / П. А. Истомин. — Л.: Судостроение, 1968. — 304 с.

УДК 629.5.03.001.26

И. А. Дороникина,
канд. техн. наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

OPTIMIZATION OF SHIP POWER PLANT WORK

В предлагаемой работе на основе анализа современных тенденций развития энергетических установок приводятся методика выбора исходных параметров судовых энергетических установок новых проектов судов, дается по возможности лаконичное логическое изложение основных зависимостей, положенных в основу выбора исходных параметров и при оптимизации работы установки, и последующего анализа реализуемой конструкции.

The paper, on the basis of thorough analysis of current trends in the development of power plants gives the methods of selecting initial parameters of power plant for new ship designs. The paper presents possible logical statement of the basic dependencies as the basis of initial parameters choice and for optimization of the plant and subsequent analysis of the implemented design.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, оптимизация работы СЭУ, энергоемкость транспортировки, режим оптимального энергоиспользования, анализ энергосбережения судна.

Key words: ship power plants, optimization of the SPP, the energy intensity of transportation, mode of optimal energy use, analysis of vessel energy-saving.

Н А практике традиционно под экономичным режимом судовой энергетической установки (СЭУ) понимается работа с минимальным количеством путевого расхода топлива (b_y). На этом режиме работы установки увеличивается дальность плавания судна или достигается экономия топлива при заданном пути.

Между тем такой ход судна обеспечивается на режимах работы главных двигателей в диапазоне 50–60 % номинального, которые являются неблагоприятными для работы систем утилизации вторичных ресурсов установки и теплового состояния двигателей [1]. Кроме того, при оценке b_y не учитываются внутренняя схема энергообеспечения установки, условия эксплуатации судна (например, степень его загрузки), а также то, что главные и вспомогательные элементы установки как правило, используют различные виды топлива [2].

Лишен этих недостатков способ оптимизации работы СЭУ, исходя из минимума энергоемкости транспортной работы судна (энергоемкости транспортировки):

$$e = (x \cdot B_r \cdot P_r Q_n + x_b \cdot B_b \cdot Q_{nb} + x_k \cdot B_k \cdot Q_n - x_v \cdot b_r \cdot P_v \cdot Q_n - x_y \cdot Q_y - x_{dr} \cdot Q_{dr}) C \cdot v \rightarrow \min,$$

где x , x_b , x_k , x_v , x_y и x_{dr} — число работающих в ходовом режиме главных двигателей, вспомогательных двигателей, автономных котлов, валогенераторов, утилизационных котлов и других устройств, использующих вторичные ресурсы установки (далее — утилизирующих устройств);

P_r и P_v — долевая мощность главного двигателя и агрегатная мощность валогенератора;

B_r , B_b и B_k — долевой часовой расход топлива главного двигателя, часовой расход топлива вспомогательного двигателя и часовой расход топлива автономного котла в ходовом режиме;

Q_{nb} и Q_n — низшая удельная теплота сгорания топлива, используемого вспомогательными и главными двигателями;

Q_y и Q_{dr} — теплопроизводительность утилизационных котлов и других утилизирующих устройств в ходовом режиме;

b_r — долевой удельный расход топлива главного двигателя в ходовом режиме;

G — масса перевозимого груза;

v — скорость движения судна.

Варьируемыми величинами при расчете энергоемкости транспортировки являются:

— число работающих элементов СЭУ (главных и вспомогательных двигателей, автономных и утилизационных котлов, валогенераторов и других утилизирующих устройств) в пределах их количества в составе СЭУ;

— долевая мощность главного двигателя при работе его по соответствующей винтовой характеристике (нормальной, облегченной или утяжеленной);

— долевые удельный и часовой расход топлива при работе главного двигателя по соответствующей винтовой характеристике (нормальной, облегченной или утяжеленной); скорость движения судна;

В результате на основе анализа возможных схем энергообеспечения судна (движения судна, тепло- и электроснабжения) определяются:

— оптимальная скорость движения судна (скорость движения судна при $e = e_{\min}$);

— соответствующие ей режим работы главных двигателей и схема тепло- и электроснабжения судна, которые позволяют с возможно максимальной эффективностью использовать энергию расходуемых топлив.

При этом учитываются структура установки, потребности в тепло- и электроэнергии, возможности их (теплоты и электроэнергии) получения на долевых режимах работы главных двигателей и конкретные эксплуатационные условия (техническое состояние судна и движительного комплекса, его загрузка, навигационные и климатические условия). Последнее (эксплуатационные условия) учитывается выбором соответствующих скоростных характеристик элементов главного энергетического комплекса.

Обоснованный таким образом режим работы СЭУ называется режимом оптимального энергоиспользования.

Оптимизация работы СЭУ производится с помощью модели, состоящей из функционала (приведенной выше зависимости для энергоемкости транспортировки) и системы ограничений и граничных условий для величин, входящих в указанную зависимость.

У большинства транспортных судов режим оптимального энергоиспользования располагается в диапазоне 70–80 % номинального режима работы главных двигателей. Работа установки на этом режиме позволяет существенно (до 40 % по сравнению с номинальным режимом) экономить расход топлива и сохранять ресурс вспомогательных двигателей и котлов.

Выводы:

1) задачу оптимизации работы СЭУ следует рассматривать как поиск оптимальных технических решений. Конечная цель оптимизации — отыскание наиболее эффективного решения для некоторых задаваемых условий;

2) для выявления наилучшего соотношения различных технологических и энергетических процессов работы СЭУ с точки зрения обеспечения благоприятного протекания рабочих процессов и режимов энергоемкости транспортной работы судна при одновременном сохранении или улучшении их на экономичном режиме, то есть оптимального энергоиспользования, необходимо проведение объемного расчетного эксперимента с использованием методов математического планирования.

Список литературы

1. Стародомский М. В. Оптимизация температурного состояния дизельных двигателей / М. В. Стародомский, Г. А. Максимов. — Киев: Наук. думка, 1987. — 168 с.
2. Даниловский А. Г. Оптимизация судового пропульсивного комплекса: моногр. / А. Г. Даниловский, М. А. Орлов, И. А. Боровикова. — СПб.: СПбГМТУ, 2008. — 173 с.

УДК 621.311.1

И. М. Данцевич,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. Б. Каракаев,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. В. Луканин,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ, СХЕМ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУДОВЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ
РАЗРЫВОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**

**CONTROLLABILITY ENSURING OF ELECTRICAL GRIDS, SCHEMES
AND EQUIPMENT OF SHIP ELECTRICAL POWER SYSTEMS
ON BASIS OF UNDER-CONTROL BREAKINGS OF FUNCTIONAL SIGNALS**

В статье рассмотрены вопросы представления судовой электроэнергетической системы и ее элементов с помощью граф-моделей и матриц смежности, описан алгоритм формирования матрицы управления разрывов дуги при контроле работоспособности и поиске дефектов.

In the article there are considered questions of ship electrical power system and its elements presentation by graph-models and complexity matrixes, there is described an algorithm of arc breakings matrix forming at operability control and defects searching.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, электрооборудование, контролепригодность, управляемый функциональный разрыв, управляемый разрыв дуги.

Key words: ship electrical power system, electrical equipment, controllability, functional undercontrolled breaking, undercontrolled arc breaking.

СУДОВУЮ электроэнергетическую систему (СЭЭС) как объект контроля правильности функционирования и оценки уровня работоспособности удобно формализованно представлять графом G с одним входом и одним выходом (многовходовые графы приводятся к одновходовым добавлением фиктивных вершин) [1, с. 67–70; 2, с. 58–61; 3, с. 63–67].

Поскольку СЭЭС относится к объектам непрерывного действия с переменной структурой, то такая система содержит в своем составе коммутирующие элементы (клемные платы, разъемы, автоматические и неавтоматические выключатели и т. п.). Такие элементы разрешают или запрещают поток электрической мощности или тестовых сигналов по той или иной электрической коммуникации. В этом случае их можно рассматривать как управляемые функциональные разрывы (УФР) в структуре системы. В граф-модели такие элементы не нужно включать в состав вершин графа, а целесообразно рассматривать их как специальный управляемый разрыв дуги (УРД) граф-модели.

УРД изображается в граф-модели в виде элемента C с дополнительным внешним входом $\tilde{x}_i$ для управления коммутирующим элементом (КЭ). Входом в КЭ (рис. 1) является сигнал x_i , а выходом — логическая функция f_i : если $\tilde{x}_i = 1$ и $x_i = 1$, то КЭ разрешает поток сигналов через КЭ к вершине, в которую входят выход КЭ f_i . Если $\tilde{x}_i = 0$ (управляющий дополнительный сигнал запрещает поток сигналов через КЭ), то и при $x_i = 0$ и при $x_i = 1$ на выходе КЭ $f_i = 0$. Очевидно, если $x_i = 0$ (нет выхода в КЭ), а $\tilde{x}_i = 1$, то все равно $f_i = 0$. Таким образом, введение понятия УРД соответствует

назначению некоторой функциональной проверки схемы, когда блокируется дуга u_k , на вход подается функциональный (тестовый) сигнал, а на выходе последовательности вершин снимается выходной сигнал. В этом случае такую последовательность удобно представить в виде n -мерного вектора $b(u_k) = (b_1, \dots, b_k)$, в котором компонента $b_i = 1$, если при удалении (блокировании) дуги u_k сигнал от входа к выходу проходит через вершину с номером i . В противном случае $b_i = 0$. Все вершины графа G можно разбить относительно дуги $u = (i, j)$ на два подмножества.

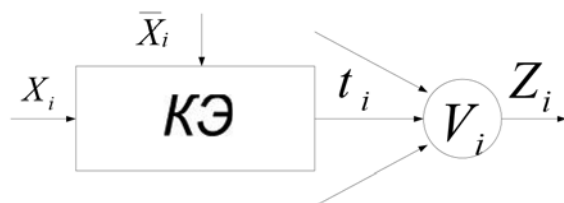


Рис. 1. Структурная схема управляемого разрыва дуги

Подмножество $U_0 = \{u_j = (t, j) | id(j) = 1\}$ и подмножество $U_1 = \{u_j = (t, j) | od(i) = 1\}$. Очевидно в $U_0 \cap U_1 = \Phi$ удобно обозначить все дуги $u_j \in U_0$ как u_j^0 , а $u_i \in U_1$ как u_i^1 .

Если известно априори некоторое множество управляемых разрывов $W = \{W_1, \dots, W_L\}$ и для всех его элементов построены векторы управляемых разрывов $\tilde{b} = (W_i) (i = 1, L)$, то можно построить матрицу управляемых разрывов $B_W = \|b_{ij}\| (i = 1, \bar{L}; j = 1, \bar{n})$, строкам которой будут

соответствовать векторы управляемых разрывов, а столбцам — вершины графа G .

Матрицу УРД удобно формировать с помощью матрицы смежностей C исходного графа G с помощью алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 2.

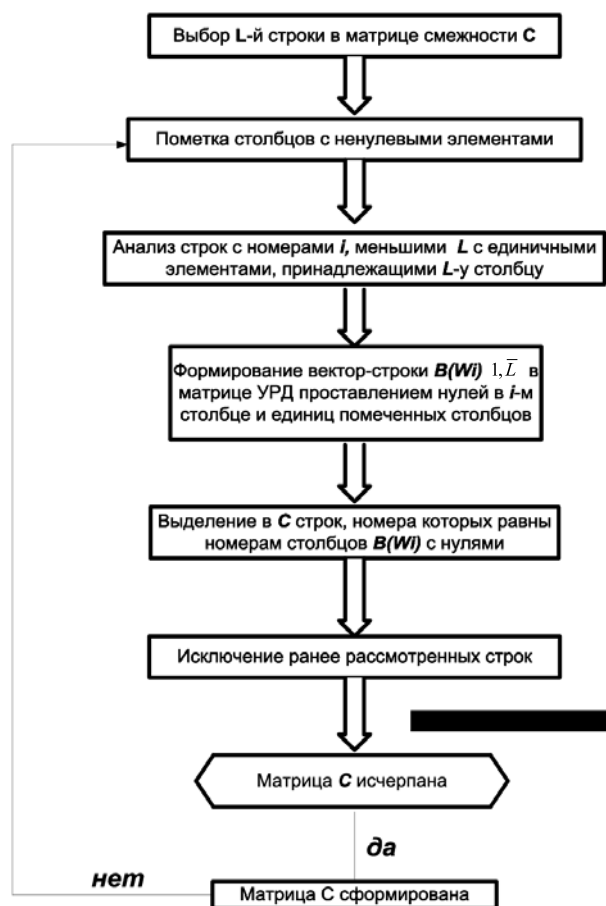


Рис. 2. Схема алгоритма формирования матрицы управляемых разрывов дуги при контроле работоспособности и поиске дефекта

Если все столбцы в матрице УРД различны, то это означает, что структура объекта такова, что все одиночные дефекты будут различимы. Следует сразу отметить, что кратные дефекты с помощью УРД выявить практически невозможно ввиду многообразия возможных векторов матрицы УРД. Если обнаруживается некоторый класс эквивалентности одиночных дефектов на анализируемой граф-модели $d\{\{\mu\}, \{\nu\}\}$ на заданном множестве управляемых разрывов W , то, чтобы разбить этот класс на два одноэлементных, нужно добавить к множеству W хотя бы один управляемый разрыв ω такой, чтобы в его векторе $\tilde{b} = (W)$ компоненты $\tilde{b}_\mu$ и $\tilde{b}_\nu$ были различны. Таким образом, применение УРД позволяет повысить различимость одиночных дефектов и, следовательно, уровень контролепригодности (КП) электрических схем, сетей и ЭСК в целом.

Рассмотрим некоторые теоретические положения, определяющие эффективность применения управляемых разрывов при анализе и синтезе уровня КП ЭСК.

Поскольку, как было отмечено выше, применение коммутирующего элемента, изменение его состояния представляет собой по существу назначение какой-то проверки, то аналогично процедуре построения матрицы проверок на множестве точек контроля можно построить матрицу управляемых разрывов.

Действительно, если задать множество $W = \{W_1, \dots, W_L\}$ управляемых разрывов и для всех его элементов получить векторы управляемых разрывов $\tilde{b} = (W_i)(i = 1, \bar{L})$, то матрица $B_W = \|b_{ij}\|(i = 1, \bar{L})(j = 1, \bar{n})$, в которой ее строкам соответствуют векторы всех управляемых разрывов множества W , а столбцам — вершины графа G (при условии, что если вершина входит в вектор $\tilde{b}(u_i)$, то $\tilde{b}_{ij} = 1$, в противном случае $b_{ij} = 0$), будет представлять собой матрицу управляемых разрывов. Такую матрицу B_W удобно формировать с помощью матрицы смежностей C графа G . Каждая строка $b = (W_i)(i = 1, \bar{L})$ матрицы B_W строится построчным заполнением ее по матрице смежностей C исходного графа G следующим образом.

Шаг 1. В матрице C исходного графа G выбирается i -я строка и помечаются в ней столбцы, содержащие ненулевые элементы, а затем запоминаются строки с номерами, меньшими i и содержащими по одной единице в i -м столбце.

Шаг 2. В вектор-строке $b = (W_i)(i = 1, \bar{L})$ матрицы B_W проставляются нули в i -м столбце и тех столбцах, которые соответствуют выделенным строкам и столбцам, содержащим по одной единице.

Шаг 3. В матрице смежности исходного графа G выделяются строки, номера которых соответствуют номерам столбцов вектор-строки $b = (W_i)$, где проставлены нули и повторяются шаги 1 и 2 для каждой строки, исключая рассмотренные ранее строки.

Процедура продолжается до тех пор, пока существует возможность выделения строк и столбцов согласно шагу 1. Рассмотрим в качестве примера процедуру построения матрицы управляемых разрывов для модели на рис. 3.

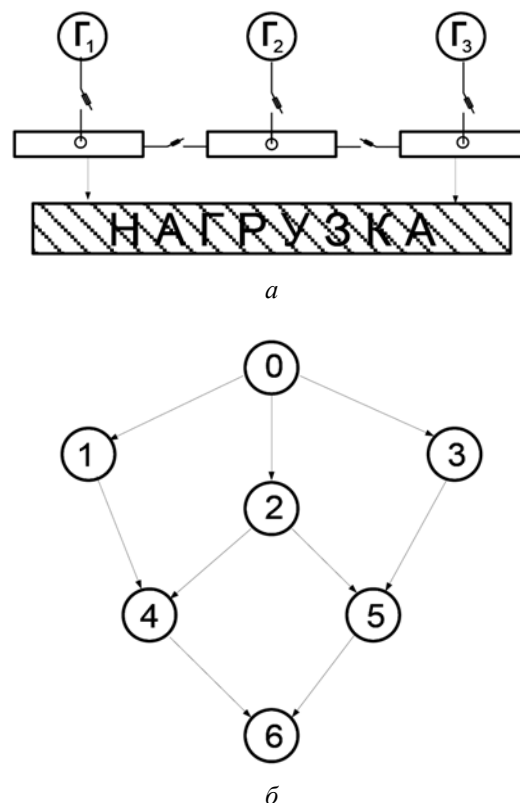


Рис. 3. Структурная схема электростанции, включающая два генераторных агрегата с распределительными секциями ГРЩ (Г1, Г3), и генераторного агрегата с генераторным щитом, коммутированным с секциями ГРЩ (а); граф-модель электростанции (б),

где 1, 3 — вершины, соответствующие генераторным агрегатам Г1, Г3 с генераторными автоматами; 2 — вершина, соответствующая генераторному агрегату Г2 с генераторным автоматом и щитом, находящимся в другом от электростанции помещении

Матрица смежностей для такого графа имеет вид:

$$B_W =$$

	0	1	2	3	4	5	0'
0		1	1	1			
1					1		
2					1	1	
3						1	
4							1
5							1
0'							

Матрица управляемых разрывов, построенная по рассмотренному алгоритму будет иметь вид:

	0	1	2	3	4	5	0'
u_1^0	1		1	1	1	1	1
u_2^0	1	1		1	1	1	1
u_3^0	1	1	1		1	1	1
u_4^0	1		1	1		1	1
u_5^0	1	1	1		1		1

При анализе дополнительного вектор-столбца с результатами проверки по соответствующим строкам матрица B_W позволяет обнаружить совпадение результатов функциональной проверки, если совпадают результирующие столбцы матрицы B_W . Это свидетельствует о наличии эквивалентных дефектов. Если обнаруживаются такие дефекты, неразличимые на множестве управляемых разрывов, то для обеспечения различимости любого одиночного дефекта необходимо дополнить множество W управляемых разрывов так, чтобы были разбиты все классы эквивалентности на одноэлементные множества, когда все столбцы в матрице будут различимыми.

Рассмотрим основные принципы выбора дополнительных управляемых разрывов для обеспечения различимости одиночных дефектов в СЭЭС.

В графе G в множестве дуг U всегда можно выделить подмножество дуг $U_0 = \{u_j = (t, j) | id(j) = 1\}$, которые одновременно могут входить в одну вершину. Аналогично можно выделить подмножество дуг U_1 , которые только по одной входят в вершины графа: $u_i = \{u_i = (i, j) | od(i) = 1\}$. Очевидно, можно утверждать, что $U_0 \cap U_1 = \Phi$, а в случае выполнения для дуги $u(i, j)$ условия $id(j) = od(i) = 1$ считать, что $u \in U_0$, и обозначить $u_j \in U_0$ как u_j , а для $u_i \in U_1$ как u_i^1 . Если в графе G

для вершины j ($j = 1, \bar{n}$) выполняется условие $id(j) = od(j) = 1$, векторы управляемых разрывов дуг u_j^0 и u_j^1 совпадают. Поскольку управляемые разрывы дуги из множества $V[(U_0 \cap U_1)]$ ничего не дают для различимости дефектов, то целесообразно такое множество дуг не рассматривать, а из равносильных управляемых разрывов u_j^0 и u_j^1 использовать только u_j^0 , так как для дуги $u \in U(U_0 \cup U_1)$ все компоненты вектора управляемого разрыва этой дуги равны единице. Дополнительные управляемые разрывы назначаются для обеспечения обнаружения любого одиночного дефекта на основании следующих рассуждений.

Поскольку речь идет о некотором классе эквивалентности одиночных дефектов вида $d\{\mu\}, \{v\}$ и необходимости разбиения его на два одноэлементных, то, очевидно, необходимо и достаточно добавить к множеству W хотя бы один дополнительный управляемый разрыв ω такой, чтобы в векторе $\tilde{b} = (W) = \tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_n$ компоненты $\tilde{b}_\mu$ и $\tilde{b}_v$ были различны.

Действительно, всякое двухэлементное множество содержит два совпадающих между собой столбца в матрице B_W . Если такое множество разбить на два одноэлементных, то невозможно без появления дополнительного управляемого разрыва обеспечить в матрице B_W различие столбцов с номерами μ и v .

Очевидно, что в этом случае для дополнительного разрыва дуги вектор $\tilde{b} = (W) = \tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_n$ будет содержать только один элемент множества. Таким образом, введение дополнительного управляемого разрыва дуги является необходимым условием.

Однако следует иметь в виду, что различимость дефектов на множестве только управляемых разрывов возможна только с точностью до определенных Q -множеств неразличимых дефектов. Поскольку любой управляемый разрыв дуги $u \in U(U_0 \cup U_1)$ для различимости дефектов ничего не дает, то двухэлементный класс эквивалентности $d\{\mu\}, \{v\}$ на множестве $W = U_0 \cup U_1$ графа G нельзя разбить ни на каком множестве управляемых разрывов.

Таким образом, если в графе G обнаруживаются Q -множества неразличимых дефектов по управляемым разрывам, то такой граф G можно назвать Q -различимым.

Тогда процедура выявления всех классов эквивалентных дефектов на исходном множестве W управляемых разрывов с помощью матрицы B_{W_0} и декомпозиции на систему двухэлементных множеств будет основываться на решении следующей задачи.

Для каждого двухэлементного множества d необходимо построить множество X управляемых разрывов, некоторые элементы которых разбивают еще на два одноэлементных.

Последовательность шагов процедуры будет состоять в следующем.

Шаг 1. В матрице $B_{U_0 \cup U_1}$ сравнивают столбцы с номерами μ и v и выявляют строки, на которых столбцы с номерами μ, v матрицы B_{W_0} различны и определяют элементы X -множества, соответствующего множеству d .

Шаг 2. С помощью действий шага 1 для всех двухэлементных множеств строится система X -множеств $\{x_i\} (i = 1, \bar{k})$.

Шаг 3. Определяется минимальное покрытие системы множеств $\{x_i\} (i = 1, \bar{k})$ и множество дополнительных управляемых разрывов, которые обеспечивают различимость одиночных дефектов с точностью до Q -множеств.

В качестве множества W_0 можно взять множество U_0 управляемых разрывов, так как при этом суммарное множество $W_0 \cup \tilde{W}$ будет минимальным.

Для рассмотрения особенностей процедуры выбора дополнительных разрывов дуг для различимости одиночных дефектов рассмотрим демонстрационный пример решения такой задачи для графа G_1 (см. рис. 4).

Матрица управляемых разрывов, построенная на множестве $U_0 \cup U_1$, имеет вид:

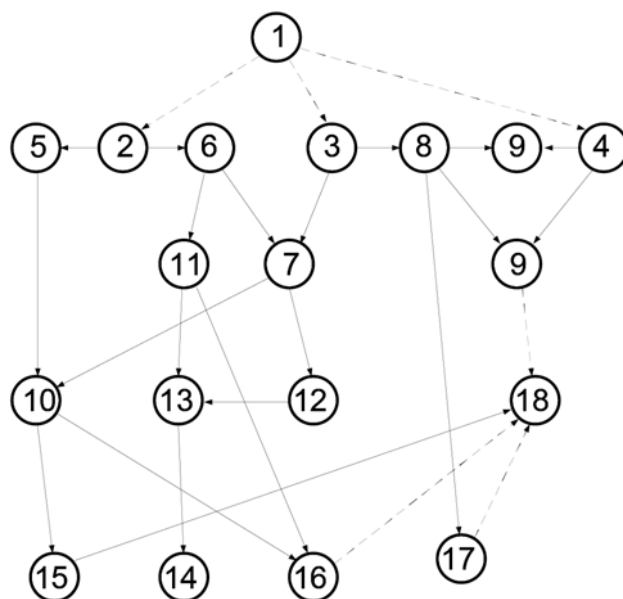


Рис. 4. Граф-модель электростанции с тремя генераторами (2–4), системой генерирования (5, 6, 8), АПС (7, 9), АПП (10, 13) и потребителями ЭЭ

$$B_{U_0 \cup U_1} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
u_2^0	1		1	1			1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
u_3^0	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_4^0	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_5^0	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_6^0	1	1	Г	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
u_8^0	1	1	1	1	1		1		Г	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_{12}^0	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1
u_{14}^0	1	1	1	1	1	1	1	1	Г	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_9^1	1	1	Г	1	1	1	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1
u_{15}^1	1	1	Г	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1
u_{16}^1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1
u_{17}^1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1

Нетрудно выделить с помощью матрицы Q -множества из совпадающих столбцов $\{2, 10\}$ и $\{7, 13\}$, то есть поиск дефектов возможен с точностью до Q -множеств. Поскольку 1 и 18 — фиктивные вершины, то столбцы $\{1, 18\}$ не рассматриваются. С учетом того, что в качестве исходного множества управляемых разрывов можно рассматривать $u_2^0, u_3^0, u_4^0, u_{15}^1, u_{16}^1, u_{17}^1$, матрица управляемых разрывов примет вид:

$$\tilde{B} =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
u_2^0	1		1	1			1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
u_3^0	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_4^0	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_{15}^1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1
u_{16}^1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1
u_{17}^1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1

Анализ матрицы показывает, что имеются следующие совпадающие $\{2, 5, 6, 10\}$, $\{3, 8\}$, $\{7, 9, 11, 12, 13, 14\}$. Из них можно построить двухэлементные множества (кроме $\{2, 10\}$ и $\{7, 13\}$, поскольку они не обеспечивают различимость дефектов управляемыми разрывами сигналов): $\{5, 6\}$, $\{5, 10\}$, $\{6, 10\}$, $\{3, 8\}$, $\{7, 9\}$, $\{7, 11\}$, $\{7, 12\}$, $\{7, 14\}$, $\{9, 11\}$, $\{9, 12\}$, $\{9, 13\}$, $\{9, 14\}$, $\{11, 12\}$, $\{11, 13\}$, $\{11, 14\}$, $\{12, 13\}$, $\{12, 14\}$, $\{13, 13\}$.

Анализ этих двухэлементных множеств позволяет построить матрицу ε :

$\varepsilon^* =$

	u_5^0	u_6^0	u_8^0	u_9^1	u_{12}^0	u_{14}^0
$\{2, 5\}$	1					
$\{2, 6\}$		1				
$\{5, 6\}$	1	1				
$\{5, 10\}$	1					
$\{6, 10\}$		1				
$\{3, 8\}$			1			
$\{7, 9\}$				1		
$\{7, 11\}$		1				
$\{7, 12\}$					1	
$\{7, 14\}$						1
$\{9, 11\}$		1		1		
$\{9, 12\}$				1	1	
$\{9, 13\}$				1		
$\{9, 14\}$				1		1
$\{11, 12\}$		1			1	
$\{11, 14\}$		1				1
$\{12, 13\}$		1			1	
$\{12, 14\}$					1	1
$\{13, 14\}$						1

Управляемые разрывы $u_5^0, u_6^0, u_8^0, u_9^1, u_{12}^0$ и u_{14}^0 образуют минимальное покрытие, то есть они образуют множество необходимых дополнительных управляемых разрывов. Таким образом, для обеспечения различимости одиночных разрывов с точностью до Q -множеств необходима расширенная матрица управляемых разрывов, включающая $u_2^0, u_3^0, u_4^0, u_5^0, u_6^0, u_8^0, u_{12}^0, u_{14}^0, u_9^1, u_{15}^1, u_{16}^1, u_{17}^1$. Нетрудно заметить, что такая расширенная матрица совпадает с матрицей $B_{U_0 \cup U_1}$. Значит, в данном случае для обеспечения различимости с точностью до Q -множеств необходимы все управляемые разрывы, построенные на множестве $U_0 \cup U_1$.

Как следует из рассмотренных выше теоретических положений, применение метода управляемых разрывов дуг не всегда обеспечивает различимость одиночных дефектов. С другой стороны, в большинстве практических случаев число дополнительных точек контроля ограничивается некоторой постоянной r ($r \geq 0$ — целое число). В связи с этим обеспечение различимости дефектов комплексным совместным использованием точек контроля и управляемых разрывов сигналов в большинстве случаев оказывается более эффективным, чем использование одного из рассмотренных методов. В этом случае задача может быть сформулирована следующим образом.

Известно исходное множество y_0 точек контроля, построенное в соответствии с назначением и конструктивными особенностями объекта контроля, причем число дополнительных точек контроля, которое может быть введено для различимости дефектов, ограничено постоянной r ($r \geq 0$ — целое число).

Необходимо первоначально выбрать множество дополнительных точек контроля в количестве r , а затем дополнить его (в случае необходимости) минимальным множеством управляемых разрывов так, чтобы обеспечить максимальное число различимых дефектов.

Решение задачи можно представить в виде последовательности следующих этапов.

Этап 1. По матрице управляемых разрывов $B_{U_0 \cup U_1}$ определяются все существующие в графе Q -множества, образующие классы эквивалентных дефектов.

Этап 2. Q -множества разбиваются на двухэлементные множества эквивалентных дефектов и для них строится матрица типа ε .

Этап 3. Отыскивается минимальное покрытие матрицы ε . Если минимальное покрытие матрицы ε содержит более чем r элементов, то делается вывод, что различимости дефектов достичь невозможно ни при каком выборе управляемых разрывов, поскольку в этом случае в матрице $B_{U_0 \cup U_1}$ останутся множества совпадающих между собой столбцов, а следовательно, будут существовать классы неразличимых эквивалентных дефектов.

Если существует минимальное покрытие матрицы ε , содержащее не более r элементов, то это покрытие, дополненное до r , определяет искомое число точек контроля. Для этого выполняются следующие процедуры:

1) на множестве внешних входов и выходов строится матрица проверок B_{y_0} , по которой определяются классы эквивалентных дефектов;

2) обнаруженные классы эквивалентных дефектов разбиваются на двухэлементные множества и строится матрица $\tilde{\varepsilon}$;

3) формируется матрица $\tilde{\varepsilon}$ в результате следующих действий:

— в матрице $\tilde{\varepsilon}$ вычеркиваются номера столбцов, которые вошли в минимальное покрытие матрицы ε ;

— в матрице $\tilde{\varepsilon}$ вычеркиваются строки, содержащие ненулевые элементы в выделенных и вычеркнутых столбцах;

— осуществляется выбор строки, содержащей ненулевые элементы в выделенных и вычеркнутых столбцах, в результате чего образуется матрица $\tilde{\tilde{\varepsilon}}$;

4) осуществляется выбор контрольных точек в результате выполнения следующих операций над матрицей $\tilde{\tilde{\varepsilon}}$.

— в матрице $\tilde{\epsilon}$ выделяется столбец, содержащий максимальное число ненулевых элементов: номер этого столбца указывает на номер выбранной точки контроля;

— выделенный столбец исключается из матрицы $\tilde{\epsilon}$, отыскиваются строки, содержащие ненулевые элементы в исключенном столбце, и также исключаются из матрицы $\tilde{\epsilon}$;

— в оставшейся части матрицы снова находится столбец с максимальным числом ненулевых элементов, по его номеру назначается очередная точка контроля, а затем отыскиваются столбцы по предыдущему правилу строки и исключаются из матрицы.

Процедура продолжается до тех пор, пока минимальное покрытие матрицы ϵ не будет достигнуто до r элементов.

Если не удастся рассмотренной выше процедурой на матрице $\tilde{\epsilon}$ достичь числа r , то эту процедуру выполняют над матрицей $\tilde{\epsilon}$. В том случае когда не обнаруживаются Q -множества, в качестве такого множества следует взять множество из r элементов, которое назначается по матрице $\tilde{\epsilon}$ с помощью реализации над ней рассмотренной выше процедуры.

После выбора контрольных точек назначается минимальное множество управляемых разрывов. Для этого строится матрица проверок B' на множестве неактивных входов и выходов и выбранных точек контроля. Затем по матрице B' формируются классы эквивалентных дефектов и преобразуются в систему двухэлементных множеств неразличимых объектов. В дальнейшем разбиение двухэлементных множеств неразличимых дефектов на одноразличимые (одноэлементные) осуществляется за счет назначения минимального множества управляемых разрывов по ранее изложенной методике.

Комплексность рассмотренного подхода к совместному использованию методов выбора контрольных точек и управляемых разрывов дуг состоит в том, что разработанная методика обеспечивает решение не только задач дополнения множества точек контроля минимальным множеством управляемых разрывов, но и решение таких задач, как:

— дополнение заданного числа точек контроля и управляемых разрывов минимальным множеством точек контроля;

— дополнение заданного числа управляемых разрывов минимальным множеством точек контроля.

Следует иметь в виду, что при решении указанных задач не всегда удастся на выбранном множестве точек контроля и управляемых разрывов достичь одноразличимости дефектов.

В общем случае при комплексном использовании методов выбора контрольных точек и управляемых разрывов поиск дефектов осуществляется по объединенной матрице проверок выбранных точек контроля и управляемых разрывов, соответствующей объединению множества точек контроля и множества управляемых разрывов, дополненной столбцом с результатами произведенных проверок (результат проверки равен единице, если снимаемый сигнал находится в области допустимых значений, и нулю в противном случае).

Логическое произведение всех строк, имеющих нуль в дополнительном столбце, и инверсий всех строк, имеющих единицу в том же дополнительном столбце, образует вектор σ , ненулевые компоненты которого и определяют дефект в объекте с принятой степенью различимости.

Выводы

Анализ конструктивных особенностей судового электрооборудования и процессов его функционирования позволяет сделать вывод о том, что для оценки и анализа КП целесообразно комплексное использование методов выбора рациональной системы контрольных точек и управляемых разрывов электрических коммуникаций для обеспечения высокого уровня различимости дефектов произвольной кратности.

Список литературы

1. Каракаев А. Б. Проблемы исследования электрокоммуникаций и обеспечение устойчивости кораблей и судов к авариям / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. науч. ст. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2011. — № 2 (64).
2. Каракаев А. Б. Сущность понятия коммутационной контролепригодности судовых сетей электрооборудования судов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. науч. ст. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2012. — № 1 (67).
3. Каракаев А. Б. Основные методические вопросы анализа и синтеза контролепригодности систем сложной конструктивно-технической и организационной структуры на примере СЭЭС и ее элементов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. науч. ст. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2013. — № 2 (72).

УДК 629.12.066

В. М. Приходько,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

И. В. Приходько,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИ СУШКЕ СУДОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

MATHEMATICAL MODEL OF SHIP INDUCTION MOTORS DRYING BY ENERGY SAVING TECHNOLOGY

Предложено аналитическое определение параметров управляемого токового безразборного контрольного прогрева изоляции судовых асинхронных двигателей по разработанной структурной схеме с реализацией на ПЭВМ.

An analytical determination of parameters of the controlled current to control insulation heating of marine induction motors developed for the implementation of the block diagram on the PC is offered.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, тиристорные преобразователи, тепловая схема замещения, температура, нагрев, обмотки статора, система дифференциальных уравнений.

Key words: induction motors, thyristor converters thermal equivalent circuit, temperature, heating of the stator winding, the system of differential equations.

В СООТВЕТСТВИИ с Федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ, а также с постановлением правительства Санкт-Петербурга «О повышении энергетической эффективности и энергосбережении» № 1257 от 11 ноября 2009 г. разработка эффективных методов, средств контрольного прогрева, подсушки, сушки, восстановления изоляционных систем, диагностики и интенсификации комплексных испытаний электрооборудования судов по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте является для морского и речного флота актуальной проблемой, требующей специальных исследований.

Разработаны портативные универсальные тиристорные преобразователи с перестраиваемыми структурами силовых вентильных модулей для обеспечения ресурсосбережения, снижения затрат энергии, повышения эффективности, интенсификации и оптимизации технологических режимов процесса контрольного прогрева, подсушки, сушки, восстановления сопротивления изоляции увлажненных обмоток судового электрооборудования после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте [1, с. 282–298; 2, с. 44–45; 3, с. 17–24]. Для судостроения и судоремонта рекомендован инновационный способ безразборной сушки увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей (АД) электрическим током, управляемым энергосберегающими универсальными портативными тиристорными преобразователями с перестраиваемыми структурами силовых вентильных модулей [4; 5].

На основании проведенных исследований предложен новый способ пропитки обмоток судовых АД при одновременном нагреве пропитанных обмоток электрическим током, управляемым универсальными тиристорными преобразователями, и разработана инновационная технология пропитки–сушки статорных обмоток ремонтируемых АД в электроцехах судостроительно-судоремонтных предприятий [6, с. 1–11].

В электроцехах судостроительно-судоремонтных предприятий и на судах речного, морского, рыбопромыслового флотов в судовых эксплуатационных условиях качество перемотки статорных обмоток в технологическом процессе ремонта асинхронных двигателей можно оценить при нагреве неподвижных электродвигателей, когда в обмотки статоров подается постоянный ток, управляемый с помощью портативных универсальных тиристорных преобразователей [7, с. 30–35; 8, с. 14–19; 9, с. 13–15].

В этом случае можно просто, доступно, экономно, без дополнительных трудозатрат осуществить технологический процесс нагрева статорных обмоток АД и легко измерить температуру их в зависимости от времени.

Идентичность этого процесса нагрева по всем трем обмоткам статора, а также характер этого процесса позволит оценить качество пропитки статорных обмоток и межсекционных соединений, равенство витков обмоток каждой из фаз. Переходный тепловой режим АД можно описать системой дифференциальных уравнений, которые учитывают тепловые связи между частями АД, теплоемкости этих тел и потери в них, в том числе в режимах прогрева, подсушки и сушки [10].

Для судовых АД эта система дифференциальных уравнений соответствует тепловой схеме замещения (рис. 1) и имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} C_1 + (\theta_1 - \theta_2) a_{12} + (\theta_1 - \theta_3) a_{13} + (\theta_1 - \theta_6) a_{16} &= P_1; \\ \frac{d\theta_2}{dt} C_2 + (\theta_2 - \theta_1) a_{12} + (\theta_2 - \theta_5) a_{25} &= P_2; \\ \frac{d\theta_3}{dt} C_3 + (\theta_3 - \theta_1) a_{13} + (\theta_3 - \theta_4) a_{34} &= P_3; \\ \frac{d\theta_4}{dt} C_4 + (\theta_4 - \theta_3) a_{34} + (\theta_4 - \theta_5) a_{45} &= P_4; \\ \frac{d\theta_5}{dt} C_5 + (\theta_5 - \theta_2) a_{25} + (\theta_5 - \theta_4) a_{45} + (\theta_5 - \theta_6) a_{56} &= 0; \\ \frac{d\theta_6}{dt} C_6 + (\theta_6 - \theta_5) a_{56} + \theta_6 a_{60} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

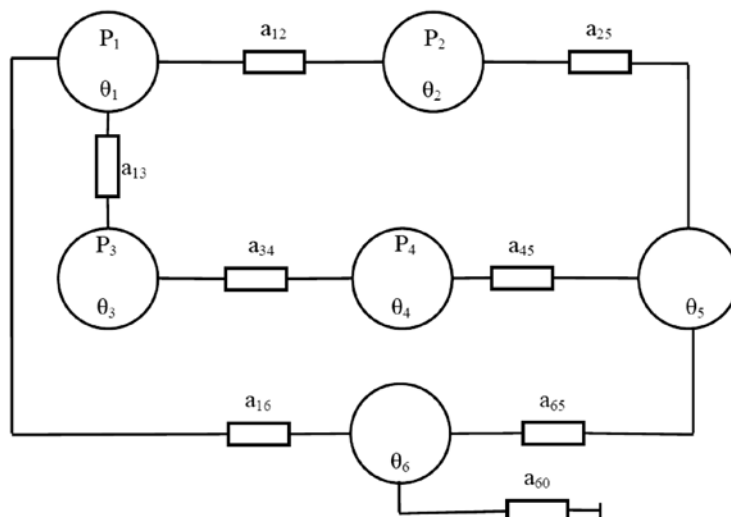


Рис. 1. Тепловая схема замещения судового асинхронного двигателя

В системе дифференциальных уравнений и на тепловой схеме замещения судового асинхронного двигателя:

- C_n — теплоемкости тел, Вт·с/град;
- a_{nk} — теплопроводности между телами, Вт/град;
- θ_n — превышение температуры тел, °К;
- P_n — мощность потерь в телах, Вт;
- 1 — магнитопровод статора;
- 2 — магнитопровод и обмотка статора;
- 3 — пазная часть обмотки статора;
- 4 — лобовая часть обмотки статора;
- 5 — внутренняя полость воздуха АД;
- 6 — корпус судового АД.

Решение системы дифференциальных уравнений с расчетом теплопроводностей, теплоемкостей и потерь в частях АД производится на ПЭВМ численным методом Эйлера.

Конечно-разностная система уравнений при расчете теплового процесса имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1n} &= \theta_{1,n-1} + \frac{1}{C_1} (P_1 - \theta_1 A_{11} - \theta_2 A_{12} - \theta_3 A_{13} - \theta_6 A_{16}) \cdot h; \\ &\vdots \\ \theta_{kn} &= \theta_{k,n-1} + \frac{h}{C_k} (P_k - \sum_i \theta_{i,n-1} A_{ki}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где h — шаг вычислений, с; A_{ki} — элементы матрицы коэффициентов при θ .

Величина шага по времени зависит от постоянных времени процесса, и его значение должно быть меньше самой малой постоянной времени системы. Оптимальное значение шага определяется опытным путем с учетом целесообразного упрощения системы уравнений (1), а также корректировкой по экспериментальным данным.

Следует отметить, что при нагреве постоянным по величине током необходимо учитывать изменение сопротивлений статорных обмоток. Это уточнение выполняется с помощью уравнений для обмоток статора:

$$\left. \begin{aligned} P_{3(k)} &= P_{3(0)} \left(1 + \frac{\theta_{3k}}{235 + t_{\text{окр}}} \right); \\ P_{4(k)} &= P_{4(0)} \left(1 + \frac{\theta_{4k}}{235 + t_{\text{окр}}} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $t_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды; θ_k — превышение температуры на k -м шаге.

На рис. 2 и 3 даны экспериментальные и расчетные по (1) данные для АД типа 4АХ90Л4У3 номинальной мощностью, равной 2,2 кВт. Экспериментальные и расчетные данные с достаточной точностью совпадают. Однако необходима дальнейшая корректировка методики расчета с учетом экспериментальных данных, так как тепловые связи между статорной обмоткой и пакетом частей статора зависят от качества пропитки обмоток, которая может быть разной. Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования, чтобы уточнить достоверность характера процесса нагрева исправной обмотки.

При рассмотрении только качественной стороны теплового процесса в АД целесообразно упростить систему уравнений (1) таким образом, чтобы получить ее аналитическое решение.

Такое относительно простое решение получается, если рассматривать систему двух тел — обмотки статора и корпуса с магнитопроводом статора — с учетом теплоотдачи от корпуса и лобовых частей обмотки статора в окружающую среду.

Система дифференциальных уравнений для этого случая имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} C_1 + (\theta_1 - \theta_2) a_{12} + \theta_1 a_{10} &= P_1; \\ \frac{d\theta_2}{dt} C_2 + (\theta_2 - \theta_1) a_{12} + \theta_2 a_{20} &= P_2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где 1 — обмотка статора; 2 — магнитопровод и корпус статора; a_{10} , a_{20} — теплоотдача в окружающую среду от лобовых частей обмотки статора и корпуса, Вт/град.

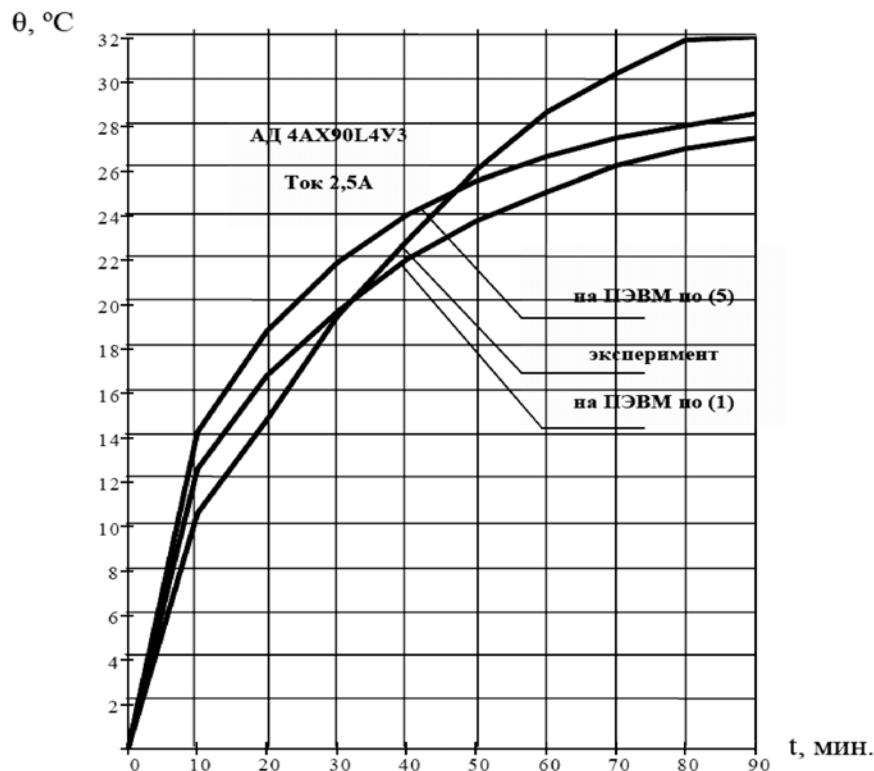


Рис. 2. Нагрев обмоток судового асинхронного двигателя постоянным током, регулируемым тиристорным преобразователем

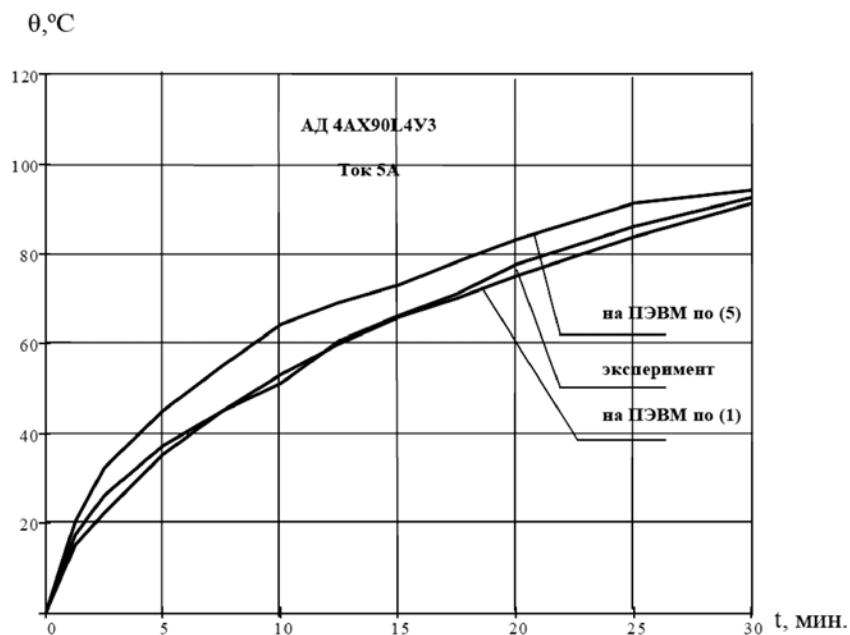


Рис. 3. Нагрев обмоток судового асинхронного двигателя постоянным током, регулируемым тиристорным преобразователем

Решение системы (4) следующее:

$$\theta_{1\text{уст}} = \frac{P_1(a_{20} + a_{12})}{a_{10}a_{20} + a_{10}a_{12} + a_{20}a_{12}}, \text{ К};$$

$$\theta_{2\text{уст}} = \frac{P_1}{a_{20}} - \theta_{1\text{уст}} \frac{a_{10}}{a_{20}}, \text{ К};$$

$$T_1 \approx \frac{C_1}{a_{10} + a_{12}}, \text{ с};$$

$$T_2 \approx \frac{C_1(a_{10} + a_{12})}{a_{10}a_{20} + a_{10}a_{12} + a_{20}a_{12}}, \text{ с};$$

$$\theta_{11} = \frac{\frac{P_1}{C_1} T_1 T_2 - \theta_{2\text{уст}} T_2}{T_1 - T_2}, \text{ К}; \quad (5)$$

$$\theta_{21} = \frac{\frac{P_2}{C_1} T_1 T_2 - \theta_{2\text{уст}} T_2}{T_1 - T_2}, \text{ К};$$

$$\theta_{12} = \theta_{1\text{уст}} - \theta_{11}, \text{ К};$$

$$\theta_{22} = \theta_{2\text{уст}} - \theta_{21}, \text{ К};$$

$$\theta_1 = \theta_{11}(1 - e^{-t/T_2}) + \theta_{12}(1 - e^{-t/T_1}), \text{ К};$$

$$\theta_2 = \theta_{21}(1 - e^{-t/T_2}) + \theta_{22}(1 - e^{-t/T_1}), \text{ К},$$

где T_1, T_2 — постоянные времени процесса, с; $\theta_{1уст}, \theta_{2уст}$ — установившиеся превышения температуры, К.

На рис. 2 и 3 показаны кривые нагрева обмоток статора судового асинхронного двигателя постоянным током, регулируемым тиристорным преобразователем, в сравнении с опытными и расчетными данными по (1) и (5), где видно, что точность расчетов по (5) для больших токов ниже. Однако выражение (5) после соответствующей корректировки по опытным данным может служить основой для управления процессом нагрева АД в режиме прогрева, подсушки, сушки с помощью микропроцессора с учетом допустимой погрешности.

Для обеспечения ресурсосбережения, снижения энергетических затрат, повышения эффективности, интенсификации и оптимизации технологических режимов процесса прогрева, подсушки, сушки, восстановления сопротивления изоляции увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте проведены исследования процессов внутреннего тепломассопереноса в увлажненной изоляционной системе при управляемом токовом нагреве статорных обмоток электродвигателей судового исполнения.

Теоретически обоснован и разработан инновационный энергосберегающий рациональный способ повышения эффективности и увеличения интенсивности токовой сушки изоляции отсыревших обмоток асинхронных двигателей при судоремонте на судостроительно-судоремонтных предприятиях.

В связи с тем, что за основу был принят способ сушки постоянным током, было проведено изучение электрических характеристик обмоток судовых асинхронных двигателей, получивших наибольшее распространение в отрасли водного транспорта.

На рис. 4 и 5 представлены экспериментальные характеристики нагрева обмоток статоров судовых асинхронных двигателей новой серии 4А номинальной мощностью 1,1 и 2,2 кВт, как в собранном виде, так и только одного статора, при пропускании через обмотки постоянного тока различного значения, управляемого тиристорным преобразователем переносного типа.

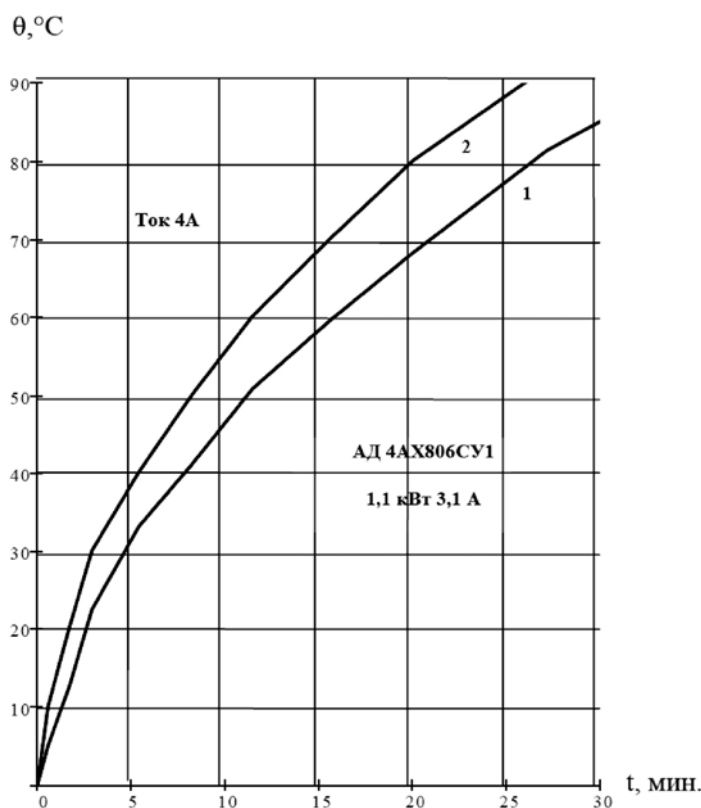


Рис. 4. Нагрев обмоток статора АД постоянным током, управляемым с помощью тиристорного преобразователя: 1 — АД в сборе; 2 — только статора АД

Получена серия графиков нагрева судовых асинхронных двигателей различной мощности токами, величина которых регулируется с помощью переносного тиристорного преобразователя.

При разработке способа и устройств ускоренной сушки изоляции увлажненных обмоток в процессе экспериментальных исследований решен ряд задач: определено температурное поле АД; определена предельно допустимая величина тока при форсированном режиме; определены величины напряжения, активной мощности, времени и расхода электрической энергии при сушке.

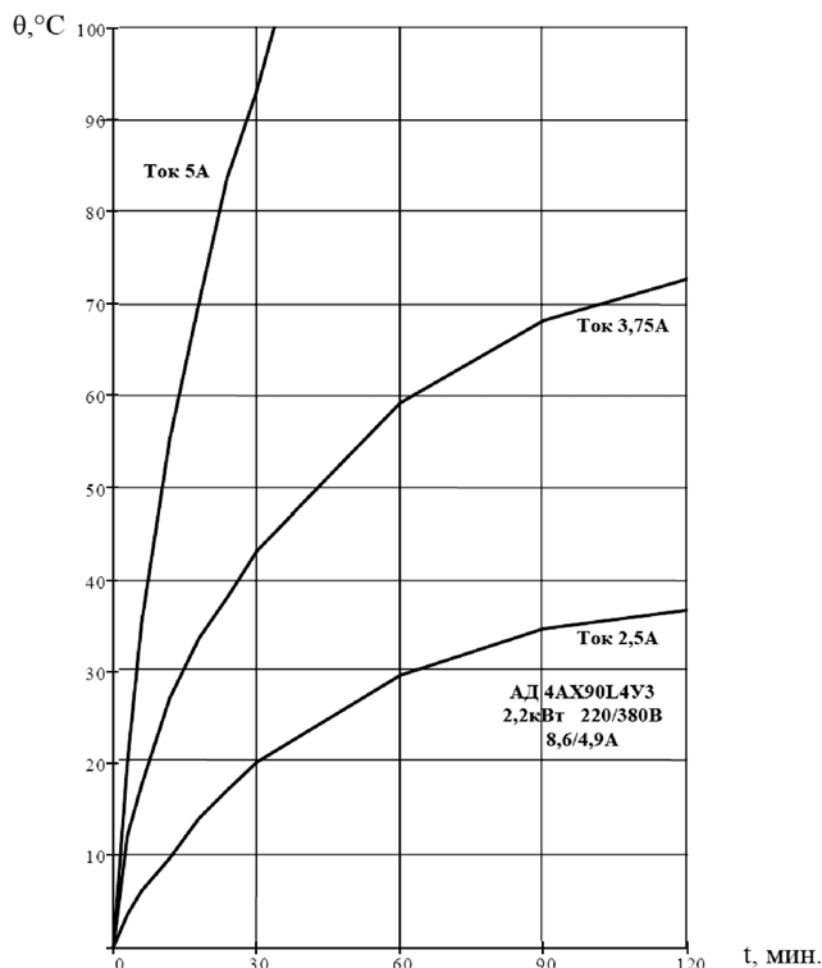


Рис. 5. Нагрев обмоток статора АД постоянным током, управляемым с помощью тиристорного преобразователя

Предложенное аналитическое определение параметров управляемого токового безразборного контрольного прогрева изоляции судовых АД по разработанной структурной схеме с реализацией на ПЭВМ соответствует наиболее оптимальному методу решения проблемы. Создан алгоритм и реализована на ПЭВМ рабочая программа, составленные на основе разработанной теплофизической модели, для исследования тепловых процессов в судовых АД при контрольном прогреве, подсушке, сушке и восстановлении сопротивления изоляции увлажненных обмоток статоров. Выбор оптимальных параметров безразборной управляемой токовой сушки изоляции увлажненных обмоток АД на штатном месте установки без демонтажа с судов речного и морского флота необходимо производить посредством расчетов на разработанной математической модели, реализованной в виде рабочей программы ПЭВМ, с учетом оценки величин токов и тепловыделений. Проведенные исследования также могут найти применение в отрасли водного транспорта для широкого круга задач по определению температуры твердых сред, находящихся в непосредственном тепловом контакте.

Список литературы

1. *Приходько В. М.* Портативный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В. М. Приходько // Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС: тр. II Междунар. науч.-техн. семинара, 27 сентября 2007 г. — СПб.: СПГУВК, 2008.
2. *Приходько В. М.* Энергосберегающий универсальный тиристорный преобразователь / В. М. Приходько // Судостроение. — 2000. — № 1.
3. *Приходько В. М.* Компактный универсальный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В. М. Приходько [и др.] // Наука и техника на речном транспорте. — 2001. — № 7.
4. *Приходько В. М.* Методы и технические средства комплексных испытаний элементов судовых электроэнергетических систем в судостроении и судоремонте: науч. моногр. / В. М. Приходько. — СПб.: ИПЦ СПГУВК, 2005. — 348 с.
5. *Приходько В. М.* Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: науч. моногр. / В. М. Приходько. — СПб.: СПГУВК, 2013. — 244 с.
6. *Приходько В. М.* Новая технология пропитки и управляемой токовой сушки электродвигателей / В. М. Приходько // Морской транспорт. Экспресс-информация. Сер. «Техническая эксплуатация флота и судоремонт». — М.: ГУП Мортехинформреклама, 2002. — Вып. 8 (920).
7. *Приходько В. М.* Переносный универсальный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В. М. Приходько, В. И. Кравченко, А. М. Приходько // Промышленная энергетика. — 1999. — № 4.
8. *Приходько В. М.* Тиристорный преобразователь — регулятор универсального назначения / В. М. Приходько, В. И. Кравченко, А. М. Приходько // Промышленная энергетика. — 1994. — № 5.
9. *Приходько А. М.* Универсальный тиристорный преобразователь / А. М. Приходько, В. М. Приходько, В. И. Кравченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 1999. — № 4.
10. *Гольберг О. Д.* Проектирование электрических машин / О. Д. Гольберг, Я. С. Гудин, И. С. Свириденко. — М.: Высш. шк., 1984. — 430 с.

Н. Е. Жадобин,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. И. Лебедев,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

О. Г. Данилов,
аспирант кафедры электродвижения и автоматики судов,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

НЕЧЕТКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

FUZZY CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS

Применение технологии нечеткой логики, ориентированной на обработку логико-лингвистических моделей представления знаний, открывает широкие перспективы для создания интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами, действующих в условиях неполной информации.

Application of technology of the fuzzy logic focused on processing of logic-linguistic models of representation of knowledges opens wide prospects for creation of intellectual control systems of complex dynamic objects operating in the conditions of incomplete information.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, нечеткие регуляторы, технологии нечеткой логики, Fuzzy-управление, фаззификация.

Key words: fuzzy logic, fuzzy regulators, intelligent control systems, fuzzy control, fuzzy controller.

ОДНОЙ из наиболее важных проблем, возникающих при создании и эксплуатации технических систем, является обеспечение требуемого качества и надежности управления в условиях возмущающих факторов, к которым относятся изменения параметров измеряемого процесса и среды функционирования системы. Оптимальное, без перегрузки и с наилучшими технико-экономическими показателями, управление судовыми энергетическими установками возможно только при измерении их фактической нагрузки.

Широкое внедрение микропроцессоров в судовые системы контроля и управления вызвало рост потребности в надежных и точных системах измерения. Электронное управление судовыми дизельными энергетическими установками существенно расширяет возможности повышения уровня автоматизации управления судовым силовым оборудованием.

Главным средством, обеспечивающим автоматизированное управление режимами работы дизельной установки, является электронный регулятор частоты вращения, обладающий, в отличие от механических или гидромеханических регуляторов, повышенной гибкостью управления дозированием топлива. Электронные регуляторы применяются для регулирования частоты вращения дизеля и используются для оптимизации подачи топлива на каждом режиме работы, включая переходные процессы. Один и тот же регулятор путем незначительных изменений может быть использован не только для регулирования частоты вращения, но и для любой другой физической величины.

Многие параметры судовой энергетической системы зависят от внешних условий: волнения моря, направления и силы ветра, состояния корпуса судна, что вносит значительную погрешность в систему контроля. Для управления сложными динамическими объектами используются методы и технологии искусственного интеллекта как средства борьбы с неопределенностью внешней

среды. В интеллектуальных регуляторах наибольшее распространение получили технологии нечеткой логики.

Теория нечетких множеств и основанная на ней логика позволяют описывать неточные категории, представления и знания, оперировать ими и делать соответствующие заключения и выводы. Наличие таких возможностей для формирования моделей различных объектов, процессов и явлений на качественном, понятийном уровне определяет интерес к организации интеллектуального управления на основе применения методов нечеткой логики. Данный метод обеспечивает принципиально новый подход к проектированию систем управления, «прорыв» в новые информационные технологии, гарантирует возможность решения широкого круга проблем, в которых данные цели и ограничения являются слишком сложными или плохо определенными и в силу этого не поддаются точному математическому описанию.

Возможны различные ситуации, в которых могут использоваться нечеткие модели динамических систем:

- когда имеется некоторое лингвистическое описание, отражающее качественное понимание (представление) процесса и позволяющее непосредственно построить множество нечетких логических правил;

- имеются известные уравнения, которые (хотя бы грубо) описывают поведение управляемого процесса, но параметры этих уравнений не могут быть точно идентифицированы;

- когда известные уравнения, описывающие процесс, являются слишком сложными, но могут быть интерпретированы нечетким образом для построения лингвистической модели. Нечеткое управление (Fuzzy Control, Fuzzy-управление) в настоящее время является одной из перспективнейших интеллектуальных технологий, позволяющих создавать высококачественные системы управления (СУ).

Среди причин распространения Fuzzy-управления обычно выделяют следующие:

- 1) особые качества СУ с нечеткой логикой, в частности малая чувствительность к изменению параметров ОУ;

- 2) синтез СУ с нечеткой логикой при применении современных средств аппаратной и программной поддержки зачастую проще, чем традиционных.

Как и у любых СУ, у систем с нечеткой логикой существует область, в которой их применение является наиболее предпочтительным. В качестве таких областей обычно выделяют следующие:

- системы регулирования, для которых модель ОУ определена лишь качественно;

- надстройка над традиционными системами регулирования (ПИД-регуляторами) для придания им адаптивных свойств;

- воспроизведение действий человека-оператора;

- системы организационного управления верхнего уровня.

Основным признаком классификации нечетких СУ является место нахождения блоков нечеткого логического вывода в СУ: либо нечеткая система сама формирует управляющие сигналы, либо сигналы с нечеткой системой управляют параметрами традиционной СУ (например, с ПИД-контроллером). К последним также относятся системы с так называемыми нечеткими комплексными моделями, в которых математическое описание объекта или контроллера представлено ансамблем традиционных моделей (обычно линейных), а переход между данными моделями (либо главный, либо скачкообразный) происходит посредством сигналов с блоков нечеткого вывода.

СУ с нечеткой логикой можно разделить также на неадаптивные и адаптивные. В неадаптивных база знаний после проектирования и настройки системы остается неизменной. В адаптивных база знаний подстраивается в процессе работы в зависимости от складывающейся в процессе управления ситуации.

Независимо от того, адаптивной или нет является нечеткая СУ, основным вопросом при ее проектировании является формирование базы знаний в виде нечетких продукционных правил.

Основным методом здесь является заимствование знаний специалистов по управлению рас-

смаатриваемым объектом. Основным методом синтеза СУ с нечеткой логикой, как и в первых моделях нечетких регуляторов, по-прежнему остаются эмпирический синтез набора нечетких продукционных правил базы знаний и выбор алгоритма нечеткого вывода с последующей настройкой параметров системы на реальном ОУ или его модели путем имитационного моделирования различных режимов работы.

В общем случае структура управления СУ с нечетким регулятором представлена на рис. 1.

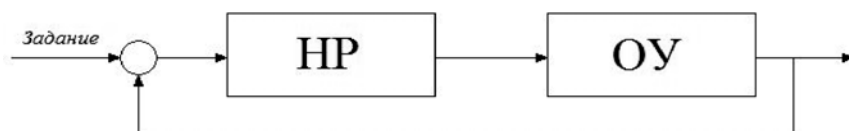


Рис. 1. Структура системы управления с нечетким регулятором

Как и в классической теории управления, нечеткое регулирование осуществляется путем оценки сигнала ошибки регулирования и выдачи управляющего воздействия на объект управления.

Для структуры, представленной на рис. 1, для двух входных сигналов, применяя аппарат нечеткой логики, получим лингвистические переменные x, y, z , качественно оценивающие входные (x, y) и выходной (z) сигналы регулятора. Для каждой лингвистической переменной необходимо определить множество терминов и область определения этих переменных, что входит в процесс настройки регулятора.

Основной же задачей синтеза нечеткого регулятора является заполнение его базы знаний, которая устанавливает качественную взаимосвязь между входной и выходной величинами. Принцип функционирования нечеткого регулятора представлен на рис. 2.

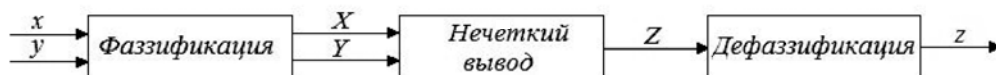


Рис. 2. Принцип функционирования нечеткого регулятора

Здесь x, y, z , и X, Y, Z соответственно четкие и нечеткие значения входных и выходных сигналов. Входные сигналы x и y проходят этап фаззификации, инициализируя нечеткие множества X и Y путем перевода их четких значений с помощью функций принадлежности в нечеткие.

Нечеткое множество определяется путем нечеткого логического вывода, основанного на наборе правил, хранящихся в базе знаний нечеткого регулятора. С помощью процесса агрегации (нечеткого вывода) получаем выходное нечеткое множество Z . Четкий сигнал выхода формируется с помощью процедуры дефаззификации — перевода нечеткого значения Z в четкое z .

Нечеткий логический регулятор (НЛР) представляет собой корректирующее устройство, предназначенное для выработки управляющего сигнала объекта управления путем преобразования четких входных переменных в лингвистические, обработки базы знаний и обратных преобразований нечетких значений в четкие. От структуры НЛР, его места расположения в регулируемом канале СУ зависят как функциональные возможности системы, так и статические и динамические характеристики.

Структурную реализацию НЛР можно представить в виде:

- корректирующего устройства для обычного, аппаратно реализуемого П-, ПИ-, ПИД-регулятора. При этом нечеткий корректор может быть подключен к обычному регулятору как последовательно, так и параллельно. Возможен вариант включения нечеткого корректирующего устройства для настройки параметров обычного регулятора с целью обеспечения требуемого оптимума характеристик технологического процесса реализуемой ИСУ;

- НЛР, включаемого в прямой канал регулирования и работающего по ошибке и ее состав-

ляющим (дифференциальной и интегральной) выходной координаты системы и обеспечивающего требуемые законы регулирования;

— НРЛ, обладающего адаптивными свойствами и включаемого в прямой канал регулирования. Для придания адаптивных свойств регулятору он наделяется адаптивно-нейронной нечеткой системой логического вывода, которая позволяет автоматизировать процесс наполнения базы правил нечеткого регулятора в соответствии с требуемыми оптимальными показателями.

Принцип действия нечеткого логического регулятора заключается в рассмотрении состояния системы и управляющих воздействий как лингвистических переменных и выборе конкретных значений управления на основе нечеткого логического вывода.

Область применения фаззирегуляторов — прежде всего автоматическое регулирование технологических процессов, строгое математическое описание которых для целей автоматического управления методами классической математики представляется затруднительным или даже невозможным.

Системы с фаззирегуляторами являются нелинейными. Основа фаззирегулятора — свод логических правил (ЕСЛИ..., ТОГДА...) — является нелинейной по существу. Нечеткие регуляторы программируются человеческим языком, поскольку они используют для целей управления информацию качественного характера. Как и обычные регуляторы, нечеткие регуляторы используют основополагающий принцип регулирования по отклонению. Выделяется сфера предметных областей, где наиболее целесообразно работать с данными и знанием, представленными языковыми моделями.

Это области с преобладанием эмпирических знаний, где сложность фактов и описаний затрудняет или подчас исключает использование языка математики, так называемые описательные науки, которые в общем-то и стали таковыми, ибо изучают то, что не может быть эффективно обеспечено языком математики, — системно-сложные объекты.

Основными компонентами нечеткого регулятора (НР), входящего в состав интеллектуальных систем управления (ИСУ), являются фаззификатор (Ф), дефаззификатор (ДФ) и блок работы со знаниями (БРЗ).

Фаззификатор предназначен для преобразования точных значений входных сигналов в нечеткие величины, используемые БРЗ при функционировании ИСУ. Дефаззификатор выполняет противоположную функцию и преобразует нечеткие решения в точные значения управляющих воздействий, поступающих на регулятор прямого управления (РПУ).

БРЗ оперирует нечеткими знаниями об объекте управления (ОУ), регуляторе и системе в целом и на основе имеющейся у него информации принимает решение с помощью механизма логического вывода (МЛВ) или машины вывода (МВ) об использовании того или иного управляющего воздействия на регулятор. В зависимости от структуры БРЗ нечеткий регулятор может быть адаптивным, самообучающимся и нечетким регулятором с активной экспертной системой.

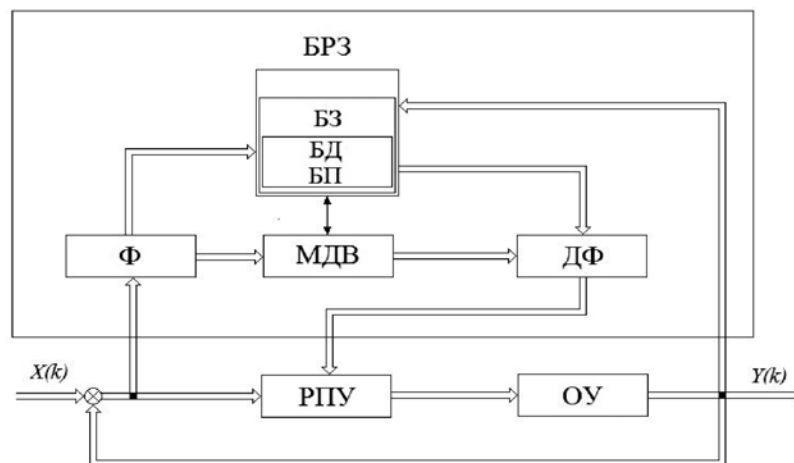


Рис. 3. Типовая схема ИСУ с нечетким регулятором

Нечеткий регулятор, обычно с нечетким алгоритмом управления (НАУ), выполняет следующие функции: с использованием лингвистических переменных и заданных функций принадлежности осуществляется фаззификация введенных входных переменных, производится вывод нечеткого множества управляющих воздействий и далее дефаззификация, то есть получение четких значений сигналов управления. НАУ обеспечивает приблизительно те же действия, которые оператор использует в процессе своей работы при управлении плохо описываемым ОУ.

НР представляет собой основанный на знаниях контроллер в иерархической двухуровневой системе управления, на нижнем уровне которой находится регулятор прямого управления, например ПИД-регулятор.

Верхний уровень НР включает в себя базу знаний и устройства перевода в лингвистические и четкие знания.

Возможное использование нечеткого регулятора для автоматической настройки (адаптации) параметров ПИД-регулятора показано на рис. 4, а.

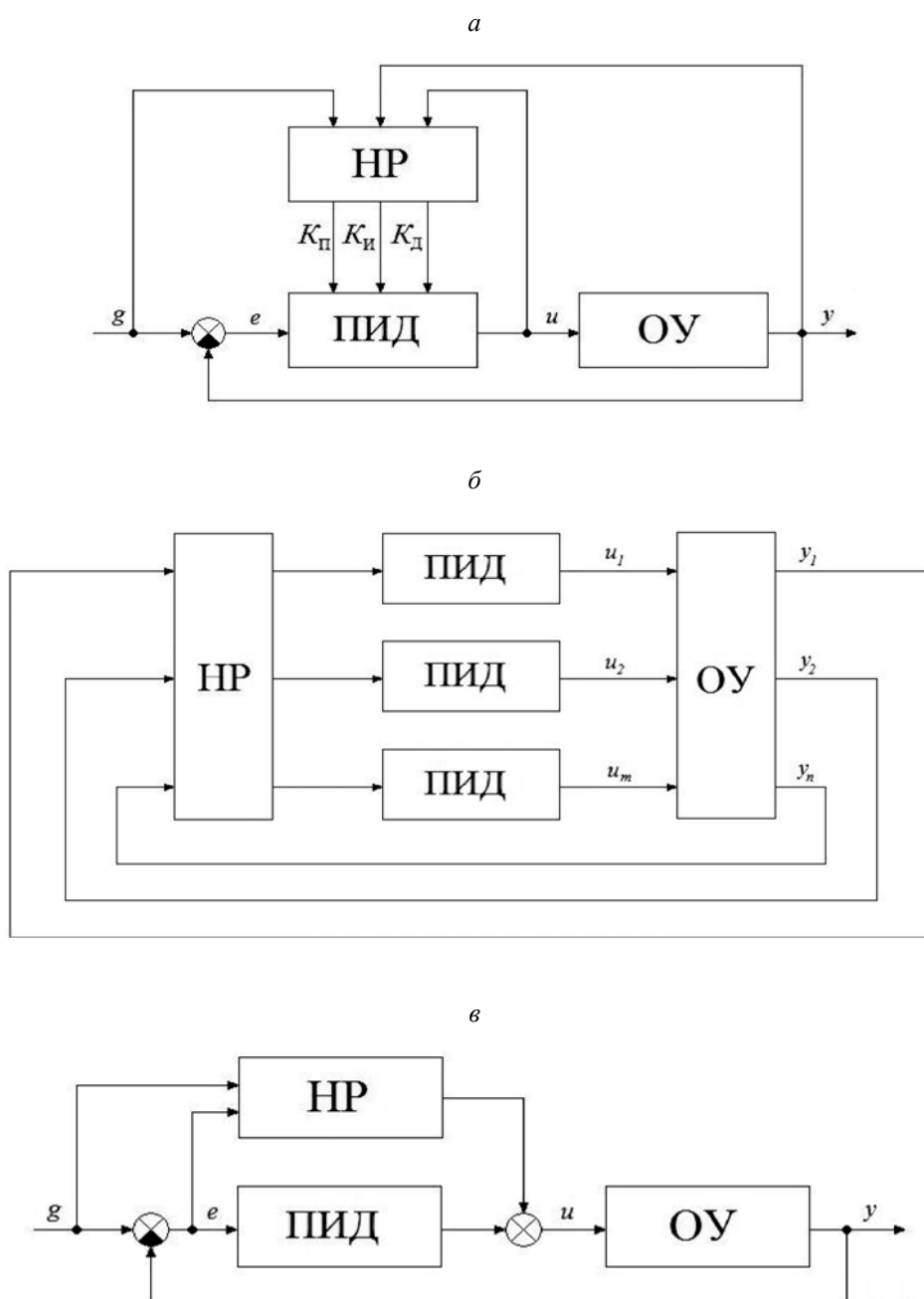


Рис. 4

Другие варианты применения РГ — формирование уставок обычных регуляторов (рис. 4, б); подключение параллельно ПИД-регулятору (рис. 4, в).

В [3] приводится описание нечеткого логического регулятора для системы управления уровнем металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали. Соответствующие детерминированные системы обеспечивают жесткие требования к управлению уровнем металла, но не позволяют сократить время переходного процесса без увеличения ошибки регулирования. Применение нечеткого регулятора позволило сократить время переходного процесса.

Нечеткий контроллер состоит из набора условных лингвистических операторов или правил, называемых НАМ-правилами, задающих конкретные ситуации управления. Структурная схема управления уровнем металла в кристаллизаторе на основе нечеткой логики представлена на рис. 5.

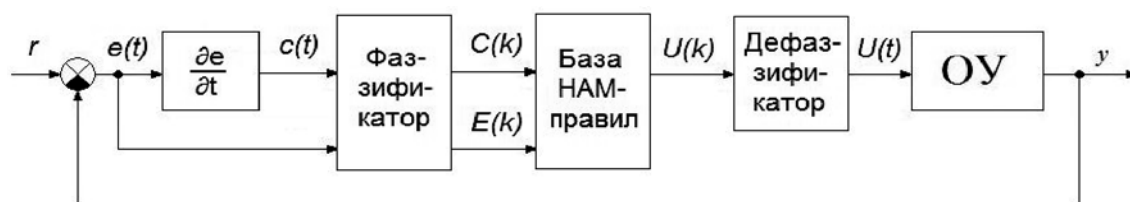


Рис. 5. Структурная схема нечеткого контроллера

В системе используются три переменных: $e(t)$ — ошибка, $c(t)$ — скорость изменения ошибки, $C(k)$ — управляющая переменная.

Нечеткий логический регулятор был внедрен в существующую систему, заменив ПИД-регулятор. Графики переходных процессов систем с ПИД-регулятором и нечетким регулятором показаны на рис. 6.

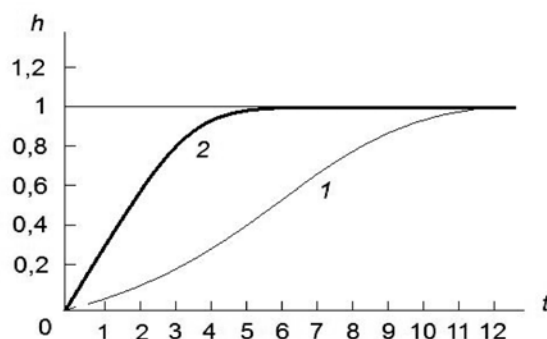


Рис. 6. Переходные характеристики для классического ПИД-регулятора (1) и нечеткого логического регулятора (2)

Как видно из полученных графиков, система с НЛР имеет лучший переходный процесс. Она точнее, чем система с ПИД-регулятором.

Список литературы

1. Интеллектуальное управление динамическими системами / В. И. Васильев [и др.]. — М.: Физ.-мат. лит., 2000. — 352 с.
2. Васильев В. И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособие / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. — М.: Радиотехника, 2009. — 392 с.

3. Жадобин Н. Е. Электронные и микропроцессорные системы управления судовых энергетических и электроэнергетических установок: учебник / Н. Е. Жадобин, Н. А. Алексеев, А. П. Крылов. — М.: Проспект, 2010. — 528 с.

4. Макаров И. М. Интеллектуальные системы автоматического управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин. — М.: Физматлит, 2001. — 576 с.

УДК 621.313

С. Г. Черный,

канд. техн. наук, доцент кафедры
электрооборудования
судов и автоматизации производства,
Керченский государственный морской
технологический университет;

А. А. Жиленков,

ст. преподаватель кафедры электрооборудования
судов и автоматизации производства,
Керченский государственный морской
технологический университет

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ДЛЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

INTELLECTUAL DECISION SUPPORT AT THE OPTIMUM SYSTEM FOR SHIPS ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Исследована проблема, когда при определении установленной мощности фильтрокомпенсирующего устройства необходимо учитывать неактивную мощность, потребляемую нагрузкой от источника питания, устройство компенсации может поддерживать заданный показатель качества электроэнергии, регулируя различные показатели качества в нормируемых пределах. Рассмотрен способ идентификации векторов гармоник тока и напряжения сети в реальном времени для использования в системе интеллектуальной поддержки принятия решений при оптимальном управлении фильтрокомпенсирующим устройством.

The problem has been reviewed when calculating the nominal power capacity of the filter-compensating device the non-active power being consumed by the load from the power supply should be taken into account; in the process of operation the compensating device may maintain the required parameter of the electric energy quality regulating the various parameters of quality within the nominal range. There has been reviewed a way to identify the circuit current and voltage harmonics in the real time in order to apply in the system of the decision-making intellectual support for optimal governing of the filter-compensating device.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, идентификация, управление.

Key words: intellectual systems, identification, control.



При определении установленной мощности фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) наилучший показатель может быть достигнут при применении системы интеллектуальной поддержки принятия решений по регулированию параметров электроэнергии. ФКУ с поддержкой принятия решений обеспечивает максимально полное использование ресурсов автономных электроэнергетических систем (ЭЭС) при поддержании заданных показателей качества

электроэнергии [1, р. 17–20]. Предполагая, что существует алгоритм управления ФКУ, при котором достигаются заданные параметры обобщенного показателя качества при наименьшей (или оптимальной) установленной мощности ФКУ, произведем формализацию задачи оптимального управления ФКУ следующим образом.

Введем вектор гармоник тока преобразователя в сети:

$$\mathbf{I} = [i_1, \dots, i_i, \dots, i_N]^T, \quad (1)$$

где i_i — i -я гармоника тока; N — количество учитываемых гармоник.

Аналогично введем вектор гармоник напряжения:

$$\mathbf{U} = [u_1, \dots, u_i, \dots, u_N]^T. \quad (2)$$

Введем вектор неактивной мощности ФКУ:

$$\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_i, \dots, x_N]^T. \quad (3)$$

Пусть полная установочная мощность ФКУ будет задана параметром S_{opt} , а текущая мощность, генерируемая ФКУ, выражается параметром S_Σ .

Векторы $\mathbf{I}$ и $\mathbf{U}$ — внешние параметры задачи управления, а S_{opt} — прямое ограничение. Тогда обобщенный показатель качества X и мощность S_Σ — выходные параметры задачи оптимального управления.

Введем также векторы $\mathbf{H}$ — верхних и $\mathbf{L}$ — нижних границ вектора $\mathbf{X}$, так что для i -го элемента векторов справедливо:

$$l_i \leq x_i \leq h_i. \quad (4)$$

Будем считать, что известны зависимости:

$$X = f(\mathbf{X}), \quad (5)$$

$$S_\Sigma = f_1(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N x_i. \quad (6)$$

Требуется обеспечить максимизацию X и оптимизацию S_Σ при ограничениях:

$$X_{\min} \leq f(\mathbf{X}) \leq X_{\max}, \quad (7)$$

$$\mathbf{L} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{H}, \quad (8)$$

$$f_1(\mathbf{X}) = S_{\text{opt}}, \quad (9)$$

где $X_{\min}$, $X_{\max}$ — соответственно минимальное и максимальное значение обобщенного показателя качества.

То есть (7) — функциональное ограничение на выходные параметры задачи управления, а выражение (9) — функциональное ограничение на внутренние управляемые параметры.

Физический смысл ограничения (9) состоит в том, что независимо от текущего распределения мощности ФКУ, затрачиваемой на компенсацию уровня той или иной гармоники и реактивной мощности, текущая суммарная мощность S_Σ ФКУ должна оставаться равной установленной мощности S_{opt} ФКУ.

Система параметров, уравнений и неравенств (1)–(9) образует формальную математическую постановку задачи оптимального управления ФКУ.

Вектор $\mathbf{X}^*$, удовлетворяющий условиям (7)–(9), называется оптимальной точкой, а соответствующие значения $X^* = f(\mathbf{X}^*)$ и $S_\Sigma^* = f_1(\mathbf{X}^*)$ — оптимальными значениями целевых функций.

Оптимальная точка $\mathbf{X}^*$, оптимальное значение целевой функции X^* и оптимальное значение целевой функции $S_\Sigma^* = f_1(\mathbf{X}^*)$ образуют оптимальное решение задачи, которое может быть локальным и глобальным. Локальное решение представляет собой наименьшее значение целевой функции в ограниченной окрестности точки X , в то время как глобальное решение дает наименьшее значение целевой функции.

Алгоритм оптимального управления фильтрокомпенсирующим устройством (ФКУ) должен обеспечивать заданные показатели качества электроэнергии, которые являются аргументами обобщенного показателя [1]. Таким образом, оптимальное управление предполагает обеспечение целого множества показателей (критериев), каждый из которых характеризует тот или иной аспект функционирования системы управления. Проблему решения оптимизационных задач с учетом множества показателей эффективности называют проблемой решения многокритериальных задач или проблемой векторной оптимизации. Рассмотрим критерии оптимизации управления и их взаимосвязь с заданными ограничениями. В том числе с ограничениями, диктуемыми нормативной документацией.

На схеме рис. 1 представлены нормируемые показатели качества, их взаимовлияние и связь с обобщенным показателем качества. Нормативной документацией нормируются параметры СГИ, допустимые уровни отдельных гармоник и коэффициент сдвига $\cos\varphi$. То есть граничные значения заданы для элементов I , U и функций от их аргументов: суммарных гармонических искажений (СГИ), $\cos\varphi$, которые, в свою очередь, являются аргументами функции показателя качества X , определяемого выражением

$$X = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{СГИ}_u^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \text{СГИ}_i^2}} \cos\varphi.$$

В нашем случае задача оптимизации, поставленная перед системой управления, выполняется в результате совместного функционирования нескольких подсистем ФКУ. Эффективность каждой из них, а также их совокупности оценивается своим критерием. Приведение каждого из показателей качества к желаемому значению требует определенных затрат мощности ФКУ, что учитывается функциональным ограничением на внутренние управляемые параметры $f_1(\mathbf{X}) = S_{\text{opt}}$ и также является критерием оптимальности управления ФКУ, где S_{opt} — оптимальная мощность, генерируемая ФКУ.

При этом должно выполняться условие $S_{\Sigma} = s_{\chi} + s_{\varphi} - S_{\text{opt}} \rightarrow 0$, а обобщенный показатель качества должен стремиться к максимуму.

В результате решения задачи оптимального управления необходимо найти такие $\chi^* = \chi_{\text{кон}}$ и $\cos\varphi^* = \cos\varphi_{\text{кон}}$, что будут выполняться условия:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma}^* = s_{\chi}^* + s_{\varphi}^* - S_{\text{opt}} &\rightarrow 0, \\ X^*(\chi^*, \cos\varphi^*) &\rightarrow 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Причем решения χ^* и $\cos\varphi^*$ должны являться Парето-оптимальными для задачи (1), то есть такими, что при любом приращении χ^* и $\cos\varphi^*$ невозможно улучшить одновременно все скалярные критерии, соответствующие этим координатам.

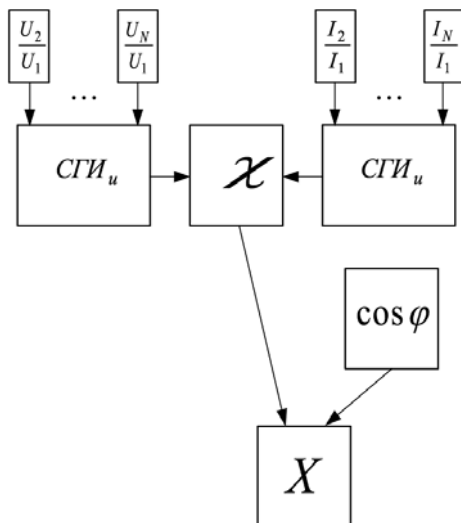


Рис. 1. Показатели качества электроэнергии и их взаимовлияние

Из рис. 1 видно, что результаты функционирования системы управления приходится оценивать по нескольким несводимым один к другому и противоречивым показателям, что и является типичной проблемой принятия решений при векторной оптимизации. Так как целевая функция обобщенного показателя качества определяется соотношением двух аргументов, то одно и то же ее значение может быть достигнуто при множестве различных χ и $\cos\varphi$, которые являются функциями от элементов I и U .

Элементы векторного критерия, относящиеся непосредственно к показателям качества электроэнергии, задаются диапазонами допустимых значений, что в конечном итоге приводит к задаче принятия решений на расширенных множествах. Поэтому представим входные параметры обобщенного показателя качества в виде нечетких множеств, вводящих соответствие между количественными значениями параметров и их качественной оценкой в виде лингвистических терминов или нечеткой формулировки: «высокий», «низкий», «нормальный низкий» и «нормальный высокий».

При этом очевидно, что область рассуждений (в дальнейшем называемая пространством) D_X для всех показателей качества, а значит, и параметров системы будет лежать в области действительных чисел, представляющих четкое множество $[0, 1]$. Задача многокритериального принятия решений (МПР-задача) предполагает заданной вектор-функцию $\Phi(X) = (\phi_1(X), \phi_2(X), \dots, \phi_m(X))$, определенную на множестве альтернатив D_X вектора варьируемых параметров X . Исходя из предпосылок, приведенных выше, системе интеллектуальной поддержки принятия решений необходимо отыскать такую альтернативу или координаты вектора X , которая по возможности минимизирует все компоненты вектора $\Phi(X)$, называемые частными критериями оптимальности.

Предположим существование такой функции предпочтения (ФП) $\psi(X)$, определенной на множестве D_X и выполняющей его отображение во множество действительных чисел R , то есть $\psi: X \rightarrow R$, что МПР-задача сводится к задаче выбора такого вектора $X^* \in D_X$, что $\max_X \psi(X) = \psi(X^*)$, $X \in D_X$.

При этом предполагается, что при предъявлении системе интеллектуальной поддержки (СИП) вектора параметров X , а также соответствующих значений всех частных критериев оптимальности $\phi_1(X), \phi_2(X), \dots, \phi_m(X)$ СИП может оценить соответствующее значение ФП $\psi(X)$.

Оценим множество значений аргументов целевой функции $X = f_X(\chi, \cos\varphi)$. Для этого определим значения $X_{\min}$ и $X_{\max}$. Минимальное допустимое значение обобщенного показателя будет достигнуто при достижении предельно допустимых значений показателей качества электроэнергии $X = f_X(\chi_{\min}, \cos\varphi_{\min})$. Ограничим $\cos\varphi_{\min}$ значением 0,8. Так как $\chi_{\min} = f_\chi(\text{СГИ}_{u \max}, \text{СГИ}_{i \max})$, а согласно требованиям нормативной документации предельно допустимые значения гармонических искажений равны $\text{СГИ}_{u \max} = 0,1$ и $\text{СГИ}_{i \max} = 0,3$, то получаем

$$\chi_{\min} = \frac{1}{\sqrt{1+0,1^2}} \frac{1}{\sqrt{1+0,3^2}} = 0,953.$$

Следовательно, минимально допустимое значение обобщенного показателя:

$$X_{\min} = \chi_{\min} \cos\varphi_{\min} = 0,953 \cdot 0,8 = 0,7624.$$

Принимая максимальное значение обеспечиваемого коэффициента сдвига $\cos\varphi_{\max} = 0,95$, а показателя несинусоидальности $\chi_{\max} = 1$, получаем

$$X_{\max} = \chi_{\max} \cos\varphi_{\max} = 0,95.$$

Определим функции принадлежности нечетких множеств термов B — «высокий» $\mu_B(x)$, S — «низкий» $\mu_S(x)$, MS — «нормальный низкий» $\mu_{MS}(x)$ и MB — «нормальный высокий» $\mu_{MB}(x)$ для показателя мощности искажения χ , мощности сдвига $\cos\varphi$, а также мощностей S^χ и $S^{\cos\varphi}$, которые необходимо затратить ФКУ для приведения текущих значений соответствующих показателей к единице.

Зададимся колоколообразными функциями принадлежности вида

$$\mu(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}},$$

где a, b, c — соответственно ширина, наклон и центр функции.

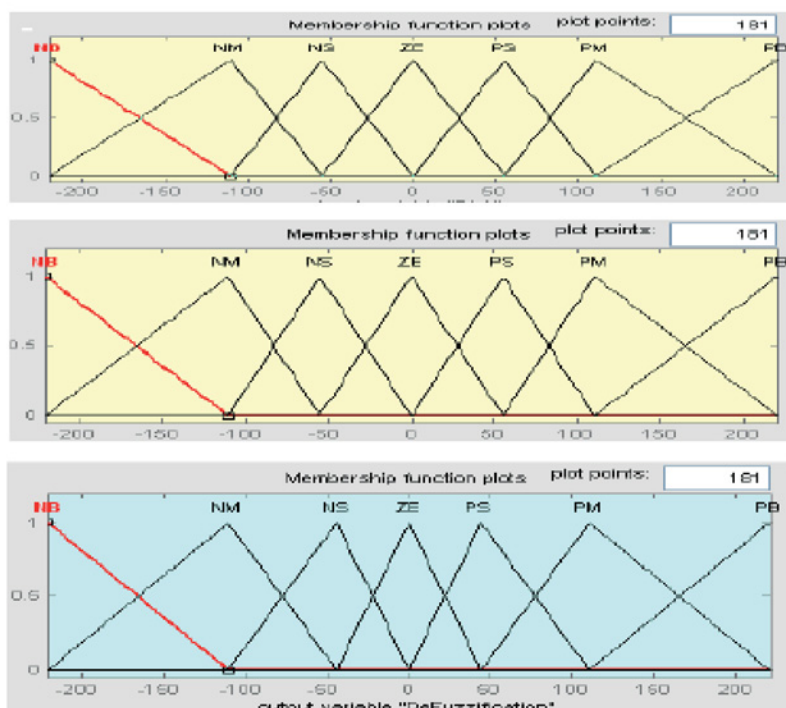


Рис. 2. Функции принадлежности входных и выходных сигналов

Для решения МПР-задачи в настоящей работе используется адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ННС) ANFIS, функционально эквивалентная системам нечеткого вывода Сугено. Описанный выше метод линейной свертки вектора критериев к скалярному критерию, связанный с аппроксимацией функции принятия решений СИП, имеет существенный недостаток — сложность аппроксимации ФП. В настоящей работе используется гибридный метод обучения на основе достижения условия (10). Таким образом, реализация МПР-задачи, предлагаемая в настоящей работе, позволяет организовать плавное регулирование выходных параметров и в значительной степени избежать слепого поиска оптимальных критериев.

Структурно ННС состоит из пяти слоев (рис. 3). Узлы каждого слоя имеют различную структуру и назначение. Квадратами показаны узлы, параметры которых подстраиваются в результате обучения ННС.

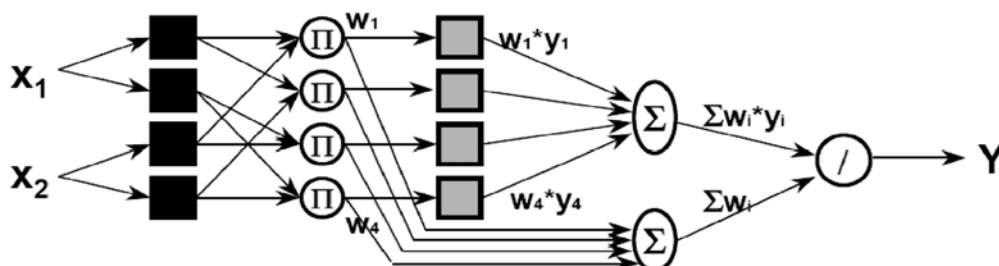


Рис. 3. Нейро-нечеткая сеть

Первый слой выполняет фаззификацию, то есть формирование функций принадлежности нечетких множеств для каждого из частных критериев оптимальности. Количество узлов (нейронов) в данном слое равно произведению количества входных частных критериев на общее количество используемых в их функциях принадлежности термов. В процессе обучения ННС происходит точная подстройка параметров фаззификации каждого из узлов слоя. То есть изменяются параметры a , b и c . На выходе слоя формируются значения функций принадлежности μ_i .

Второй слой выполняет агрегирование, то есть определяет степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода, формируя на выходе каждого узла значение весового коэффициента $w_i = \mu_{\chi_i}(\chi) \cdot \mu_{S\chi_j}(S\chi)$.

Это означает, что нейроны второго слоя исполняют роль антецедентов или посылок нечетких правил, формируя на выходе слоя степени истинности предпосылок w_i каждого правила базы знаний системы.

Третий слой выполняет активизацию, то есть нахождение степени истинности каждого из агрегированных правил нечетких продукций. Здесь происходит нормализация степеней выполнения правил, и выход i -го нейрона этого слоя представляет собой отношение степени истинности предпосылки i -го правила к сумме степеней предпосылок всех правил:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2 + \dots}$$

В четвертом слое вычисляются заключения правил. Слой имеет выходы типа Такаги–Сугено, то есть формирует четкие значения, определяемые линейными функциями:

$$\bar{w}_i y_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i),$$

где p , q и r — перестраиваемые параметры.

Таким образом, в слоях 2–4 происходит формирование нечеткой базы знаний, квантификация по ней и импликация.

В пятом слое выполняется агрегирование результата, полученного по различным правилам. Этот слой содержит единственный нейрон, который вычисляет выходное значение ННС. Для случая двух критериев x_1 и x_2 :

$$\sum_i \bar{w}_i y_i = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i} = \sum_i \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i),$$

где $p x_1$ и $q x_2$ — соответственно мощность, затрачиваемая на компенсацию искажений χ и сдвига $\cos\varphi$.

Или

$$\sum_i \bar{w}_i y_i = \sum_i \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 - S_{\text{opt}}),$$

то есть $r_i = S_{\text{opt}}$ во всех комбинациях, генерируемых ННС.

Тогда для каждой i -й линейной функции ННС p_i и q_i — это весовые коэффициенты, показывающие, какую часть мощности необходимо использовать для выполнения условия (1).

Обучение ННС — гибридное. То есть осуществляется как подбор весов нейронной сетью (линейные параметры), так и коррекция показателей качества подбором параметров слоя фаззификации (нелинейные параметры). Это позволяет задавать оптимальные показатели входных критериев в заданном диапазоне, корректируя их максимумы исходя из оптимальной мощности ФКУ. Чем меньше мощность, необходимая для обеспечения условий (10), тем больше повышаются максимумы функций принадлежности. Установленную мощность ФКУ при этом следует выбирать из расчета обеспечения желаемых показателей качества электроэнергии в самом тяжелом режиме ФКУ.

В системе нечеткого вывода Сугено были использованы треугольные функции принадлежности. Для обучения синтезированной ННС был использован гибридный метод обучения, при котором обучение происходит в два прохода:

1) прямой проход: при фиксированных нелинейных параметрах функций принадлежности ННС (слой фаззификации) выполняется подбор линейных параметров p , q и r . То есть подбираются значения перестраиваемых параметров функций Такаги–Сугено. Для подбора используется метод наименьших квадратов;

2) обратный проход: при зафиксированных параметрах выходного слоя (найденных при прямом проходе), используя метод градиентного спуска, отыскиваются оптимальные значения нелинейных параметров, входящих в функции определения.

Значение каждого параметра при обратном проходе обучения изменяется на величину

$$\Delta\alpha_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha_i},$$

где $\eta = -\frac{k}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha_i}\right)^2}}$ — коэффициент скорости обучения;

k — величина шага;

$\frac{\partial E}{\partial \alpha_i}$ — частная производная ошибки обучения по соответствующему параметру.

ННС сочетает достоинства систем нечеткой логики и нейронных сетей, обеспечивая плавность регулирования, характерную для регуляторов на нечеткой логике, и адаптивность искусственных нейронных сетей.

Предложенный регулятор был промоделирован в редакторе ANFIS программной среды MATLAB. В результате моделирования было установлено, что система обучается за 5–7 итераций, без увеличения ошибки обучения при последующих итерациях, что свидетельствует об отсутствии переобучения сети.

Список литературы

1. Zhilenkov A. Adaptive control in complex distributed systems with the identification of parameters that can't be measured / A. Zhilenkov, S. Cherney // Pressing issues and priorities in development of the scientific and technological complex: research articles. — San Francisco, California: B&M Publishing, 2013.
2. Чиженов И. М. Компенсационные преобразователи / И. М. Чиженов, В. И. Борисенко, Ю. Ф. Выдолоб // Улучшение электромагнитной совместимости электрических полупроводниковых преобразователей как средство экономии материальных и энергетических ресурсов: тез. докл. II Всесоюз. совещ. — М.: Информэлектро, 1987. — С. 26–27.
3. Прня Р. Качество напряжения — новое в решении проблемы компенсации реактивной мощности / Р. Прня, В. И. Чехов // Электротехника. — 1999. — № 1. — С. 32–34.
4. Розанов Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий // Электротехника. — 1998. — С. 10–17.
5. Розанов Ю. К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк // Электротехника. — 1999. — № 24. — С. 28–32.

6. A State Estimation Algorithm for Identification and Measurements of Power System Harmonics / S. A. Soliman [et al.] // Electric Power System Research J. — 1990. — Vol. 19. — P. 195–206.

7. Hartana R. K. Harmonic source monitoring and identification using neural networks / R. K. Hartana, G. G. Richards // IEEE Trans, on Power Systems. — 1990. — Vol. 5, № 4. — P. 1098–1104.

УДК 621.43.01

Ю. В. Галышев,
д-р техн. наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»;

А. Ю. Шабанов,
канд. техн. наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»;

А. В. Макарин,
аспирант,
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОЙ ТОЧНОСТИ ЗАДАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

ASSESSMENT OF NECESSARY ACCURACY OF THE BOUNDARY CONDITIONS TASK OF CYLINDER HEAD THERMAL LOADING OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

В статье обоснована необходимая точность задания граничных условий теплового нагружения тепловоспринимающих и теплоотдающих поверхностей головки цилиндра, обеспечивающая требуемую степень достоверности и точности расчета параметров работоспособности этого важнейшего узла двигателя. Для решения поставленной задачи был поставлен численный эксперимент, в ходе которого исследовалось влияние изменения составляющих тепловых потоков на температурное состояние модели реальной головки цилиндра высокофорсированного двигателя. Полученные результаты позволяют обосновать выбор методов моделирования процессов газодинамики и теплообмена для задания граничных условий теплового нагружения головки цилиндра.

In article the necessary accuracy of a task of boundary conditions of thermal loading of heatperceiving and heatgiving surfaces of a cylinder head, providing demanded degree of reliability and accuracy of operability parameters calculation of this major knot of the engine is proved. To solve this problem was made a numerical experiment in which studied the effect of changes in the components of heat flux on the thermal condition of real cylinder head model of the high-forced engine. The received results allow to prove a choice of methods of modeling of processes of gas dynamics and heat exchange for a task of boundary conditions of cylinder head thermal loading.

Ключевые слова: тепловое нагружение, граничные условия, численный эксперимент, головка цилиндра, двигатель внутреннего сгорания.

Key words: thermal loading, boundary conditions, numerical experiment, cylinder head, internal combustion engine.



В АЖНЕЙШИМ фактором, влияющим на возможность получения достоверных и точных результатов по оценке работоспособности головки цилиндра, является точность задания тепловых нагрузок на ее тепловоспринимающие и теплоотдающие поверхности [1]. С уче-

том того, что современные расчетные пакеты, построенные на базе метода конечных элементов, предоставляют возможность обеспечения практически 100 %-ной точности геометрического представления детали любой, сколь угодно сложной конструктивной формы, именно погрешности задания действующих на деталь тепловых потоков определяют погрешность расчета температуры [2].

Для головки цилиндра определяющей температурой, влияющей на оценку работоспособности детали, является максимальная температура на огневой поверхности нижней плиты. Для двухклапанных головок она обычно лежит в зоне межклапанной перемычки между впускным и выпускным клапаном, для четырехклапанной — в зоне перемычки между выпускными клапанами. Это определяется высокой интенсивностью теплового нагружения этой зоны и существенно затрудненными условиями теплоотвода от нее. Предельно допустимая температура в этой зоне определяется пределом термостойкости материала, с учетом необходимости обеспечения заданного коэффициента запаса (1,05–1,10).

Кроме того, важными являются значения температуры в зоне расположения полостей охлаждения с точки зрения ограничения зон кипения охлаждающей жидкости. Также контролю должны подлежать температуры в зоне расположения направляющих втулок клапанов — из соображений исключения задира стержней клапанов и сохранения их подвижности.

Точность расчета температур имеет естественное ограничение точностью их измерения. При использовании современных средств измерения температуры с помощью хромель-копелевых термопар погрешность измерения в среднем составляет порядка 2 %. Возьмем эту величину в качестве опорной для оценки необходимой точности задания граничных условий теплового нагружения головки цилиндров.

Анализ теплового баланса головки цилиндров показывает, что основными его составляющими, определяющими уровень и распределение температур в детали, являются следующие:

1) тепловой поток со стороны камеры сгорания. По физической природе это суммарный тепловой поток, определяемый условиями вынужденной конвекции и радиационного излучения высокотемпературного потока рабочего тела около тепловоспринимающей поверхности головки цилиндра. В общем балансе тепловых потоков, воспринимаемых головкой цилиндров, в зависимости от ее конструкции и режима работы двигателя, эта составляющая может достигать 40–60 %;

2) тепловой поток по поверхности выпускных каналов. Этот тепловой поток определяется условиями вынужденной конвекции при открытых клапанах и свободной конвекции при закрытых клапанах. В общем балансе подводимого к головке цилиндра теплового потока он составляет 30–50 %;

3) тепловой поток по поверхности впускных каналов. По физической природе он аналогичен потокам в выпускных каналах, но работает как составляющая теплоотвода от головки цилиндра. Доля этой составляющей — 20–40 %;

4) тепловой поток по поверхности полости охлаждения головки. Механизм этого теплового потока — вынужденная конвекция с учетом возможности возникновения зон фазового перехода. Общая его доля в балансе отводимого теплового потока — 50–60 %.

Задание тепловых потоков по всем тепловоспринимающим и теплоотдающим поверхностям головки цилиндра происходит согласно закону Ньютона, то есть по типу граничных условий третьего рода. Расчет проводится для установившегося режима работы, определяется стационарное температурное поле. Поэтому для расчета температур детали требуется задание средних за цикл локальных распределений коэффициентов теплоотдачи по поверхностям теплообмена и результирующих температур теплоотдающих и тепловоспринимающих сред [3].

Для оценки необходимой точности задания этих параметров (коэффициентов теплоотдачи и результирующих температур) был поставлен численный эксперимент, в ходе которого проводился анализ влияния изменения параметров граничных условий теплового нагружения головки на итоговые температуры детали.

Использовалась трехмерная модель реальной индивидуальной головки цилиндров высокофорсированного двигателя, выполненная из высокопрочного чугуна. Расчетная модель представлена на рис. 1.

В ходе эксперимента в качестве базового уровня нагружения использовались граничные условия, рассчитанные для номинального режима работы ($n = 2250$ об/мин, $P_e = 2,3$ МПа).

Результат расчета температурного состояния головки цилиндра на этом режиме представлен на рис. 2.

Далее последовательно, пропорционально менялись параметры граничных условий — коэффициентов теплоотдачи и результирующих температур по каждой из поверхностей теплообмена при фиксированных остальных граничных условиях. При этом фиксировалось изменение температур в характерных точках головки («датчиках»), расположенных на огневой поверхности камеры сгорания. Выбор местоположения «датчиков» на огневой поверхности головки диктуется тем, что именно в этой зоне расположены определяющие температуры детали, по которым рассчитываются коэффициенты запаса по температурам.

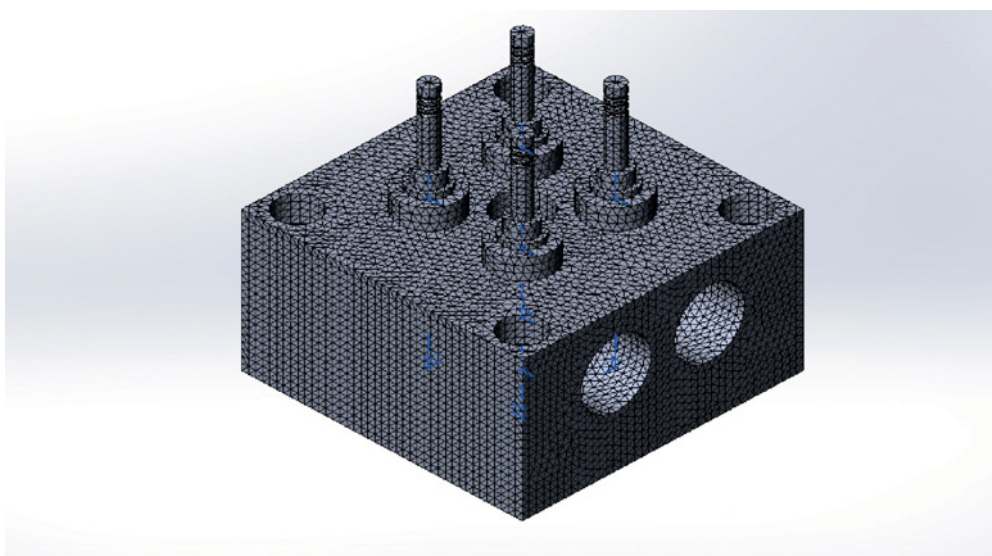


Рис. 1. Расчетная модель головки цилиндра

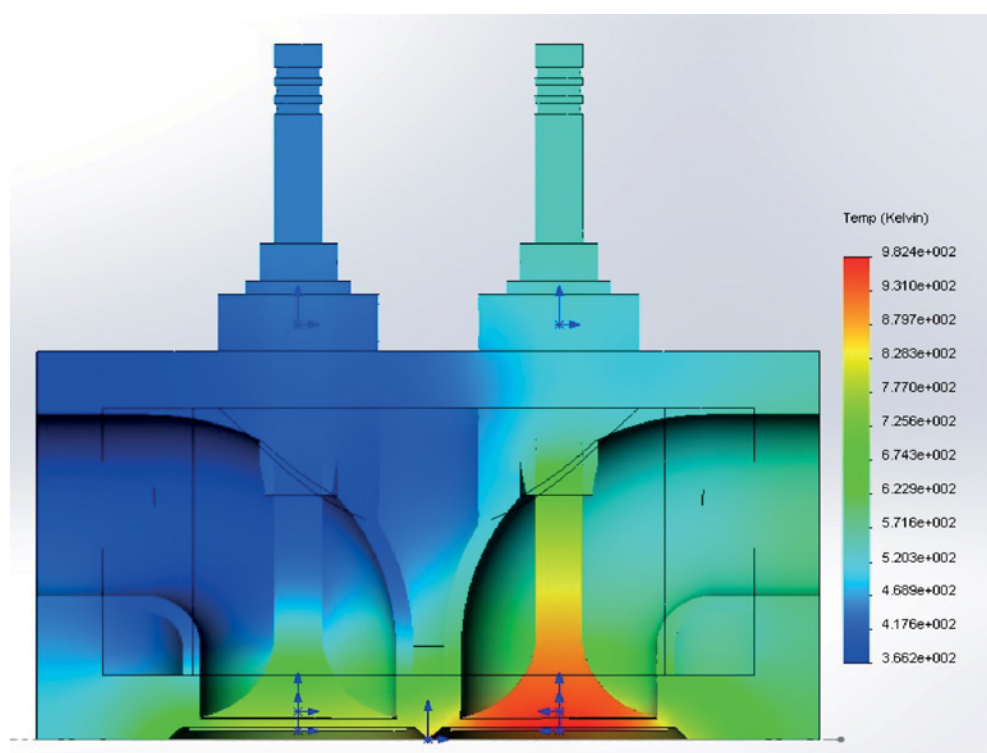


Рис. 2. Результат расчета температурного состояния головки цилиндра на номинальном режиме работы

Расположение «датчиков» проиллюстрировано на рис. 3. Процентное отклонение уровня температур в «датчиках» от базового состояния показывает степень зависимости получаемых результатов от отклонений в задании граничных условий. Эти результаты и позволяют оценить минимально необходимую погрешность задания тепловых потоков.

Результаты расчетного эксперимента показали следующее. Основное влияние на температуры в критических зонах головки цилиндров оказывает интенсивность теплового потока со стороны камеры сгорания. Влияние тепловых потоков по газовоздушным каналам существенно только в зонах, прилегающих к межклапаным перемычкам головки. Однако эти тепловые потоки существенно влияют на температурное состояние верхней части головки цилиндра и клапанов.

Влияние изменения величины коэффициента теплоотдачи со стороны камеры сгорания на изменение температуры в зоне расположения «датчиков» приведено на рис. 4.

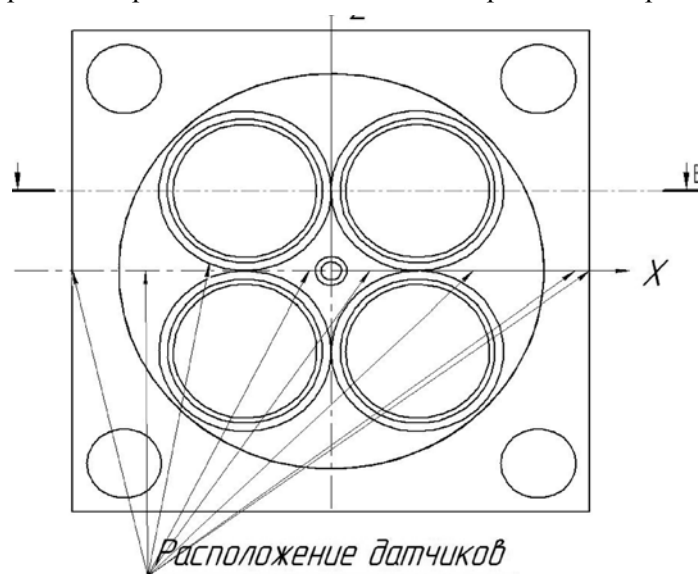


Рис. 3. Расположение «датчиков» температур на огневой поверхности головки цилиндров

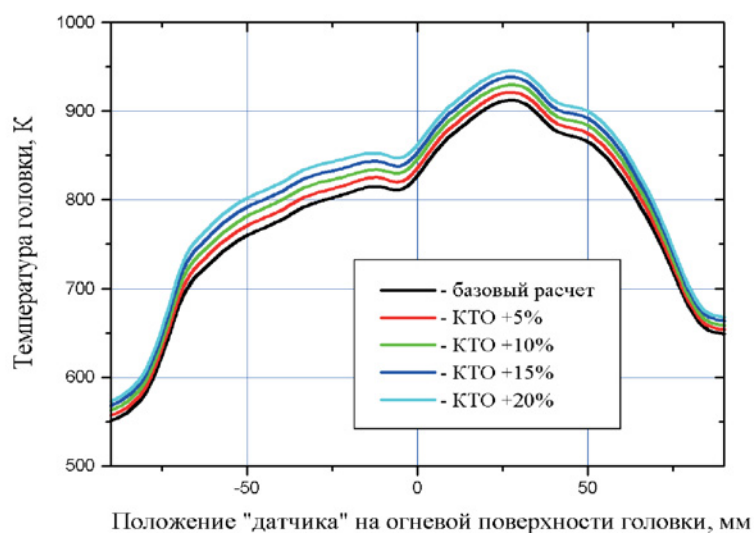


Рис. 4. Влияние изменения коэффициента теплоотдачи со стороны камеры сгорания на температуры головки

Как следует из результатов расчета, погрешность задания коэффициентов теплоотдачи не меняет качественного характера распределения температур в детали, при этом степень зависимо-

сти величин получаемых температур в выбранном диапазоне изменения варьируемого параметра не столь существенна. Так, даже 20 %-ное отклонение коэффициента теплоотдачи от базового значения приводит к средней разнице получаемых температур в точках «датчиков» не более чем на 4 % (рис. 6).

Значительно более выражена зависимость погрешности расчета температур нижней плиты головки от погрешности задания результирующей температуры (рис. 5 и 6). В этом случае 10 %-ная погрешность в задании температуры среды приводит к существенной (более 6,5 %) погрешности определения температур детали.

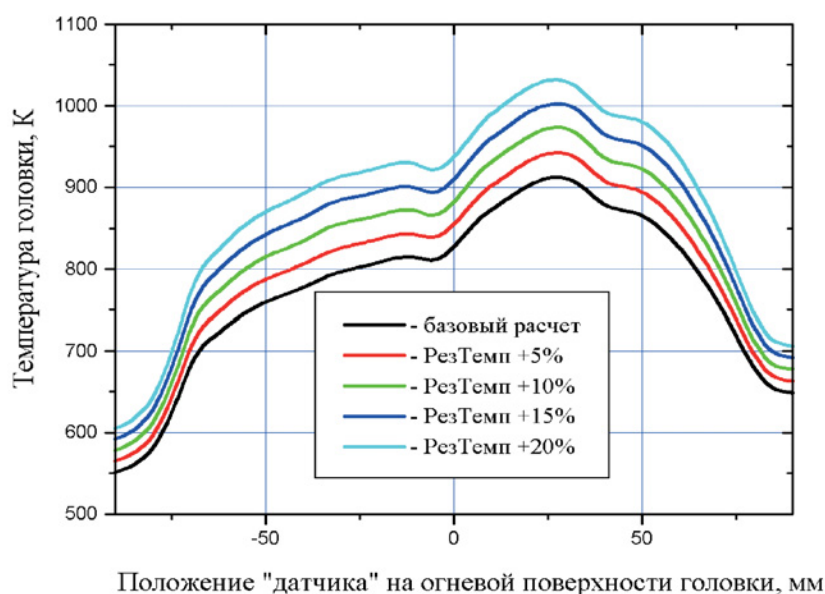


Рис. 5. Влияние изменения результирующей температуры рабочего тела со стороны камеры сгорания на температуры головки

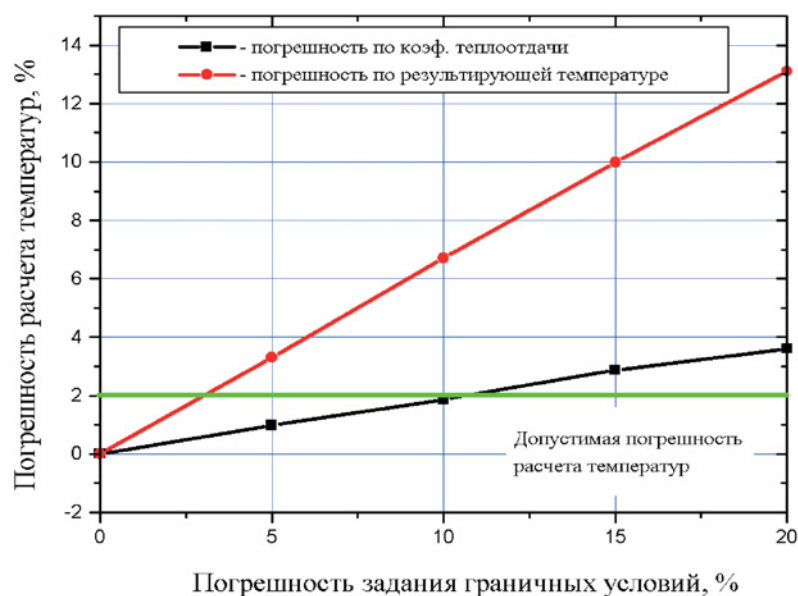


Рис. 6. Зависимость погрешности расчета температур головки от погрешности задания коэффициентов теплоотдачи и результирующих температур

При этом степень влияния погрешностей задания граничных условий по всем остальным поверхностям существенно менее выражена. Поэтому оценку предельно допустимой погрешно-

сти целесообразно делать по наиболее значимой части теплового потока — со стороны камеры сгорания.

Для оценки величины предельно допустимой погрешности был построен график зависимости погрешности расчета определяющих температур в зоне расположения «датчиков», по которым определяется степень работоспособности головки цилиндров, от погрешности задания коэффициентов теплоотдачи и результирующих температур (рис. 6).

Анализ графика на рис. 6 показывает, что максимальная погрешность задания граничных условий для обеспечения заданной погрешности расчета температур головки цилиндра (2 %) составляет:

- по коэффициентам теплоотдачи — 10 %;
- по температурам теплоотдающей или тепловоспринимающей среды — 3 %.

Полученные пороговые значения погрешностей могут быть использованы в качестве ключевых параметров выбора методик моделирования сложных газодинамических и теплообменных процессов в рабочих полостях головки цилиндра при формировании математической модели теплового нагружения этой детали.

Работа выполнена в ФБГОУ ВПО «СПбГПУ» за счет средств субсидии на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, выделяемой в рамках реализации Постановления Правительства РФ «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» от 9 апреля 2010 г. № 218 Министерством образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0094).

Список литературы

1. *Петриченко Р. М.* Конвективный теплообмен в поршневых машинах / Р. М. Петриченко, М. Р. Петриченко. — Л.: Машиностроение, 1979. — 232 с.
2. *Шабанов А. Ю.* Конечно-элементный метод расчета граничных условий теплового нагружения головки блока цилиндров поршневого двигателя / А. Ю. Шабанов, М. А. Машкур // Деп. в ВИНТИ: № 1827-B2004 от 19.11.04.
3. *Яксон И. А.* Оценка влияния погрешности задания граничных условий на точность расчетов теплонапряженного состояния деталей ЦПГ ДВС / И. А. Яксон, А. Ю. Шабанов // Деп. в ВИНТИ: № 790-B2002 от 30.04.02.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 658.5:629.5 (470.21)

В. В. Сахаров,
д-р техн. наук, профессор
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Кузьмин,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Чертков,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В СУДОРЕМОНТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЦЫ КРЫЛОВА

ADOPTING OPTIMAL DECISIONS WITH APPLICATION KRYLOV MATRIX ALGORITHM IN SHIP-REPAIR COMPANIES

В статье рассматривается алгоритм принятия решений по управлению судоремонтным производством, базирующийся на численных методах оптимизации технологических процессов с использованием функций инструментария Optimization Toolbox вычислительной среды MATLAB. Для повышения устойчивости вычислений, сокращения времени поиска оптимума в условиях ограничений в алгоритме используется матрица Крылова. Применение алгоритма демонстрируется на примере модели минимизации суммы разовых выплат заемных средств при замене устаревшего оборудования и обновления основных фондов предприятия.

This paper presents adopting decisions algorithm for ship – repairing production control based on numerical optimization methods in operating the technological processes. The MATLAB Optimization Toolbox functions are used for effective decisions. Krylov matrix is used for improving stability and time numerical operations decrease. Algorithm implementation is shown by means of minimizing of one-time payments of loans when applying obsolete equipment replacement and basic funds renovation.

Ключевые слова: судоремонтные предприятия, алгоритм, обновление, конкурентоспособность, инвестиции, оптимизация и управление.

Key words: the ship-repair companies, algorithm, renovation, competitiveness, investment, optimization and control.

ПРОЦЕССЫ глобализации и усиления международной конкуренции, характеризующие мировую экономику, явились объективной предпосылкой обновления российского флота, преодоления негативных тенденций сокращения флота и его морального старения. В настоящее время в условиях рыночной экономики происходят кардинальные изменения в развитии предприятий водного транспорта и повышении эффективности их функционирования. Концептуально определены механизмы повышения эксплуатационных показателей судов, качества обслуживания во всех сферах деятельности, в том числе при ремонте судов и реконструкции основных фондов судостроительных и судоремонтных предприятий в соответствующих секторах рынка, с учетом интересов государства, судоходных компаний и судовладельцев.

Важное направление повышения эффективности и качества работы судостроительных и судоремонтных предприятий составляют процессы управления ресурсами на основе современных технологий и оптимизационных процедур. Концепция энергосбережения, управления ресурсами

предприятий на основе современной теории оптимизации с гибким использованием институтов рынка позволяет на качественно новом уровне решать проблему снижения стоимости перевозок. Оптимизационные процессы являются исключительно наукоемкими и требуют для практической реализации применения методов исследования операций, а также численных методов и алгоритмов принятия наилучших решений в конкретных производственных условиях. Поэтому вопросы создания алгоритмов и технических средств, предназначенных для определения рациональных схем расходования ресурсов судоремонтных предприятий в условиях дефицита, приобретают особую актуальность.

Судоремонт вносит существенный вклад в обеспечение эффективной эксплуатации и восстановление технического состояния судов, реализацию реновационных процессов, развитие и совершенствование отечественного флота. Различные виды ремонта и модернизации обуславливают организационные и технологические особенности судоремонтного производства, способы обеспечения соответствия продукции требованиям техники безопасности и экологическим нормам, установленным международными стандартами.

Ремонт судна является сложным производственным процессом. Недостаточная изученность комплекса проблем, связанных с совершенствованием управления судоремонтом, в известной мере объясняется высокой сложностью математического описания, способами формализации модельных решений в условиях территориального рассредоточения ремонтной базы, существенно-го износа основных производственных фондов, нечетким управлением запасами материальных и технических средств. Процессы управления судоремонтом в условиях рынка характеризуются снижением спроса на ремонтные работы, недостаточным уровнем автоматизации энергоемких технологических операций. Поэтому в условиях дефицита бюджета и материальных ресурсов кардинальные изменения в технике и технологиях проведения судоремонта на предприятиях отрасли могут быть достигнуты только на основе фундаментальных научных положений при широком спектре прикладных исследований в данной предметной области. Исследования должны базироваться на использовании математической теории, моделей и методов управления качеством, новых способах анализа данных измерений и их обработки, принципах управления ресурсами с применением компьютерных технологий и программных средств [2].

В настоящее время достигнут определенный прогресс в развитии бизнеса судоремонтных предприятий за счет реновации, внедрения новых технологий и принятия оптимальных решений при управлении производственными процессами. К таковым можно отнести процессы совершенствования управления качеством сборки судовых механизмов и машин на основе применения статистических методов контроля, использования контрольных карт при обработке результатов измерений и временных рядов. Находят применение производные (двойные) карты для управления качеством продукции при заданных статистических допусках. Выполняется контроль технических характеристик станочного и иного оборудования судоремонтных предприятий с помощью карт контроля качества, для получения которых используют инструментарий вычислительных сред (например, Industrial Statistics среды MATLAB), обеспечивающий автоматическое построение характеристик и вычисление дефектов. Для совершенствования управления технологическими процессами в судоремонте применяются статистические методы контроля качества и мониторинга, базирующиеся на парадигме нормального распределения с большим числом функций, позволяющих количественно оценивать случайные процессы, наблюдаемые в системе «станок–приспособление–инструмент–деталь» и др.

Отметим, что основу совершенствования технологических процессов в судоремонте составляют современные методы и алгоритмы численной оптимизации [4]. Оптимизационные процедуры позволяют получать научно обоснованные количественные оценки для принятия оптимальных решений, а в иных случаях оценивать потери, вызванные отступлением от оптимума. Поскольку модели технологических процессов в судоремонтном производстве часто представляются нелинейными функциями, для поиска оптимальных решений и управления предлагается алгоритм, предназначенный для класса производственных задач распределения ресурсов. Алгоритм основан

на применении функций математического программирования, с использованием матрицы Крылова, для совершенствования управления дискретными динамическими процессами с заданными граничными условиями при фиксированном времени перехода из начального в конечное состояние. Кратко остановимся на рассмотрении алгоритма.

Алгоритмом реализуется процедура оптимизации квадратичных критериев качества с введением ограничений на переменные состояния и ограничений — равенств, устанавливаемых с помощью матриц Крылова. Для класса объектов применение квадратичных критериев позволяет привести задачу к виду, эквивалентному минимизации «энергетических потерь» на управление [3, с. 83–87].

Рассмотрим дискретную динамическую модель системы:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad k = 0, 1, \dots, N, \quad (1)$$

которой необходимо управлять при заданных значениях $x(0)$ и $x(N)$, где $x(0)$ — вектор начального состояния; $x(N)$ — вектор переменных состояния на N -м шаге решения (1); A, B — матрицы состояния и управления соответствующей размерности. Без потери общности будем считать систему инвариантной во времени.

Для полностью управляемой и наблюдаемой системы (1) можно установить однозначную связь между векторами начального и конечного состояний системы с помощью формулы

$$x(N) = A^N \cdot x(0) + D \cdot [u(0) \ u(1) \ \dots \ u(N-1)]', \quad (2)$$

где $D = [A^{N-1} \cdot B \ A^{N-2} \cdot B \ \dots \ A \cdot B \ B]$ — прямоугольная матрица полного ранга. Отличительная особенность (2) состоит в том, что для системы с одним входом может быть найдена наилучшая оценка вектора управления:

$$U = [u(0) \ u(1) \ \dots \ u(N-1)].$$

Если $N = n$, где $(n \times n)$ — размерность матрицы состояния A , то D является квадратной матрицей, и, следовательно, путем ее инверсии, согласно принципу Заде, может быть получен вектор U , обеспечивающий максимальное быстроедействие или минимальное время перехода из заданного начального в принятое конечное состояние. В общем случае можно принять $x(N) = 0$. При этом будет затрачена максимальная энергия на управление, а минимальное время составит $k = n$ шагов. В том же случае, когда $N > n$, инверсной матрицы не существует. Однако наилучшие оценки U могут быть получены с помощью псевдоинверсии Мура–Пенроуза либо методов минимизации других норм.

Если оценить U с помощью формулы

$$U = (D \cdot D')^{-1} \cdot D \cdot [x(N) - A^N \cdot x(0)], \quad (3)$$

то (3) обеспечит минимум критерия качества:

$$J = \frac{1}{2} U' \cdot U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} U^2(i), \quad (4)$$

что соответствует минимальным энергетическим затратам на управление.

Как следует из (3), воспользоваться критерием (4) возможно, только построив матрицу D . Одним из известных простых способов построения такой матрицы является метод академика А. Н. Крылова, выдающегося ученого с мировым именем. Отличительной особенностью научных трудов А. Н. Крылова является то, что наряду с чисто практической направленностью в них развиты и обобщены применяемые средства математического анализа до такой степени полноты и глубины, что эти труды могут быть отнесены как к кораблестроению, так и к прикладной математике, процессам управления и другим наукам. В подтверждение сказанного следует особо подчеркнуть, что в современных вычислительных средах матрица Крылова применена в качестве инструментария для решения задач управления динамическими процессами. Матрица Крылова впервые была представлена в его работе, известной теперь как подпространство Крылова или

«Методы подпространства Крылова» [1]. Работа касалась проблем собственных значений, в частности вычисления коэффициентов характеристического полинома:

$$D(\lambda) = \det(A - \lambda E) = (-1)^n (\lambda^n + p_1 \lambda^{n-1} + p_2 \lambda^{n-2} + \dots + p_n) \quad (5)$$

заданной матрицы.

А. Н. Крылов коснулся эффективности вычислений и, как настоящий ученый-вычислитель, начал с тщательного сравнения существующих методов, что связано с оценкой худшего сценария вычислительных затрат в методе Якоби. В результате он представил собственный метод, который был признан лучшим из известных к тому времени методов.

Подпространство Крылова размерности m , порожденное вектором v и матрицей A , — линейное пространство:

$$K_m = K_m(A, v) = \text{span}\{v, Av, A^2v, \dots, A^{m-1}v\},$$

где оператор span означает спектр собственных значений матрицы A размерности n .

Построив подпространство Крылова, можно спроецировать на него исходную систему уравнений, решение спроецированной системы будет наилучшим приближением к решению исходной системы.

Академик А. Н. Крылов указал удобный метод раскрытия определителя в левой части уравнения (5). Сущность метода заключается в том, что определитель путем алгебраических преобразований приводится к такому виду, который позволяет его легко вычислить.

Трудность раскрытия определителя состоит в том, что неизвестная величина λ входит только в диагональные элементы. Методом А. Н. Крылова определитель в левой части (5) преобразуется так, что неизвестные величины λ оказываются не диагональными его элементами, а элементами столбца. Это дает возможность на основании известных свойств определителей разложить его по элементам этого столбца, довольно просто представить определитель в уравнении (5) в виде многочлена и получить алгебраическое уравнение с неизвестным λ .

Здесь же, не вдаваясь в теоретические подробности, используем метод академика Крылова для нахождения матрицы $D(\lambda)$.

Для применения метода Крылова надо выполнить следующее:

1) составить первые строки последовательных степеней матрицы A , то есть первые строки матриц $A^2, A^3, A^4, \dots, A^n$.

Если обозначить через $a_{1j}^{(k)}$ элементы первой строки k -й степени матрицы A , то их просто можно определить по формуле приведения

$$a_{1j}^{(k)} = \sum_{\beta=1}^n a_{1\beta}^{(k-1)} a_{\beta j}, \quad (6)$$

где верхний индекс (k) — указатель степени матрицы, причем $k = 2, 3, 4, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$, $a_{1j}^{(1)} = a_{1j}$.

Формула (6) позволяет по известным элементам первой строки матрицы A^{k-1} и элементам матрицы A найти элементы первой строки матрицы A^k .

Таким образом, должны быть составлены матрицы:

$$A^2 = \begin{bmatrix} a_{11}^{(2)} & a_{12}^{(2)} & \dots & a_{1n}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix};$$

$$A^3 = \begin{bmatrix} a_{11}^{(3)} & a_{12}^{(3)} & \dots & a_{1n}^{(3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix};$$

$$A^4 = \begin{bmatrix} a_{11}^{(4)} & a_{12}^{(4)} & \dots & a_{1n}^{(4)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix};$$

$$A^n = \begin{bmatrix} a_{11}^{(n)} & a_{12}^{(n)} & \dots & a_{1n}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

2) после того как первые строки степеней матрицы A найдены, необходимо составить определитель следующего вида:

$$D(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda & a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & a_{13}^{(1)} & \dots & a_{1n}^{(1)} \\ \lambda^2 & a_{11}^{(2)} & a_{12}^{(2)} & a_{13}^{(2)} & \dots & a_{1n}^{(2)} \\ \lambda^3 & a_{11}^{(3)} & a_{12}^{(3)} & a_{13}^{(3)} & \dots & a_{1n}^{(3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda^n & a_{11}^{(n)} & a_{12}^{(n)} & a_{13}^{(n)} & \dots & a_{1n}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

в которых степени неизвестной величины λ уже расположены в первом столбце, а строки степеней матрицы A являются строками минора элемента, стоящего в левом верхнем углу матрицы (7).

Этот определитель тождествен определителю левой части:

$$\det(A - \lambda E)$$

уравнения (5), а раскрыть его значительно проще, необходимо разложить его по элементам первого столбца. Получится уравнение степени n относительно λ . Решение его и даст собственные значения исходной матрицы. Определитель матрицы (7) является определителем Крылова. Таким образом путем преобразования определителя $\det(A - \lambda E)$ в уравнении (5) к виду (7) обойдены все трудности, связанные с его раскрытием.

Построение подпространства (матрицы) Крылова в вычислительной среде MATLAB осуществляется на основе функции `gallery`, синтаксис и описание которой следующие:

Синтаксис:

`K=gallery('krylov', A, x, j)`

`K=gallery('krylov', n)`

Описание:

Функция `K=gallery('krylov', A, x, j)` возвращает прямоугольную матрицу Крылова размера $n \times m$ вида $[x, Ax, A^2x, \dots, A^{(m-1)}x]$, где A — произвольная матрица порядка n и x — вектор размерности ($n \times 1$). По умолчанию, $x = \text{ones}(n, 1)$ и $m = n$.

Алгоритм принятия оптимальных решений инвариантен к физической природе задачи. Он применим для решения задач энергосбережения на объектах водного транспорта, для оптимального (по расходу энергии) управления рулевым комплексом и любых других задач, сформулированных в терминах моделей, отвечающих уравнениям (1)–(4).

В связи с этим, принимая во внимание практическую важность задач управления ресурсами на судоремонтных предприятиях, авторы предложили использовать алгоритм принятия оптимальных решений для управления инвестициями в производство, с целью развития технологической базы и обновления основных фондов.

Известно, что в процессе финансирования инвестиционных кредитов на предприятии решаются две задачи: инвестор (банк, инвестиционная компания) предоставляет заемные средства под

определенную процентную ставку, преследуя получение прибыли. Предприятие или компания, занимающая средства, стремится минимизировать выплаты на погашение кредитов. Таким образом, на рынке инвестиционных услуг устанавливаются определенные компромиссные отношения между спросом и предложением. Инвестор предоставляет заем под процентную ставку, зависящую от характера спроса на инвестиционные средства. Рыночная ставка процента назначается неслучайно. Инвестор всегда сравнивает ожидаемый доход на капитал с текущей рыночной ставкой процента, что определяет также категорию процента.

Для предприятия как составной части корпоративного объединения заем для обновления технических средств и технологий работы представляется исключительно важной и ответственной производственной задачей со многими возможными сценариями. При займе средств под реализацию проекта требуется из всех возможных выбрать такой сценарий, при котором минимизируются собственные выплаты на погашение кредитов и по возможности сокращаются сроки их погашения. При возвращении заемных средств предприятие погашает платежи по процентам в установленные контрактом сроки, а затем, по истечении сроков, выплачивает всю сумму кредита. Вместе с тем могут быть различные варианты расчетов, которые оговариваются в контракте при заключении кредитного соглашения. Например, в контракте может предусматриваться погашение финансовых обязательств с помощью разовых платежей, сумма которых превышает величину необходимых обязательных процентов по полученному кредиту. В этом случае может быть уменьшена сумма заемных средств либо величина выплачиваемых сумм по процентам.

Развитие методов и средств компьютерного моделирования, базирующихся на современных технических и программных средствах, способствует значительному повышению эффективности принимаемых решений по минимизации собственных выплат на погашение кредитов в установленные банком сроки и проценты.

С целью выпуска конкурентоспособной продукции (услуг) судоремонтными предприятиями предлагается алгоритм оптимизации разовых выплат по взятым кредитным обязательствам. Разовые выплаты производятся с учетом получаемых доходов на предприятии и имеющихся финансовых возможностей совета директоров. При этом сумма разовых выплат не может быть меньше текущего процента по кредитному соглашению и больше суммы дохода, получаемого предприятием за определенный период в результате использования приобретенных по кредиту обновленных технических средств.

В вычислительной среде MATLAB в качестве функции квадратичного программирования в оценке ежемесячных платежей по n месячному займу использована функция *quadprog*, имеющая синтаксис:

$$x = \text{quadprog}(H, f, A, b, Aeq, beq, lb, ub),$$

где H , A и Aeq — матрицы, а величины f , b , beq , lb , ub и x — векторы соответствующих размерностей.

В соответствии с приведенным синтаксисом, функция *quadprog*:
— вычисляет вектор x , который минимизирует целевую функцию:

$$f(x) = \min_x \frac{1}{2} x^T H x + f^T x,$$

при условии выполнения ограничения-неравенства $Ax \leq b$;

— решает указанную выше задачу с дополнительным выполнением ограничений типа равенства $Aeq \cdot x = beq$;

— определяет набор нижних и верхних границ для переменной x так, чтобы решение располагалось в диапазоне $lb \leq x \leq ub$.

В матричном виде квадратичная часть целевой $f(x)$ функции запишется так:

$$f(x) = 0.5 \cdot x^T \cdot H \cdot x,$$

где H — единичная диагональная матрица размерности (70×70) . Матрица A_{eq} в нашем случае согласно алгоритму является матрицей Крылова. Вектор f принят равным нулю. Свободные члены целевой функции не включаются в вычислительный процесс оператором *quadprog* и учитываются отдельно.

Рассмотрим применение алгоритма в ситуации, когда инвестиции в процесс замены оборудования составляют 18 млн долл. США под процентную ставку i % годовых при следующих значениях матриц A и B (см. уравнение (1)):

$$A = 1 + (i/(12 \cdot 100)) \text{ и } B = -1.$$

Исходные данные для расчета:

- объем инвестиций $x(0) = 18$ млн долл. США;
- время выплаты (в месяцах) $n = 70$ (5 лет и 10 мес.);
- сценарии при процентных ставках годовых: 5, 6, 7, 8, 9 %;
- остаточная сумма на момент окончания времени выплат $x(n) = 0$.

Получены следующие результаты расчета по предложенному алгоритму в формате bank при годовой ставке $i=8,5$ %:

U =

Columns 1 through 4				
404788.58	401941.49	399114.43	396307.25	
Columns 5 through 8				
393519.82	390752.00	388003.64	385274.61	
Columns 9 through 12				
382564.77	379874.00	377202.15	374549.10	
Columns 13 through 16				
371914.70	369298.83	366701.37	364122.17	
Columns 17 through 20				
361561.11	359018.06	356492.91	353985.51	
Columns 21 through 24				
351495.75	349023.50	346568.64	344131.04	
Columns 25 through 28				
341710.59	339307.17	336920.64	334550.91	
Columns 29 through 32				
332197.84	329861.32	327541.24	325237.47	
Columns 33 through 36				
322949.91	320678.44	318422.94	316183.31	
Columns 37 through 40				
313959.43	311751.19	309558.49	307381.21	
Columns 41 through 44				
305219.24	303072.47	300940.81	298824.14	
Columns 45 through 48				
296722.35	294635.35	292563.03	290505.29	
Columns 49 through 52				
288462.01	286433.11	284418.48	282418.02	
Columns 53 through 56				
280431.63	278459.21	276500.66	274555.89	
Columns 57 through 60				
272624.80	270707.29	268803.27	266912.64	
Columns 61 through 64				
265035.30	263171.17	261320.16	259482.16	
Columns 65 through 68				

257657.09 255844.85 254045.36 252258.53
Columns 69 through 70
250484.27 248722.49/
Zopt= sum(U) = \$ 22437648.61

где U , Z_{opt} — оптимальные значения разовых платежей по окончании каждого месяца и сумма разовых выплат при погашении кредита ($i=8.5\%$).

Сравнение результатов. Заметим, что величины U отличаются от периодического платежа по займу или аннуитету, который представляет собой постоянное число, определяемое по формулам сложных процентов с учетом времени выплат, размеров инвестиций и годовой процентной ставки. Вычисление размера ежемесячных платежей в этом случае можно выполнить с помощью стандартных функций финансовой аналитики среды MATLAB, в частности посредством функции `pauperc` со следующим синтаксисом:

$$pint = pauperc(rate, nper, pv, fv, due), \quad (8)$$

где pmt — размер ежемесячного периодического платежа;
 $rate$ — периодическая процентная ставка (десятичное дробное число, большее или равное нулю);
 $nper$ — число периодов (месяцев) на протяжении срока финансового инструмента;
 pv — текущая стоимость финансового инструмента;
 fv — значение будущей или остаточной балансовой стоимости финансового инструмента по прошествии $nper$ периодов;
 due — указатель момента платежей:
0 — конец периода, 1 — начало периода.

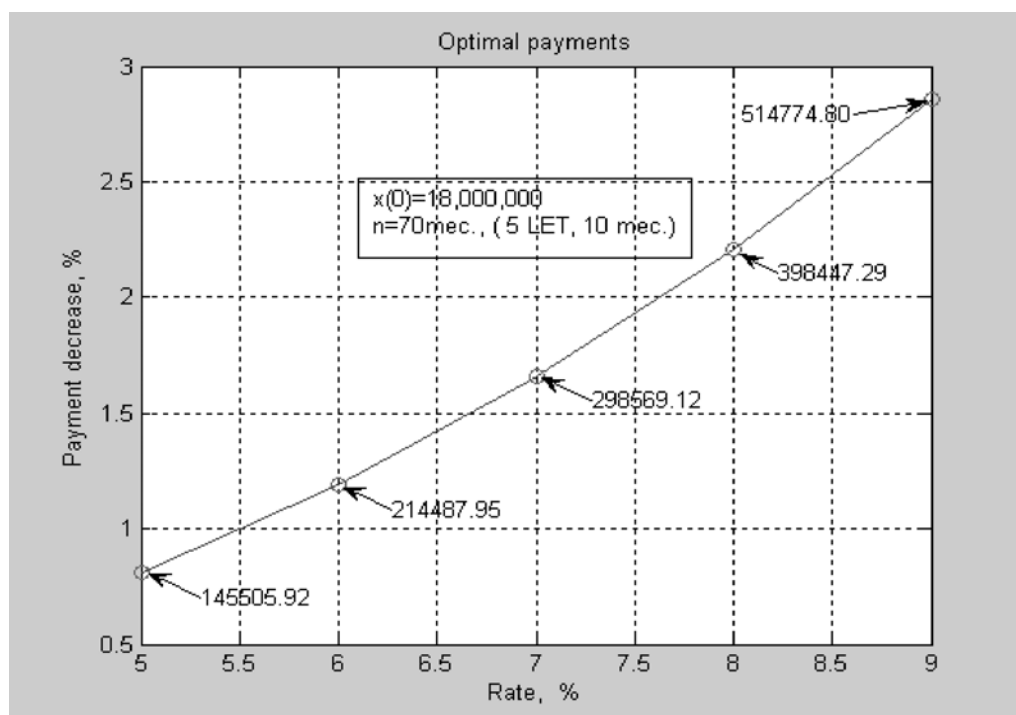


Рис. 1. Уменьшение объема выплат по займу в зависимости от годовой ставки процента при оптимальном управлении

Оптимальный режим характеризуется изменениями от шага к шагу размера ежемесячных платежей, за счет чего достигается снижение объема выплат:

при годовой ставке 5 % — на 0.81 %,
при годовой ставке 6 % — на 1.19 %,
при годовой ставке 7 % — на 1.66 %,
при годовой ставке 8 % — на 2.21 %,
при годовой ставке 9 % — на 2.86 %.

В долларах сокращения размеров выплат составляют:

145505.92,

214487.95,

298569.12,

398447.29,

514774.80,

что свидетельствует о целесообразности реализации «мягкого» режима ежемесячных платежей при значительных размерах ставок и продолжительном времени выплат по инвестициям (рис. 1).

Таким образом, на основе представленного вычислительного алгоритма и программы в кодах MATLAB возможно оперативно осуществлять выбор такого сценария, при котором минимизируются собственные выплаты на погашение кредитов, а также сокращаются сроки их погашения.

Список литературы

1. Крылов А. Н. О численном решении уравнения, которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем / А. Н. Крылов // Изв. АН СССР. — 1931.
2. Уоткинс Д. С. Основы матричных вычислений / Д. С. Уоткинс. — М.: БИНОМ: Лаб. знаний, 2006. — 664 с.
3. Сахаров В. В. Применение матрицы Крылова для апериодического управления динамическими объектами / В. В. Сахаров, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — Вып. 1 (9).
4. Сахаров В. В. Совершенствование управления качеством сборки судовых механизмов в судоремонте / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин. — СПб.: Судостроение, 2012. — 202 с.

УДК 531

Б. Ф. Клочков,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ НЕРАВНОЖЕСТКОГО РОТОРА В УПРУГИХ ОПОРАХ

STABILITY OF VARIOUS STIFFNESS ROTOR MOTION IN ELASTIC SUPPORTS

Исследована устойчивость движения неравножесткого ротора при трех вариантах конструкции его опор. Определена оптимальная схема ротора с невращающимися упругими опорами.

The article gives research of a stability of a motion of a various stiffness rotor in three versions of the construction of its supports. An optimal scheme of a rotor in nonrotating elastic supports is defined.

Ключевые слова: устойчивость движения, ротор, упругие опоры, анизотропия упругого поля.
Key words: a stability of a motion, a rotor, elastic supports, anisotropy of elastic field.

ПРИ вращении роторов в ряде случаев возникают колебания с частотами, кратными скорости их вращения. Известно, что одной из причин, вызывающих колебания с частотой, равной удвоенной скорости вращения, является неоднородность радиального коэффициента жесткости ротора (анизотропия упругого поля вала) [1; 2]. Примерами анизотропных роторов, то есть роторов двойной жесткости, являются роторы двухполюсных электромашин; валы, сечения которых на некоторых участках в силу назначения машины прямоугольные.

Известные практические рекомендации — отстройка рабочих диапазонов частот от виброопасных, установка упругих опор для уменьшения анизотропии суммарного упругого поля между ротором и фундаментом [1; 3, с. 27–44] — оказываются часто недостаточными.

Возможен другой способ активной борьбы с указанным выше нежелательным явлением, заключающийся в применении дополнительного анизотропного упругого поля, вращающегося вместе с валом. Последнее может быть создано как на некоторых участках вала, так и с помощью специальных упругих опор [4]. Это обстоятельство открывает новый путь уменьшения ширины зон неустойчивости движения и амплитуд колебаний кратных частот.

Идею этого метода рассмотрим на примере простейшей роторной системы, состоящей из одного анизотропного вала с установленным в середине его и без перекоса диском (рис. 1).

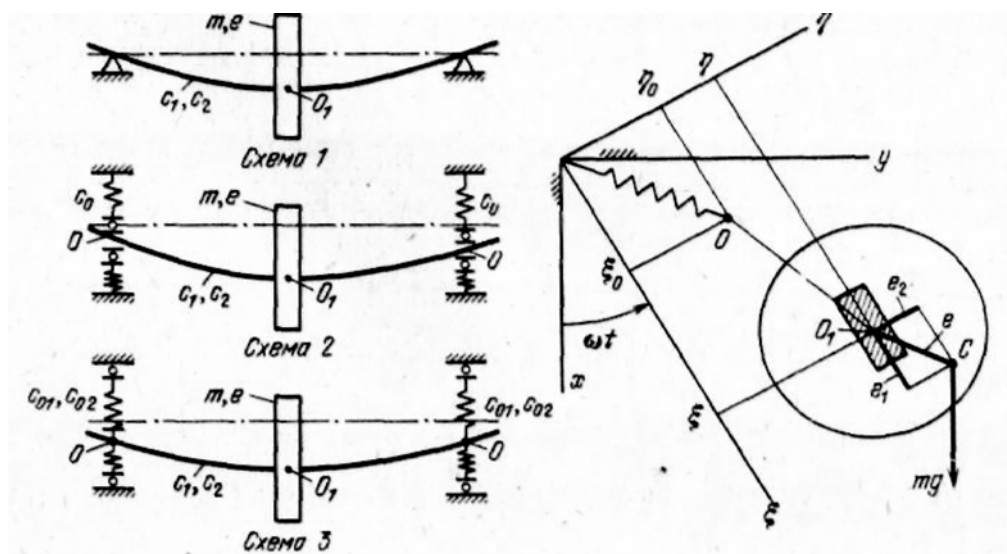


Рис. 1. К выводу уравнений движения

Вводится система координат $O\xi\eta$, вращающаяся вместе с ротором с постоянной угловой скоростью ω . В этой системе вал имеет жесткости c_1 и c_2 вдоль осей ξ и η и вращается в подшипниках, внутренние кольца которых также анизотропны с коэффициентами жесткости, равными соответственно c_{01} и c_{02} вдоль тех же осей. Диск с приведенной к его центру массой вала имеет массу m и удельный дисбаланс e с составляющими e_1 и e_2 вдоль осей ξ и η соответственно. Координаты геометрического центра диска и центров опор обозначим соответственно через ξ, η и ξ_0, η_0 . При этом в силу симметрии считаем, что перемещения обеих опор одинаковы. Сила сопротивления движению принимается пропорциональной абсолютной скорости центра диска (коэффициент пропорциональности k).

Без учета сил неупругого сопротивления и массы опор уравнения движения имеют вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi} &= -k(\dot{\xi} - \omega\eta) - c_1(\xi - \xi_0) + 2m\omega\dot{\eta} + m\omega^2(\xi + e_1) + mg \cos \omega t, \\ m\ddot{\eta} &= -k(\dot{\eta} + \omega\xi) - c_2(\eta - \eta_0) - 2m\omega\dot{\xi} + m\omega^2(\eta + e_2) - mg \sin \omega t, \\ 0 &= -2c_{01}\xi_0 + c_1(\xi - \xi_0), \\ 0 &= -2c_{02}\eta_0 + c_2(\eta - \eta_0) \end{aligned} \quad (1)$$

или после исключения ξ_0 и η_0 :

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi} + k(\dot{\xi} - \omega\eta) - 2m\omega\dot{\eta} + (c_3^{(1)} - m\omega^2)\xi &= me_1\omega^2 + mg \cos \omega t, \\ m\ddot{\eta} + k(\dot{\eta} + \omega\xi) + 2m\omega\dot{\xi} + (c_3^{(2)} - m\omega^2)\eta &= me_2\omega^2 - mg \sin \omega t, \end{aligned}$$

где $c_3^{(1)}$ и $c_3^{(2)}$ — эквивалентные коэффициенты жесткости, определяемые формулами:

$$\frac{1}{c_3^{(1)}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{2c_{01}}, \quad \frac{1}{c_3^{(2)}} = \frac{1}{c_2} + \frac{1}{2c_{02}}. \quad (2)$$

Если подобрать жесткости вала и опор так, что $c_3^{(1)} = c_3^{(2)}$, то полученные выше уравнения совпадают с уравнениями движения изотропного вала, поэтому зона неустойчивости между критическими скоростями стягивается в точку вследствие их равенства [1; 2]. Колебания с частотой 2ω , вызываемые весом, также не возникают.

Примем для сил неупругого сопротивления при деформации вала линейную зависимость от скорости деформации [5, с. 45–75]. Наряду с традиционно выполненными упругими опорами с невращающимся изотропным (однородным) упругим полем выше обоснована возможность применения опор с вращающимся анизотропным полем. Для сопоставления результатов параллельно проведем исследование устойчивости движения ротора двоякой жесткости в жестких опорах. С этой целью исследуем устойчивость движения ротора двоякой жесткости при трех вариантах установки (динамических схемах 1–3) (рис. 1).

Уравнения движения

Воспользуемся расчетной схемой, изображенной на рис. 1, и обозначениями, приведенными выше. При движении ротора возникает сила сопротивления движению (сила внешнего демпфирования), принятая пропорциональной абсолютной скорости центра O_1 диска с коэффициентом пропорциональности k . При деформациях вала и упругих элементов опор в схемах 2 и 3 возникают силы неупругого сопротивления, принятые, согласно гипотезе Фохта, пропорциональными соответствующим скоростям деформаций с коэффициентом h .

Рассмотрим вначале схему 1. Для ротора, установленного по этой схеме, сила неупругого сопротивления F записывается непосредственно в проекциях на оси ξ и η , вращающиеся вместе с ротором: $F_\xi = -h\dot{\xi}$, $F_\eta = -h\dot{\eta}$. Так как сила внешнего демпфирования R пропорциональна абсолютной скорости центра диска, то она должна быть записана вначале в неподвижной системе координат $R_x = -k\dot{x}$, $R_y = -k\dot{y}$. По формулам преобразования координат:

$$\begin{aligned} x &= \xi \cos \omega t - \eta \sin \omega t, \\ y &= \xi \sin \omega t + \eta \cos \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

получаем проекции силы сопротивления движению на оси подвижной системы координат:

$$R_\xi = -k\dot{\xi} + k\omega\eta, \quad R_\eta = -k\dot{\eta} - k\omega\xi.$$

Таким образом в принятых обозначениях уравнения движения ротора по схеме 1 имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi} + (k+h)\dot{\xi} - 2m\omega\dot{\eta} - k\omega\eta + (c_1 - m\omega^2)\xi &= me_1\omega^2 + mg \cos \omega t, \\ m\ddot{\eta} + (k+h)\dot{\eta} + 2m\omega\dot{\xi} + k\omega\xi + (c_2 - m\omega^2)\eta &= me_2\omega^2 - mg \sin \omega t. \end{aligned} \quad (4)$$

Для обобщения результатов исследования полезно перейти к безразмерным (относительным) параметрам. Обозначим через $\omega_0 = \sqrt{(c_1 + c_2) / 2m}$ усредненную критическую скорость ротора в жестких опорах, $\beta = \omega / \omega_0$ — безразмерную скорость вращения, $\delta = k / m\omega_0$ — безразмерный коэффициент внешнего демпфирования, $\kappa = h / m\omega_0$ — относительный коэффициент неупругого сопротивления, $\mu = (c_1 - c_2) / (c_1 + c_2)$ — коэффициент анизотропии упругого поля вала и $\tau = \omega_0 t$ — безразмерное время; тогда, обозначив производные $d/d\tau$ штрихами, приведем уравнения движения (4) схемы 1 к виду:

$$\begin{aligned} \eta'' + (\delta + \kappa)\eta' - 2\beta\xi' + (1 - \mu - \beta^2)\eta + \beta\delta\xi &= e_2\beta^2 - \frac{g}{\omega_0^2} \sin \beta\tau, \\ \xi'' + (\delta + \kappa)\xi' - 2\beta\eta' + (1 + \mu - \beta^2)\xi - \beta\delta\eta &= e_1\beta^2 + \frac{g}{\omega_0^2} \cos \beta\tau. \end{aligned} \quad (5)$$

Обратимся теперь к схемам 2 и 3. Для этих схем силы неупругого сопротивления в вале пропорциональны относительным скоростям $(\dot{\xi} - \dot{\xi}_0)$ и $(\dot{\eta} - \dot{\eta}_0)$. Силы неупругого сопротивления при деформациях упругих элементов опор для схемы 2 записываются сначала в неподвижной системе координат x, y , в которой они имеют вид $-2h\dot{x}_0$ и $-2h\dot{y}_0$, а затем, после преобразования по формулам (3), во вращающейся системе ξ, η : $-2h(\dot{\xi}_0 - \omega\eta_0)$ и $-2h(\dot{\eta}_0 + \omega\xi_0)$.

Для перехода к безразмерным параметрам обозначим через $\alpha = (c_1 + c_2) / 2c_0$ относительную податливость опор. Тогда уравнения движения ротора, установленного по схеме 2, примут вид:

$$\begin{aligned} \xi'' + \kappa(\xi' - \xi'_0) + \delta(\xi' - \beta\eta) + (1 + \mu)(\xi - \xi_0) - 2\beta\eta' - \beta^2\xi &= e_1\beta^2 + \frac{g}{\omega_0^2} \cos \beta\tau, \\ \eta'' + \kappa(\eta' - \eta'_0) + \delta(\eta' - \beta\xi) + (1 - \mu)(\eta - \eta_0) + 2\beta\xi' - \beta^2\eta &= e_2\beta^2 - \frac{g}{\omega_0^2} \sin \beta\tau, \\ k(3\xi'_0 - \xi' - 2\beta\eta_0) + 2\xi_0 / \alpha - (1 + \mu)(\xi - \xi_0) &= 0, \\ k(3\eta'_0 - \eta' + 2\beta\xi_0) + 2\eta_0 / \alpha - (1 - \mu)(\eta - \eta_0) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Наконец, в схеме 3 упругое поле вращается вместе с ротором, поэтому силы неупругого сопротивления в опорах описываются непосредственно во вращающейся системе координат слагаемыми $-2h\dot{\xi}_0$ и $-2h\dot{\eta}_0$. После приведения к безразмерному виду и некоторых преобразований уравнения движения ротора, установленного по схеме 3, принимают вид:

$$\begin{aligned} \xi'' + \kappa(\xi' - \xi'_0) + \delta(\xi' - \beta\eta) + (1 + \mu)(\xi - \xi_0) - 2\beta\eta' - \beta^2\xi &= e_1\beta^2 + \frac{g}{\omega_0^2} \cos \beta\tau, \\ \eta'' + \kappa(\eta' - \eta'_0) + \delta(\eta' - \beta\xi) + (1 - \mu)(\eta - \eta_0) + 2\beta\xi' - \beta^2\eta &= e_2\beta^2 - \frac{g}{\omega_0^2} \sin \beta\tau, \\ k(3\xi'_0 - \xi' - 2\beta\eta_0) + 2\xi_0 / \alpha - (1 + \mu)(\xi - \xi_0) &= 0, \\ k(3\eta'_0 - \eta' + 2\beta\xi_0) + 2\eta_0 / \alpha - (1 - \mu)(\eta - \eta_0) &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\alpha = (c_1 + c_2) / (c_{01} + c_{02})$ — относительная усредненная податливость опор; $\nu = (c_{01} - c_{02}) / (c_{01} + c_{02})$ — коэффициент анизотропии упругого поля опор. Отметим, что без учета сил неупругого сопротивления ($\kappa = 0$) уравнения (7) принимают вид:

$$\begin{aligned} \xi'' + \delta(\xi' - \beta\eta) - 2\beta\eta' + \left[2 \frac{(1 + \mu)(1 + \nu)}{\alpha(1 + \mu) + 2(1 + \nu)} - \beta^2 \right] \xi &= e_1\beta^2 + \frac{g}{\omega_0^2} \cos \beta\tau, \\ \eta'' + \delta(\eta' + \beta\xi) - 2\beta\eta' + \left[2 \frac{(1 - \mu)(1 - \nu)}{\alpha(1 - \mu) + 2(1 - \nu)} - \beta^2 \right] \eta &= e_2\beta^2 + \frac{g}{\omega_0^2} \sin \beta\tau. \end{aligned} \quad (8)$$

Условие (2) в безразмерных параметрах записывается в виде

$$\frac{(1+\mu)(1+\nu)}{\alpha(1+\mu)+2(1+\nu)} = \frac{(1-\mu)(1-\nu)}{\alpha(1-\mu)+2(1-\nu)}. \quad (9)$$

Из квадратного относительно ν уравнения (9) определяется значение

$$\nu^0 = [\alpha(1-\mu^2) - \sqrt{\alpha^2(1-\mu^2)^2 + 16\mu^2}] / 4\mu. \quad (10)$$

Анализ знаков показывает, что в формуле (10) перед корнем следует брать лишь «-». График зависимости $\nu^0 = \nu^0(\alpha)$, построенный для примера при значении $\mu = 0,2$, изображен на рис. 2.

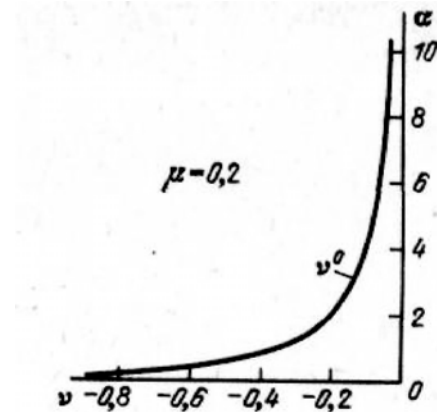


Рис. 2. Зависимость $\nu^0 = \nu^0(\alpha)$ при $\mu = 0,2$

Таким образом, движение ротора двоякой жесткости, установленного в опорах с вращающимся анизотропным упругим полем с коэффициентом анизотропии ν^0 , описывается уравнениями:

$$\eta'' + \delta(\eta' + \beta\xi) + 2\beta\xi' + \left(\frac{c_3}{m\omega_0^2} - \beta^2\right)\eta = e_2\beta^2 + \frac{g}{\omega_0^2}\sin\beta\tau,$$

$$\xi'' + \delta(\xi' - \beta\eta) - 2\beta\eta' + \left(\frac{c_3}{m\omega_0^2} - \beta^2\right)\xi = e_1\beta^2 + \frac{g}{\omega_0^2}\cos\beta\tau,$$

где $c_3 = m\omega_0^2 \frac{2(1+\mu)(1+\nu)}{\alpha(1+\mu)+2(1+\nu)} = m\omega_0^2 \frac{2(1-\mu)(1-\nu)}{\alpha(1-\mu)+2(1-\nu)}.$

Эти уравнения совпадают с уравнениями движения изотропного вала, поэтому зона неустойчивости между критическими скоростями стягивается в точку вследствие их равенства. Колебания с частотой 2β , вызываемые весом, также не возникают. Динамика ротора, установленного по схеме 3, с учетом сил неупругого сопротивления исследуется ниже.

Устойчивость движения ротора в жестких опорах

Укажем предварительно, что в такой же постановке устойчивость этой схемы была исследована в [1], где получены следующие результаты.

1. Движение устойчиво во всем диапазоне скоростей, за исключением интервала между критическими скоростями $\omega_1 = \sqrt{c_1 / m}$ и $\omega_2 = \sqrt{c_2 / m}$ или, в принятых здесь безразмерных параметрах, между $\beta_1 = \sqrt{1-\mu}$ и $\beta_2 = \sqrt{1+\mu}$.

2. С увеличением коэффициента внешнего демпфирования δ зона неустойчивости сужается и сдвигается в сторону более низких скоростей. Однако вывод о неограниченной устойчивости анизотропного ротора за второй критической скоростью ω_2 находится в противоречии с известным результатом, полученным в [1], о неустойчивости движения изотропного ротора в жестких опорах за критической скоростью. Поэтому проведем подробное исследование устойчивости дви-

жения ротора, установленного по схеме 1. Применяя метод D -разбиений, решение однородной (с нулевыми правыми частями) системы уравнений (5) отыскиваем в виде

$$\xi = A \exp(ip_0 \tau), \eta = B \exp(ip_0 \tau), \quad (11)$$

где A, B — произвольные постоянные; p_0 — частота колебаний на границе устойчивости во вращающейся системе координат; $i = \sqrt{-1}$.

Подстановка решений (11) в однородные уравнения (5) приводит к характеристическому определителю

$$\Delta = \begin{vmatrix} \beta_2^2 - \beta^2 - p_0^2 + i(\delta + k)p_0 & -\beta\delta - 2i\beta p_0 \\ \beta\delta + 2i\beta p_0 & \beta_2^2 - \beta^2 - p_0^2 + i(\delta + k)p_0 \end{vmatrix} = 0.$$

Так как Δ — комплексное число, равное нулю, должны равняться нулю его действительная и мнимая части, то есть:

$$p_0^4 - [2(1 + \beta^2) + (k + \delta)^2]p_0^2 + (\beta_1^2 - \beta^2)(\beta_2^2 - \beta^2) + \delta^2\beta^2 = 0, \quad (12)$$

$$[p_0^2 - 1 + \beta^2 - 2\delta\beta^2 / (k + \delta)]p_0 = 0. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что на границе зоны устойчивости частота колебаний, по форме которых происходит потеря устойчивости, равна 0. Подставив это значение p_0 в (12), получим уравнения двух границ зоны неустойчивости

$$\beta_{Г1,2}^2 = 0,5 \left[2 - \delta^2 \pm \sqrt{(2 - \delta^2)^2 - 4(1 - \mu^2)} \right]. \quad (14)$$

Уравнения (14) совпадают с уравнениями, полученными в [1]. Однако уравнения (14) показывают, что на устойчивость движения схемы 1 никак не влияет внутреннее трение. Это свидетельствует о неполноте исследования. Возвратимся поэтому к уравнению (13), из которого найдем зависимость другой, ненулевой частоты собственных колебаний на границе устойчивости от скорости вращения

$$p_0^2 = 1 - \beta^2 - 2\beta^2\delta / (k + \delta).$$

Подставив это выражение в (12), получим уравнение третьей границы области устойчивости:

$$\beta_{Г3} = \sqrt{(-b + \sqrt{b^2 - 4c}) / (2a)}, \quad (15)$$

где $a = (2k/\delta)^2$, $b = k^4/\delta^2 + 2k^3/\delta - 2k\delta - 4(k/\delta + 1)^2$, $c = -(k/\delta + 1)^2 [\mu + (k + \delta)^2]$.

Для получения действительных значений $\beta_{Г3}$ в уравнении (15) перед корнем в подкоренном выражении для $\beta_{Г3}$ следует брать знак «+».

Частота неустойчивых колебаний на третьей границе устойчивости определяется из уравнения (12) после подстановки в него $\beta = \beta_{Г3}$:

$$p_{03} = \pm \sqrt{-d - \sqrt{d^2 - f}},$$

где $d = -1 - \beta_{Г3}^2 - (k + \delta)^2 / 2$, $f = (\beta_1^2 - \beta_{Г3}^2)(\beta_2^2 - \beta_{Г3}^2) + \delta^2\beta_{Г3}^2$.

На рис. 3 сплошными жирными линиями показаны границы областей устойчивости движения анизотропного ротора в жестких опорах (штриховкой обозначены зоны неустойчивости). Как видно из рис. 3, вторая и третья границы пересекаются, откуда следует важный вывод: при малом внешнем демпфировании (в данном случае $\delta = 0,02$) движение неустойчиво во всем диапазоне за первой границей; причиной этой неустойчивости является внутреннее трение. При увеличении внешнего демпфирования движение становится вновь устойчиво за второй границей, но не во всем диапазоне скоростей, как это показано в [1], а лишь до третьей границы, после чего система окончательно теряет устойчивость.

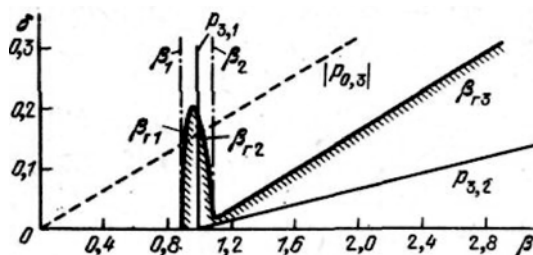


Рис. 3. Границы областей устойчивости движения схемы 1 при $\mu = 0,2$ и $k = 0,16$

Итак, ротор, установленный в жесткие опоры, имеет предел устойчивости, отодвигающийся в сторону больших скоростей при увеличении демпфирования. Частота $p_{01,2}$ развивающихся колебаний на первой и второй границах области устойчивости равна нулю во вращающейся системе координат, то есть равна частоте вращения в неподвижной системе, следовательно, на первой и второй границах система теряет устойчивость по форме прямой синхронной прецессии. График модуля частоты $|p_{03}|$ (во вращающейся системе координат) изображен на рис. 3 штриховой линией. Этим частотам соответствуют в неподвижной системе координат частоты $p_{3,1} = \beta_{Г3} - p_{0,3}$ и $p_{3,2} = \beta_{Г3} + p_{0,3}$, графики которых изображены сплошными линиями. Отметим, что при любом демпфировании $p_{3,1} = 1$, то есть частота равна усредненной критической скорости $p_{3,1} = (\beta_1 + \beta_2) / 2$.

Анализ результатов при других значениях коэффициента анизотропии μ упругого поля ротора показывает, что с увеличением μ ширина зоны неустойчивости между критическими скоростями β_1 и β_2 увеличивается; одновременно сдвигается в сторону более низких скоростей третья граница окончательной потери устойчивости.

Как следует из уравнений (14), в случае жестких опор ротора не существует практического способа подавления зоны неустойчивости $[\beta_{Г1} \text{ и } \beta_{Г2}]$, так как требуемое для этой цели искусственное введение внешнего демпфирования влечет за собой применение упругодемпферных опор, то есть переход к динамическим схемам 2 или 3 анизотропного ротора в упругих опорах.

Устойчивость движения ротора в невращающихся упругих опорах

Устойчивость движения этой модели без учета внутреннего и внешнего трения была исследована в [1], где обнаружена единственная зона неустойчивости между критическими скоростями ω_1 и ω_2 или в безразмерных параметрах между

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{2+\alpha(1-\mu)}} \text{ и } \beta_2 = \sqrt{\frac{2(1+\mu)}{2+\alpha(1+\mu)}}. \quad (16)$$

Результаты численного исследования [6] представлены на рис. 4 (внутри изображенного объема движение устойчиво). Сечение граничной поверхности устойчивости–неустойчивости плоскостью $\delta = 0,1$ показано на рис. 5, на котором также нанесен график модуля частоты $|p_{03}|$ на третьей границе. Частотам $\pm p_{03}$ соответствуют в неподвижной системе две частоты: $p_{3,1} = \beta_{Г3} - p_{03}$ и $p_{3,2} = \beta_{Г3} + p_{03}$. График частоты $p_{3,1}$ показан сплошной линией, график же частоты $p_{3,2}$ ввиду больших ее значений не изображен.

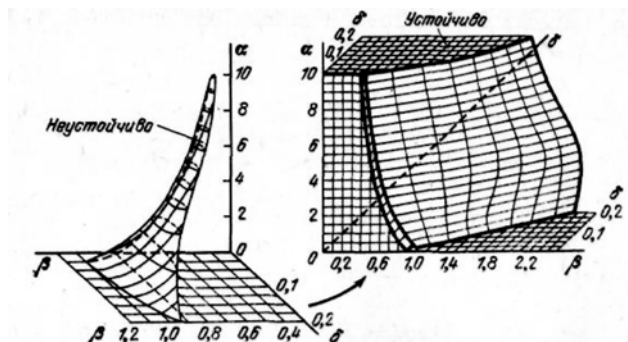


Рис. 4. Граничная поверхность областей устойчивости движения схемы 2 при $\mu = 0,16$ и $\mu = 0,2$

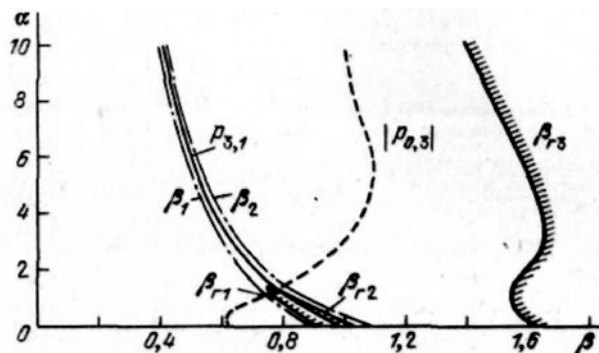


Рис. 5. Границы областей устойчивости движения схемы 2 при $\delta = 0,1$

Как и в случае жестких опор, на первой и второй границах устойчивости во вращающейся системе координат $p_{01} = p_{02} = 0$ или в неподвижной системе $p_1 = \beta_{r1}$ и $p_2 = \beta_{r2}$, то есть потеря устойчивости на этих границах происходит по форме прямой синхронной прецессии. Частота $p_{3,1}$ также является усредненной собственной частотой системы: $p_{3,1} \approx 0,5(\beta_1 + \beta_2)$, где β_1 и β_2 — критические скорости без учета демпфирования, определяемые выражениями (16). Кривые $\beta_1(\alpha)$ и $\beta_2(\alpha)$ показаны на рис. 5 штрихпунктирными линиями. Как следует из рис. 4 и 5, при естественном внешнем демпфировании, под которым следует понимать демпфирование с коэффициентом $\delta < 0,2$, с ростом податливости опор α зона неустойчивости между критическими скоростями подавляется уже при жесткости каждой опоры, примерно равной жесткости вала. Ширина интервала устойчивой работы достигает максимума при $\alpha \approx 3$. С увеличением внешнего демпфирования δ зона устойчивости примерно линейно расширяется. Обнаружение третьей границы дополняет результаты исследования устойчивости, полученные в [1].

Устойчивость движения ротора в опорах с вращающимся упругим полем

На рис. 6 изображены граничные поверхности устойчивости–неустойчивости в пространстве параметров α , β и ν , построенные по результатам численного исследования. Влияние коэффициента анизотропии ν упругого поля опор на устойчивость движения показано на рис. 7, на котором изображено сечение граничных поверхностей плоскостью $\alpha = 1$. Влияние коэффициента жесткости опор на устойчивость движения схемы 3 иллюстрирует рис. 8, на котором показаны сечения граничных поверхностей плоскостью $\nu = 0,07$. Наконец, влияние внешнего демпфирования δ на ширину зон устойчивости показано на рис. 9.

Кроме того, на рис. 7–9 штрихпунктирными линиями показаны критические скорости β_1 и β_2 , определяемые для схемы 3 без учета демпфирования формулами:

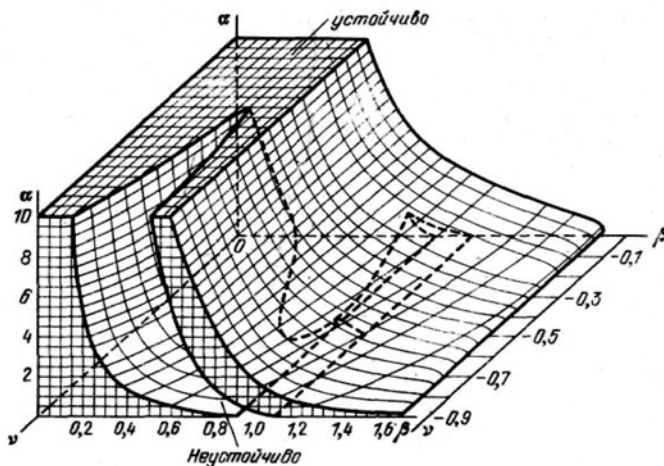


Рис. 6. Граничная поверхность области устойчивости движения схемы 3 при $\mu = 0,2$, $k = 0,16$ и $\delta = 0,1$

$$\beta_1 = \sqrt{2 \frac{2(1+\mu)(1+\nu)}{\alpha(1+\mu) + 2(1+\nu)}} \text{ и } \beta_2 = \sqrt{2 \frac{2(1-\mu)(1-\nu)}{\alpha(1-\mu) + 2(1-\nu)}}. \quad (17)$$

Как и для предыдущих схем, модуль частот $|p_{03}|$ колебаний на третьей границе изображен штриховой линией, а соответствующие им в неподвижной системе координат частоты $p_{3,1}$ и $p_{3,2}$ показаны сплошными тонкими линиями.

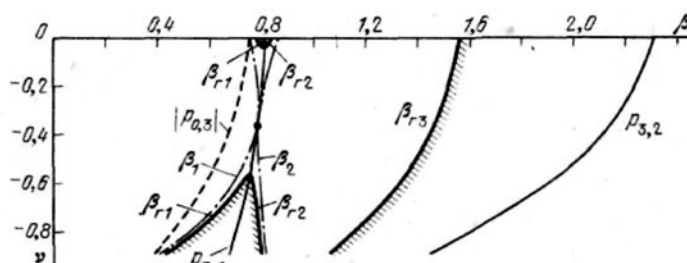


Рис. 7. Границы областей устойчивости движения схемы 3 при $\alpha = 1$ и $\delta = 0,1$

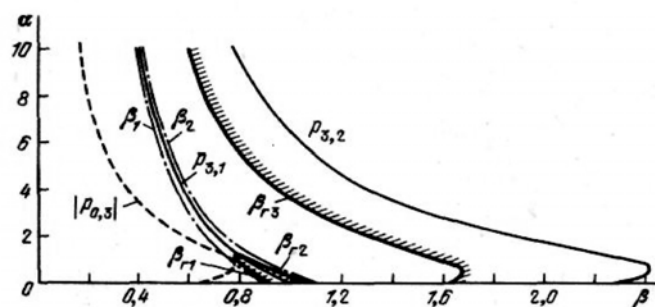


Рис. 8. Границы областей устойчивости движения схемы 3 при $\nu = -0,07$ и $\delta = 0,1$

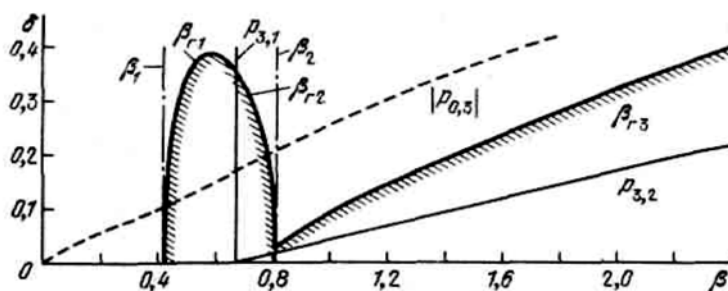


Рис. 9. Границы областей устойчивости движения схемы 3 при $\alpha = 1$ и $\nu = -0,9$

Анализ приведенных результатов показывает, что выбор значения коэффициента анизотропии ν вращающейся упругой опоры вблизи значения ν^0 , определяемого выражением (10) (см. рис. 2), гарантирует подавление зоны неустойчивости между критическими скоростями без специального введения внешнего демпфирования. При этом даже значительное несовпадение этих значений, то есть «расстройка» по коэффициенту ν не приводит к появлению неустойчивых колебаний в зоне $[\beta_1, \beta_2]$. Внешнее демпфирование усиливает этот эффект, и, кроме того, с ростом δ зона устойчивой работы расширяется примерно по линейному закону. Частоты собственных колебаний на всех трех границах подчинены тем же закономерностям, что и в двух предыдущих схемах.

Выводы

Прежде всего напомним, что количественные оценки верны для взятого в качестве примера случая $\mu = (c_1 - c_2) / (c_1 + c_2) = 0,2$ и $h = 0,16 m\omega_0$, то есть $k = 0,16$.

Проведенный анализ устойчивости движения показал, что для всех трех схем установки вала двоякой жесткости применим общий способ подавления зоны неустойчивости между критическими скоростями путем увеличения внешнего демпфирования. В схеме 1, где этот способ единственный, указанная зона исчезает при $\delta \geq 0,2$. В схеме 2 увеличение податливости опор позволяет подавить неустойчивость при меньших значениях внешнего демпфирования, то есть для этой схемы зона неустойчивости между β_1 и β_2 может быть подавлена двумя способами — увеличением либо δ , либо α .

Что касается схемы 3, то она в указанном смысле «безразлична» к жесткости опор и внешнему демпфированию, так как при любом α и любом малом (но не нулевом, а реальном) δ неустойчивость может быть подавлена путем выбора коэффициента анизотропии ν упругого поля опоры, близким по значению к ν^0 .

После подавления зоны неустойчивости между критическими скоростями возникает вопрос о ширине области устойчивой работы до окончательной потери устойчивости. В схеме 1 при $\delta = 0,2$ потеря устойчивости происходит при значении $\beta_{Г3} = 2,25$. С ростом внешнего демпфирования $\beta_{Г3}$ также растет, но, по-видимому, значения $\delta > 0,2$ соответствуют специальным мерам по увеличению демпфирования (см. рис. 3). В схеме 2 с увеличением податливости опор $\beta_{Г3}$ сначала увеличивается, достигая максимума при $\alpha \approx 3$, затем уменьшается. Ориентировочно зона устойчивости в 3–4 раза превышает среднюю критическую скорость. Увеличение внешнего демпфирования примерно линейно расширяет зону устойчивости, причем эта тенденция имеет место при любых значениях податливости опор (см. рис. 5). Наконец, в схеме 3 увеличение податливости опор резко сужает область устойчивости, доводя ее ширину до полутора критических скоростей ($\delta = 0,1$) (см. рис. 8). Увеличение внешнего демпфирования также почти линейно расширяет зону устойчивости при всех α . Максимальная ширина области устойчивого движения достигается при малых α в случае, если опоры близки к изотропным ($\nu \approx 0$); при большой податливости опор значение ν в этом смысле безразлично.

Во всех трех схемах потеря устойчивости на первых двух границах происходит по форме прямой синхронной прецессии, окончательная же потеря устойчивости на третьей границе — по форме прямой несинхронной прецессии с частотами $p_{3,1} = 0,5(\beta_1 + \beta_2)$ и $p_{3,2} = 2\beta_{Г3} - 0,5(\beta_1 + \beta_2)$, где $\beta_{Г3}$ — скорость вращения на третьей границе.

Итак, с позиции устойчивости движения оптимальной следует признать схему 2 с невращающимися упругими опорами, так как она позволяет подавить зону неустойчивости между критическими скоростями и обеспечить устойчивую работу в широком диапазоне скоростей без специального введения внешнего демпфирования.

Список литературы

1. Диментберг Ф. М. Изгибные колебания вращающихся валов / Ф. М. Диментберг. — М.: АН СССР, 1959. — 247 с.
2. Вибрации в технике: справ.: в 6 т. — М.: Машиностроение, 1980. — Т. 3: Колебания машин, конструкций и их элементов. — 544 с.
3. Цырлин А. Л. Динамика роторов двоякой жесткости / А. Л. Цырлин // Динамика гибких роторов. — М.: Наука, 1972.
4. Подшипник качения: А. с. 314009 СССР / Кельзон А. С., Лущик В. М., Циманский Ю. П. — Б. и., 1971. — № 27.

5. Кельзон А. С. Динамика ротора двоякой жесткости в упругих опорах / А. С. Кельзон, Б. Ф. Клочков // Динамика систем. — Горький, 1976. — Вып. 10.

6. Клочков Б. Ф. Вычислительные значения параметра на границе устойчивости решений системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений (алгоритм № П001219) / Б. Ф. Клочков // Алгоритмы и программы: информ. бюл. — М.: ВИНТИ, 1975. — № 2.

УДК 620.197:629.12(4)

В. Е. Леонов,
д-р техн. наук, профессор,
Херсонская государственная морская академия;

И. И. Рублев,
аспирант,
Херсонская государственная морская академия

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОРПУСОВ СУДОВ, ОБРАБОТАННЫХ ЭФФЕКТИВНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

STUDY OF CORROSION RESISTANCE OF METALLIC HULLS OF SHIPS TREATED BY EFFECTIVE FILLERS

В статье выполнен анализ существующих методов защиты металлических корпусов судов, разработано новое техническое решение по эффективному наполнителю, обладающему большей устойчивостью к коррозионной деструкции по сравнению со стандартными защитными покрытиями. Разработан и протестирован новый экологически безопасный для морской, окружающей среды наполнитель. Приведены практические способы использования данного покрытия, которое по сравнению с существующим стандартным покрытием обладает эластичностью. Данное покрытие не имеет аналогов в мире и обладает низкой стоимостью, поскольку в его состав входят отходы промышленности и сельского хозяйства. Покрытие, обладая высокой адгезией, способно удерживаться на металлической поверхности при различных параметрах внешней среды, что подтверждается проведенными экспериментами, описанными в данной статье.

In the article the analysis of existing methods for protecting metal hulls is carried out, a new technical solution for the effective filler having greater resistance to corrosive degradation in comparison with the conventional protective coatings is made. A new environmentally safe for marine, environmental filler is developed and tested. The practical uses of this coating, which as compared with the current standard coating is elastic are shown. This coverage does not have any existing analogues and has a relatively low cost because it is composed of industry and agriculture waste products. Covering having a high adhesion ability can keep on the metal surface with various parameters of the environment, as evidenced by the above experiments described in this article.

Ключевые слова: наполнитель, защитное покрытие, компонент наполнителя, сырая резина, агрессивная среда, коррозия, корпус, судно, металл, морская среда.

Key words: filler protective coating, filler component, crude rubber, aggressive environment, corrosion, corps, ship, steel, marine environment.

Введение

Металлы защищают от коррозии различными способами, в зависимости от условий эксплуатации напылением или нанесением на их поверхность специальных материалов. В зависимости от типа защитной пленки покрытия подразделяют на лакокрасочные, оксидные, металлические,

неметаллические, плакированные. Данная проблема приобрела особую актуальность в странах с промышленно развитой инфраструктурой и большим металлофондом, использованием в промышленности материалов в агрессивных средах, при высоких температурах, давлениях, что приводит к коррозионному растрескиванию, межкристаллитной коррозии, питтингам и в конечном счете к потере массы металла.

Актуальность исследования

Эффективность нового покрытия оценивается в целом как комплекс функциональных показателей противокоррозионных, противообрастающих, декоративных, износоустойчивых материалов в течение длительного времени его эксплуатации. Решающим фактором использования покрытия является его долговечность. Помимо этого, учитывается, что затраты на восстановление этого покрытия часто превышают ресурс затрат на его первоначальное нанесение, а качество покрытия после восстановления ниже.

Для исключения спорных вопросов между проектировщиками и эксплуатационниками следует разделять понятия «долговечность» и «гарантийный срок службы». Стандарт ISO [1] определяет эти понятия следующим образом:

«Долговечность — ожидаемый срок службы системы защитных покрытий до первого полного ремонтного восстановления. Это понятие технического характера, которое помогает владельцу обоснованно планировать техническое обслуживание окрашенного объекта».

«Гарантийный срок службы — понятие юридического характера, имеющее законную силу и являющееся предметом контракта между заказчиком и исполнителем работ. Это понятие определяет длительность эксплуатации окрашенного объекта, в течение которого исполнитель несет юридическую и финансовую ответственность за обеспечение защитных и/или декоративных качеств системы покрытия по конкретным параметрам: сохранность покрытия на определенной площади, сопротивление, цвет, блеск.

Если стоит задача получить высококачественное покрытие, то нецелесообразно экономить на подготовке поверхности под окраску, хотя качественная дробеструйная обработка стоит дорого — в среднем расходы составляют 60–70 % от общих расходов по нанесению покрытия, включая стоимость материалов [2].

В процессе эксплуатации судов корпус их покрывается слоем продуктов биообрастания. Продукты биообрастания корпусов судов ускоряют процессы коррозии [3; 4, с. 197–199; 5, с. 87–91]. Биообрастание подводной части корпусов судов негативно отражается на последующем режиме эксплуатации, которое, в свою очередь, приводит к снижению мореходных качеств судна, увеличению балластной массы, ухудшению технико-экономических показателей рейса, увеличению расхода топлива.

Постановка задачи

Заменить дорогостоящую и экологически опасную процедуру покраски корпусов судов на эффективные способы защиты. Экономически проще наносить качественные покрытия, пользуясь высококачественными эластичными материалами. Затраты между периодами докования будут меньше за счет увеличения времени пробега покрытия.

Задачей данного исследования является создание покрытия, способного сохранять целостную структуру, предотвращающую доступ агрессивной морской среды и окислителей к поверхности металла. В общей стоимости окрашивания объекта и эксплуатационных затрат весьма большую роль играет качество покрасочного материала и относительно небольшую роль — ее цена. Например, стоимость качественной окраски с предварительной дробеструйной обработкой составляет от 30 до 50 долл. за 1 м², в том числе стоимость хорошей краски, расходуемой на 1 м²,

составляет в среднем около 4 долл., а это около 10 % от стоимости окраски. Использование дешевой краски невысокого качества позволит снизить общие расходы на 4–6 %, но приведет к необходимости более частого возобновления покрытия.

Покрытие должно содержать экологически безопасные материалы, которые не загрязняют морскую среду, особенно соединениями тяжелых металлов, поэтому **целью эксперимента** является создание экологически безопасного и экономически обоснованного покрытия. Поскольку в настоящее время основным средством противокоррозионной защиты корпусов судов являются лакокрасочные покрытия, то вполне понятно, насколько важны и актуальны вопросы применения эффективных, безопасных материалов для наполнителей и качественного их нанесения [1–3].

Методика эксперимента

Для исследований выбраны образцы материала, изготовленные из прокатной листовой стали марки Ст-20, предварительно механически очищены от следов грязи, ржавчины, жира. Для определения веса были использованы лабораторные электронные весы марки VTU-210 Axis 3 класса точности с абсолютной погрешностью 0,005 г.

Взвешивание экспериментальных образцов проводилось с дальнейшим расчетом абсолютной и относительной погрешности, результаты исследований приведены в работе [4].

Исследование коррозии проводилось весовым методом. Стандартный образец № 1 был механически очищен, обезжирен и покрыт железным суриком, после просушки покрыт алкидной эмалью ПФ-115, принят в качестве стандартного образца.

Второй образец очищен, обезжирен и покрыт экспериментальной однородной смесью в составе сырой резины и наполнителя растительного происхождения в соотношении 1:1 по массе. Покрытие производилось в три слоя с интервалом просушки 3–5 мин.

Третий образец был очищен, обезжирен и покрыт экспериментальной однородной смесью в составе сырой резины и наполнителя растительного происхождения в соотношении 1:1 и после просушки покрыт алкидной эмалью ПФ-115. Для ускорения процесса «старения» покрытия диапазон параметров эксперимента был ужесточен, в частности по значению температуры.

В ходе третьего эксперимента новое покрытие прореагировало с алкидной эмалью ПФ-115, образовав вязкую пленку, имеющую вид «незастывшей» фазы твердого покрытия.

Исследования образцов проводились при различных параметрах микроклимата. Для имитации различных условий эксплуатации, а также для ускорения условий разрушения и «старения» покрытия применялись повышенные температуры. На воздухе при температуре 21 °С, относительной влажности 72 % в течение трех недель.

В морской воде при температуре 20 °С, солесодержании морской воды 39 ppm (для условий Средиземного моря) в течение двух месяцев, в морской воде при температуре 46 °С в течение двух недель. Температура поддерживалась ежедневно с помощью специальной установки в период с 09.00 до 17.00.

В морской воде при температуре 4 °С в течение одной недели непрерывно.

На воздухе при температуре 35 °С под воздействием солнечных лучей — полтора месяца.

До и после экспериментов проводилась фотосъемка поверхностей образцов на наличие трещин и образование зон дислокации при помощи микроскопа. Анализ поверхности стандартного и экспериментального образцов произведен бинокулярным микроскопом 40-1000x 9011 80 00 00 XSM-20. Результаты подготовки стандартных и экспериментальных образцов взвешивания компонентов наполнителя приведены в [5].

Микрофотографии образцов после испытаний на воздухе приведены на рис. 1. Снимки выполнены с кратностью увеличения 40х. Образцы после испытаний в морской воде приведены на рис. 2. Образцы после всего цикла испытаний приведены на рис. 3.

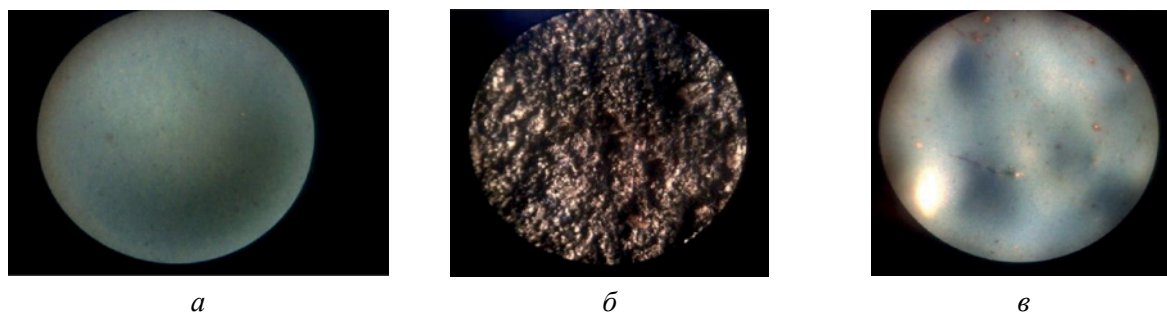


Рис. 1. Микрофотографии: *а* — стандартный образец № 1; *б* — экспериментальный образец № 2; *в* — экспериментальный образец № 3 (до экспериментов)

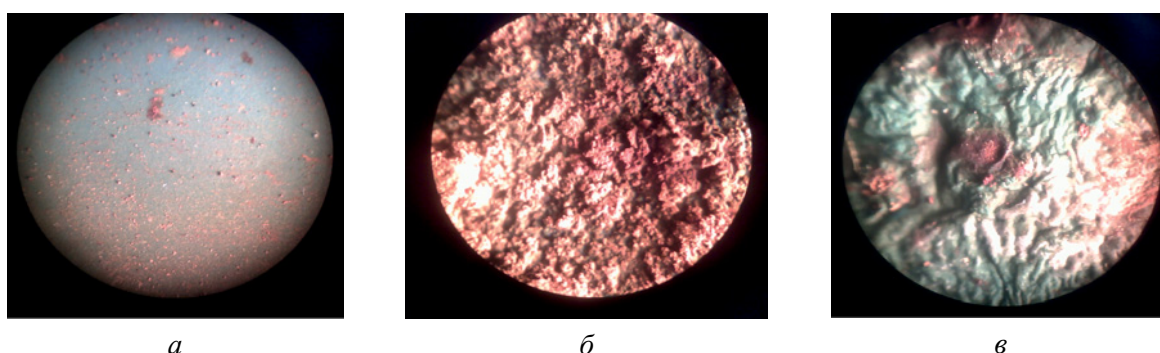


Рис. 2. Микрофотографии: *а* — стандартный образец № 1; *б* — экспериментальный образец № 2; *в* — экспериментальный образец № 3

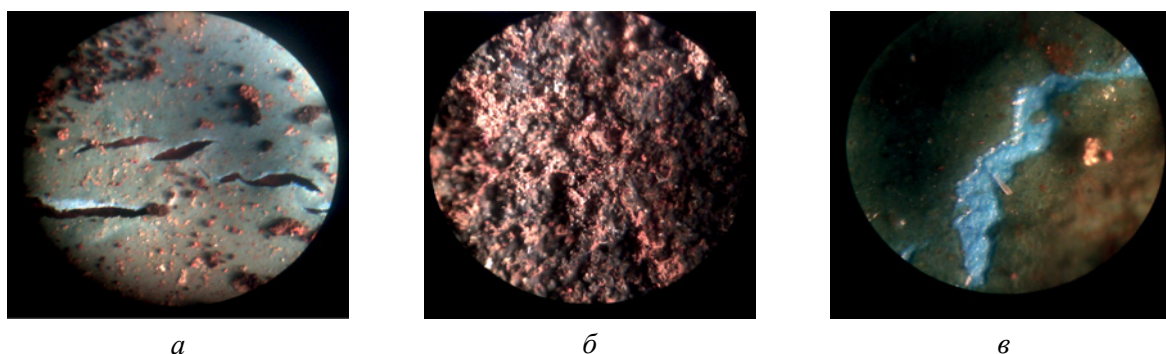


Рис. 3. Микрофотографии: *а* — стандартный образец № 1; *б* — экспериментальный образец № 2; *в* — экспериментальный образец № 3 (после всех экспериментов)

При обработке образцов на воздухе, в морской воде под воздействием температур на рис. 3, *а, в* очевиден результат реакции защитного покрытия на объемное расширение металла и самого покрытия. В экспериментальном образце № 1 произошел разрыв защитного слоя, что привело к разрушению целостности покрытия, а экспериментальный образец № 3, имея достаточную эластичность и высокую вязкость, сохранил целостность покрытия (рис. 3, *а, в*).

Для определения массы металла после экспериментов на воздухе и в морской воде необходимо было предварительно удалить защитное покрытие.

Удаление защитного слоя проводилось с помощью органического растворителя СП-6 в течение суток. Через сутки все образцы переворачивались и слабым усилием полимерного скребка

удалялись остатки защитного покрытия. После процедуры снятия покрытия с экспериментально-го и стандартного образцов использовался раствор ортофосфорной кислоты для удаления остатков оксидов металла — продуктов коррозии металла.

Вес очищенных пластин до и после экспериментов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Массы образцов до и после экспериментов

Образцы	Исходный вес образцов до эксперимента, г	Образцы после снятия покрытия, г	Разность изменения масс, Δm , г
1. Образец (стандартный) грунтовка + краска	44,014	41,364	–2,65
2. Образец (без покрытия)	44,6006	39,831	–4,7696
3. Образец новый (наполнитель + краска)	43,051	41,707	–1,344

Расчет скорости коррозии металла корпуса судов, r , произведен по формуле

$$r = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \cdot \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}},$$

где Δm — изменение массы образца, г; S — площадь образца, м^2 ; τ — время эксперимента, год.

$$r_1 = \frac{2,65}{2 \cdot 0,0075 \cdot \frac{3}{12}} = 706,67 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}};$$

$$r_2 = \frac{4,76}{2 \cdot 0,0068 \cdot \frac{3}{12}} = 1400 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}};$$

$$r_3 = \frac{1,34}{2 \cdot 0,0071 \cdot \frac{3}{12}} = 372,43 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}},$$

где $\tau = 3$ — время проведения эксперимента, мес; индексы 1, 2 и 3 соответствуют номерам образцов в табл. 1

$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{706,67}{372,43} = 1,897 \text{ раз (1,9 раза).}$$

Скорость коррозии металла, покрытого новым эластичным наполнителем, снижается по сравнению со стандартной защитой металла в 1,9 раза.

Выводы

1. Разработан состав нового эластичного покрытия на металлические поверхности с использованием промышленных и сельскохозяйственных отходов.
2. Приготовлены опытные образцы покрытий для металлов, обработанных традиционным и новым наполнителем.
3. Новое покрытие способно сохранять целостную структуру при различных параметрах внешней среды, при длительном сроке эксплуатации в морской среде при различных температурах.
4. Срок службы основного металла, покрытого новым композиционным материалом, выше, чем образца, покрытого традиционным наполнителем.
5. Скорость коррозии металла, обработанного новым наполнителем, в сопоставимых условиях в морской среде в 1,9 раза меньше скорости коррозии металлических корпусов судов, покрытых традиционным наполнителем.
6. Рекомендуется провести испытания нового наполнителя на судах в штатных условиях эксплуатации, в морской среде.

Список литературы

1. Стандарт ISO 12944-1 (Лаки и краски. Защита от коррозии стальных конструкций системами защитных покрытий — International Organization for Standardization ISO Central Secretariat). — 1998. — 19 с.
2. *Леонов В. Е.* Основы экологии и охрана окружающей среды: моногр. / В. Е. Леонов, В. Ф. Ходаковский, Л. Б. Куликова; под ред. В. Е. Леонова. — Херсон: Изд-во ХГМИ. 2010. — 352 с.: рос. мовою.
3. Обеспечение безопасности плавания судов и предотвращение загрязнения окружающей среды: моногр. / В. И. Дмитриев [и др.]; под ред. В. И. Дмитриева, В. Е. Леонова. — Херсон : ХГМА, 2012. — 397 с.: рос. мовою.
4. *Леонов В. Е.* Исследование и разработка стойких экологически безопасных покрытий корпусов судов / В. Е. Леонов, И. И. Рубльов // *Фундаментальные и прикладные науки сегодня: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* — М., 2013. — С. 197–199. = *Fundamental and applied sciences today.* — North Charleston, SC, USA: LaCross Road, 29409. — Vol. 2: Create Space 4900.
5. *Леонов В. Е.* Методика исследования и разработки стойких экологически безопасных покрытий корпусов судов / В. Е. Леонов, И. И. Рублев // *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції.* — Херсон: Видавництво ХДМА, 2012.
6. Актуальность и экономические аспекты проблемы коррозии и защиты металлических сооружений: ст. на сайте ООО «Промкраска ТЦ». — М., 2010 — [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://pkraska.ru/articles/view/korroziya>
7. *Гуревич Е. С.* Защита от обрастания / Е. С. Гуревич. — М.: Наука, 1989. — Кн. 1. — 432 с.
8. Разработка новых композиционных материалов. — Тверь: ТГТУ, 1999. — Кн. 2: Анализ степени воздействия ионизирующих излучений различного спектрального состава на жизнеспособность подводной флоры и фауны. — Ч. 3: Экспериментальные исследования степени воздействия ионизирующих излучений на подводную микрофлору. — 239 с.

УДК 629.5.067: 656.611.052

В. В. Вычужанин,
д-р техн. наук, профессор,
Одесский национальный
морской университет;

В. Д. Бойко,
ст. преподаватель,
Одесский национальный
морской университет;

Н. Д. Рудниченко,
аспирант,
Одесский национальный
морской университет

МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕЖАГРЕГАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА СТРУКТУРНУЮ ЖИВУЧЕСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

METHOD OF ESTIMATING THE IMPACT ON THE STATE OF INTER-AGGREGATE BONDS ON STRUCTURAL ROBUSTNESS OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS

В статье рассматривается разработка и обоснование принципов, критериев и метода оценки влияния состояния межагрегатных связей на структурную живучесть сложной технической системы, проектирование и реализация алгоритма оценки живучести на базе разработанных принципов, критериев и метода, описание программных аспектов реализации метода и определение возможных дальнейших путей развития метода оценки живучести сложных технических систем.

The article discusses the development and substantiation of principles, criteria and method for assessing the impact of the state of inter-aggregate bonds for structural survivability of complex technical system, the design and implementation of the algorithm determining the survivability based on the developed principles, criteria and method, a description of the programmatic aspects of the method and identifies possible ways of further development of methods to evaluate the survivability of complex technical systems.

*Ключевые слова: живучесть, межагрегатные связи, графы, сложные технические системы.
Key words: survivability, inter-aggregate communication, graphs, complex technical systems.*

ТРАДИЦИОННО проектировщиками судно рассматривается как сложная система с многоуровневой структурой, состоящей из взаимодействующих между собой и внешней средой агрегатов (подсистемы и соответствующие связи между ними) [1, с. 12–15]. То есть судно можно представить в двух различных формах: в виде материальной системы с четко выраженными подсистемами и реальными связями между ними; в виде системы, состоящей из условных функциональных подсистем, предназначенных для выполнения определенных функций, в которых системообразующие связи не существуют. Для последней формы представления характерной является роль управляющего оператора — человека. Такой подход позволяет исследовать процесс обеспечения живучести судна после его аварийного повреждения.

Анализ литературных источников [1; 2; 3, с. 20–22; 4, с. 173–175] показывает, что живучесть судна во многом зависит от надежности судовых подсистем, а также от эффективных действий экипажа при борьбе за его живучесть. Ввиду того, что привычные методы резервирования всех агрегатов для повышения надежности и живучести судовых технических систем (СТС) не всегда возможно реализовать из-за ограниченного судового пространства и высокой стоимости оборуд-

дования, актуальным является определение наиболее уязвимых (критичных) агрегатов СТС в различных аварийных сценариях.

Для обеспечения живучести СТС их необходимо рассматривать во взаимосвязи друг с другом, с учетом количественного и качественного информационно-энергетического взаимодействия. Такой подход позволяет оптимизировать время поиска возникшей неисправности в реальной аварийной ситуации и выявить взаимозависимость всех агрегатов технической системы от конкретного критичного агрегата.

Для оценки живучести взаимозависимых СТС актуальным является разработка и исследование математических моделей, учитывающих реальную технологическую взаимозависимость технических систем судна. Для успешного подобного исследования может быть использовано когнитивно-имитационное моделирование технических систем (ТС) [3; 4].

Однако когнитивно-имитационные модели ТС, предложенные в [3; 4], рассматривают только влияние состояния агрегатов на общую живучесть системы. При этом не учитываются технологические связи и коммуникации между агрегатами ТС, которые оказывают существенное влияние на живучесть системы в целом [5, с. 113–117].

Рассмотрим сложную СТС, представляющую собой либо функциональный комплекс СТС, либо взаимосвязь этих комплексов. Агрегаты СТС взаимодействуют между собой по межагрегатным связям (МС) — трубопроводам, линиям передачи энергии и информации и т. д., которые передают энергию, информацию либо вещество [6, с. 40–43].

Функциональное состояние МС (исправность, надежность, работоспособность) и структурные аспекты построения МС (структура, топология, взаимосвязь со смежными системами) непосредственно сказываются на живучести СТС. Поэтому при разработке критериев оценки живучести СТС следует выделить две основные категории живучести — структурные (рассматривающие влияние на общую живучесть структурных аспектов построения МС) и функциональные (рассматривающие влияние на общую живучесть функционального состояния МС). В качестве оценки влияния состояния МС на обе категории критериев живучести используем понятие угрозы — безразмерной немасштабной оценки «важности» («уязвимости») состояния МС на структурную либо функциональную живучесть системы в целом.

Представим СТС в виде связанного, цветного, ориентированного графа (орграфа), в котором направленные дуги (ребра графа) выполняют функцию МС. Каждому агрегату СТС соответствует узел орграфа, каждой МС — направленная дуга, направление которой совпадает с направлением передачи энергии–вещества–информации (ЭВИ), а цвет дуги соответствует характеру связи.

Основной задачей разработанного метода является оценка влияния состояния отдельной МС на общую функциональную и структурную живучесть СТС, то есть оценка функциональных и структурных угроз МС. По аналогии со структурной и функциональной угрозами агрегатов СТС используем для оценки степени угроз коэффициенты структурной и функциональной угроз, численно выражающие степень этих угроз на интервале (0–1). Для значения коэффициента 0 состояние МС не сказывается на живучести СТС, а для значения 1 живучесть СТС определяется состоянием МС.

Рассмотрим граф, соответствующий одному цвету дуг (одна из составляющих ЭВИ), $G = (V, E)$, моделирующий СТС, состоящую из набора узлов и соединяющих их дуг:

$$V = (v_i), i = 1, \dots, n,$$

$$E = (e_{ij}), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n,$$

где V — множество узлов системы;

E — множество направленных дуг системы;

v_i — узел с номером i ;

e_{ij} — ребро графа, направленное от узла v_i к узлу v_j ;

n — количество узлов в орграфе.

Узлы (вершины) орграфа моделируют состояние агрегатов, причем вес каждого узла v_i соответствует его функциональному состоянию. Направленные дуги (ребра) орграфа моделируют МС, причем вес каждой дуги v_{ij} соответствует ее функциональному состоянию, а направление дуги обозначается порядком индексов i и j . Таким образом, дуга e_{ij} направлена от i -го узла v_i к j -му узлу v_j .

В простом случае, когда рассматриваются только дискретные состояния узлов и дуг (по бинарной шкале значений «исправен–не исправен») для момента дискретного времени $t = 0$, все значения весов узлов и дуг равны единице:

$$v_i = 1, i = 1, \dots, n,$$

$$e_{ij} = 1, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n.$$

Для оценки структурной угрозы и вычисления коэффициента структурной угрозы используется метод поражающего моделирующего импульса (ПМИ), используемый для решения задачи оценки структурных угроз МС. ПМИ моделирует поражение отдельного ребра и задается вектором

$$I(t) = (imp_{ij}(t)), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, t = t_1, \dots, t_d,$$

где $imp_{ij}(t)$ — набор значений модулей ПМИ, соответствующих направленным дугам орграфа;

t — момент дискретного времени;

t_1 — начальный момент дискретного времени;

t_d — конечный момент дискретного времени.

В каждый из моментов дискретного времени t вектор модулей ПМИ $I(t)$ задается таким образом, что для каждой дуги e_{ij} в момент дискретного времени t_z существует $imp_{ij}(t_z)$, равный нулю, если на момент t_z импульс не проходит по дуге, и единице, если импульс поражает дугу.

На начальном этапе исследований производится выбор поражаемой дуги e_{ab} (моделируется поражение МС между агрегатами с номерами a и b каким-либо внешним фактором). Далее создается вектор $I(t)$, в котором для момента дискретного времени $t = 1$ модули ПМИ имеют следующие значения:

$$imp_{ij}(t = 1) = 1, \text{ для } i = a, j = b,$$

$$imp_{ij}(t = 1) = 0, \text{ для } i \neq a, j \neq b,$$

ПМИ последовательно распространяется по орграфу, выводя из строя смежные узлы и дуги на каждом очередном шаге дискретного времени. При этом дуга и узел меняют свое значение с единицы («исправен») на нуль («не исправен»), а значения модулей вектора $I(t)$ отражают прохождение ПМИ по узлам на каждый дискретный момент времени вдоль направленных ребер графа. Импульсное воздействие ПМИ на дугу орграфа определяется рекуррентным соотношением вида

$$\frac{e_{ij}(t_n)}{e_{ij}(t_{n-1})} = 1 - imp_{ij}(t_n),$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

$$t = 0, 1, 2, 3,$$

где $e_{ij}(t)$ — значение веса (передаточный коэффициент) дуги e_{ij} в дискретный момент времени t .

При прохождении по дуге e_{ij} модули значений ПМИ будут связаны следующим соотношением для двух дискретных моментов времени t и $t + 1$:

$$imp_{ij}(t + 1) = imp_{ij}(t)e_{ij}(t).$$

Таким образом, при распространении по системе импульс ослабляется в зависимости от весов дуг орграфа СТС. В рассматриваемом случае веса дуг принимают бинарные значения (нуль либо единица) в зависимости от исправности дуги. С целью моделирования промежуточных состояний частичной исправности МС алгоритм ПМИ предусматривает использование широкого диапазона весов.

После прохождения по дуге соответствующее значение модуля ПМИ меняется на нулевое — как отработавшее по данной дуге. Критерием окончания действия ПМИ является нулевое значение суммы модулей $I(t)$ в момент времени t_d :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{imp}_{ij}(t_d) = 0.$$

Коэффициент структурной угрозы по связям (КСС) для заданной МС вычисляется как отношение пораженных связей системы ко всем связям системы при поражении рассматриваемой МС и беспрепятственном распространении импульса по системе.

Пусть после поражения МС e_{ij} распространяющимся импульсом будет поражено i_s связей, а общее количество связей в графе N_s , получим следующее выражение для коэффициента угрозы k_s :

$$k_{ss}(e_{ij}) = \frac{i_s}{N_s},$$

где i_s — число пораженных ПМИ связей;

N_s — общее количество связей в графе;

$k_{ss}(e_{ij})$ — коэффициент структурной угрозы по связям для узла e_{ij} .

Коэффициент структурной угрозы по агрегатам (КСА) для заданной МС вычисляется как отношение пораженных агрегатов системы ко всем агрегатам системы, при поражении рассматриваемой МС и беспрепятственном распространении импульса по системе.

Пусть после поражения МС e_{ij} распространяющимся импульсом будет поражено i_a узлов, моделирующих агрегаты СТС, а общее количество узлов в графе N_a . В результате получим следующее выражение для коэффициента угрозы k_s :

$$k_{sa}(e_{ij}) = \frac{i_a}{N_a},$$

где i_a — число пораженных ПМИ агрегатов;

N_a — общее количество агрегатов в графе;

$k_{sa}(e_{ij})$ — коэффициент структурной угрозы по связям для узла e_{ij} .

Рассмотрим применение разработанного метода на примере СТС, состоящей из 21 агрегата, связанных между собой сложными межагрегатными связями единого характера. На рис. 1 приведен граф обобщенной СТС, а на рис. 2 и 3 — конечные стадии поражения связей между узлами 1 и 5 и 2 и 6 соответственно. Вышедшие из строя связи графа обозначены пунктиром.

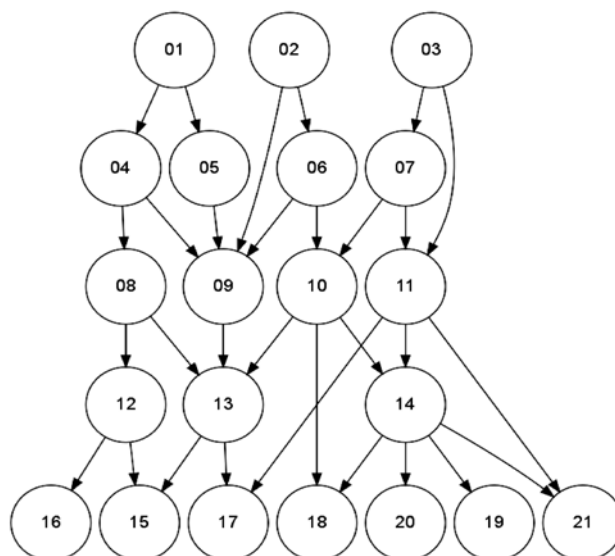


Рис. 1. Орграф обобщенной СТС

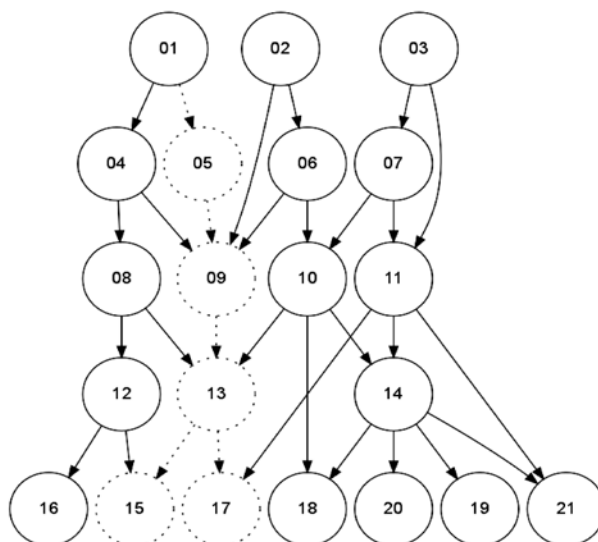


Рис. 2. Конечная стадия поражения МС между агрегатами 1 и 5 соответственно

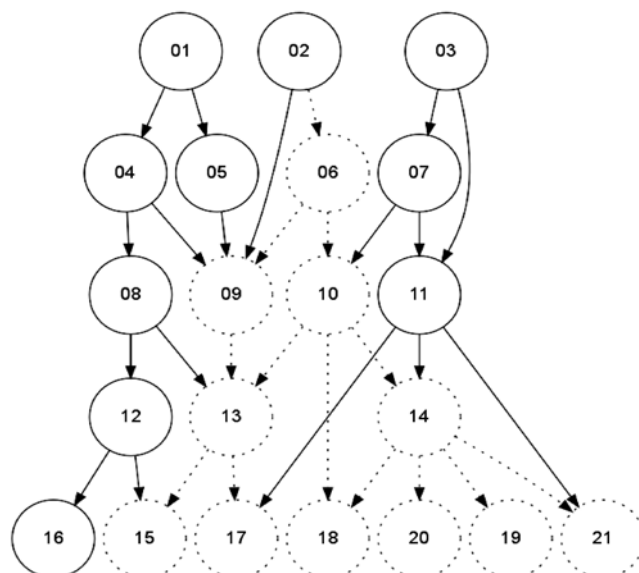


Рис. 3. Конечная стадия поражения МС между агрегатами 2 и 6 соответственно

Для случая поражения связи между агрегатами 1 и 5 установлено число пораженных связей $i_s = 5$, агрегатов $i_a = 5$. Для случая поражения связи между агрегатами 2 и 6 пораженные связи и агрегаты составят $i_s = 5$ и $i_a = 5$ соответственно. Общее число связей и агрегатов в системе $N_s = 17$ и $N_a = 21$. В результате значения КСС и КСА для первого и второго случаев:

$$k_{ss}(e_{1,5}) = \frac{i_s}{N_s} = \frac{5}{17} \approx 0.2941,$$

$$k_{sa}(e_{1,5}) = \frac{i_a}{N_a} = \frac{5}{21} \approx 0.2381,$$

$$k_{ss}(e_{2,6}) = \frac{i_s}{N_s} = \frac{12}{17} \approx 0.7059,$$

$$k_{sa}(e_{2,6}) = \frac{i_a}{N_a} = \frac{11}{21} \approx 0.5238.$$

Из приведенных оценок следует, что, несмотря на одинаковый уровень в иерархии СТС, связь между агрегатами 2 и 6 почти вдвое приоритетнее, чем связь между агрегатами 1 и 5.

Для реализации методики ПМИ для оценки структурных угроз МС был разработан алгоритм распространения ПМИ по связям СТС (рис. 4).

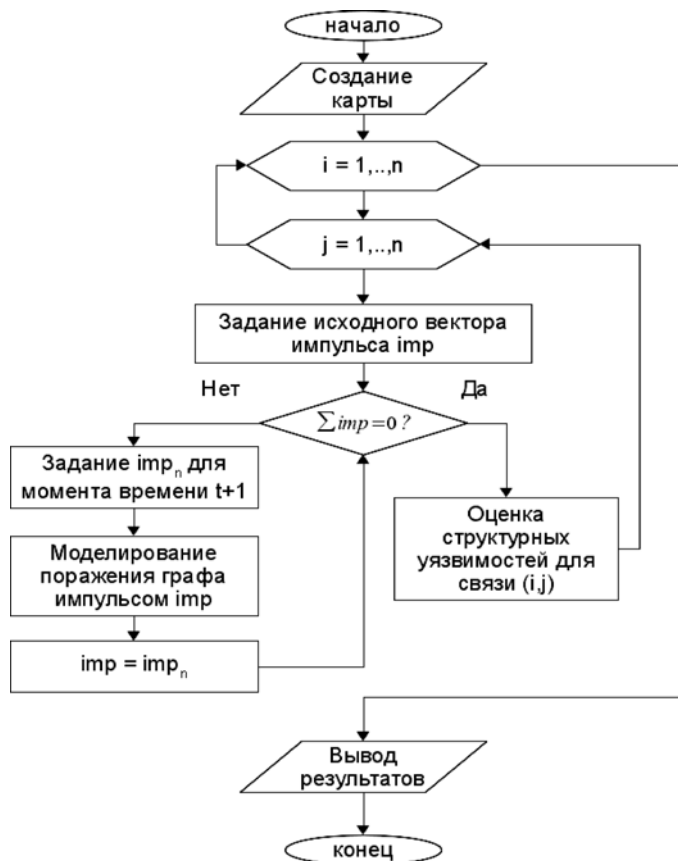


Рис.4. Алгоритм оценки структурных угроз МС СТС

В целях сокращения времени разработки программной реализации алгоритма оценки структурных угроз МС СТС, решения вопросов лицензирования и стоимости ПО были максимально задействованы сторонние утилиты, а также программное обеспечение с открытым исходным кодом. В качестве среды моделирования работы ПМИ выбран язык Python. Для автоматизации моделирования и экономии времени разработки задействованы утилиты GNU make и язык визуализации ggraphviz. В процессе моделирования с помощью программы sv.py считываются данные из файла в json-формате, на основании которых строится и оценивается модель орграфа СТС. Результатом работы программы являются файлы в форматах .dot (графические диаграммы прохождения ПМИ) и .csv (табличная информация о прохождении ПМИ по СТС).

Представление данных моделируемого графа осуществляется с помощью файла в формате JSON, в котором задаются исходные параметры моделируемой системы. В частности, определения вида узлов и связей для СТС (рис. 1) выглядят следующим образом:

```

{
  ...
  «v»:
  {
    «01»: {«04»:1, «05»:1},
    «02»: {«06»:1, «09»:1},
    «03»: {«07»:1, «11»:1},
    «04»: {«08»:1, «09»:1},
  
```

```

«05»:{«09»:1},
«06»:{«09»:1, «10»:1},
«07»:{«10»:1, «11»:1},
«08»:{«12»:1, «13»:1},
«09»:{«13»:1},
«10»:{«13»:1, «14»:1, «18»:1},
«11»:{«14»:1, «21»:1, «17»:1},
«12»:{«15»:1, «16»:1},
«13»:{«15»:1, «17»:1},
«14»:{«18»:1, «19»:1, «20»:1, «21»:1},
«15»:{},
«16»:{},
«17»:{},
«18»:{},
«19»:{},
«20»:{},
«21»:{}
},
...
}

```

Кроме узлов СТС и связей между ними, в файле задаются исходные данные, названия и веса узлов, название моделируемой системы и прочие служебные параметры. Это позволяет гибко изменять модель СТС, не меняя основного исходного кода программы.

Основная программа организована по модульному принципу и включает в себя основную часть (модуль `main()`), вспомогательные функции и модуль моделирования ПМИ. Набор вспомогательных функций содержит следующие функции: `MakeEdge` — генерирует список дуг графа и их весов, `GetJson` — выполняет анализ JSON-файла и строит на его основе орграф СТС; `AddToCsvFile` — используется для сбора информации в csv-файлы; `Impuls` — моделирует прохождение ПМИ по орграфу для заданной МС.

«Изюминкой» построения алгоритма является нумерация дуг орграфа, которая осуществляется с помощью словарей (`dictionary`) языка Python, в которых в качестве ключа вхождения используется тип данных «кортеж» (`tuple`), состоящий из двух элементов — названий начального и конечного узла дуги. В частности, для орграфа, приведенного на рис. 1, такой массив выглядит следующим образом:

```

{('01', '04'):1, ('01', '05'):1, ('02', '06'):1, ('02', '09'):1, ('03', '07'):1, ('03', '11'):1, ('04', '08'):1, ('04', '09'):1, ('05', '09'):1, ('06', '09'):1, ('06', '10'):1, ('07', '10'):1, ('07', '11'):1, ('08', '12'):1, ('08', '13'):1, ('09', '13'):1, ('10', '13'):1, ('10', '14'):1, ('10', '18'):1, ('11', '14'):1, ('11', '17'):1, ('11', '21'):1, ('12', '15'):1, ('12', '16'):1, ('13', '15'):1, ('13', '17'):1, ('14', '18'):1, ('14', '19'):1, ('14', '20'):1, ('14', '21'):1}

```

Такое представление облегчает формирование массива данных по дугам орграфа и работу с ними, поскольку дает возможность организовывать списки дуг автоматизированно на основе исходной матрицы орграфа, а также вести их обработку при моделировании прохождения ПМИ. В частности, упомянутая выше подпрограмма `MakeEdge` получается компактной, как по быстрдействию, так и по форме:

```

def MakeEdge(v,Vs,e):
    for i in Vs:
        if len(v[i]) > 0:
            ishod = v[i].keys()

```

```
ishod.sort()  
for j in ishod:  
    e[(i,j)] = v[i][j]
```

На вход этой программы подаются словари v и e , а также упорядоченный список вершин V_s . Изначально словарь e пуст, а словарь v содержит данные, полученные из json-файла. Если существует связь между узлами i и j в процессе анализа орграфа, в словарь e добавляется пара «ключ-значение» в формате $(i,j):1$. То есть обеспечивается возможность формировать списки связей для любой возможной конфигурации, заданной в исходном json-файле.

Таким образом, были разработаны принципы, критерии и методика оценки влияния состояния межагрегатных связей на живучесть СТС. Разработан и реализован алгоритм оценки структурной живучести на базе метода оценки влияния состояния межагрегатных связей, описаны программные особенности реализации метода. Полученные результаты станут основой в дальнейшей разработке метода оценки влияния МС на живучесть неиерархических СТС, в которых возможно возникновение контуров и паттернов взаимодействия замкнутого характера и оценка СТС, в которых связи представлены небинарными параметрами.

Список литературы

1. *Безнос Л. А.* Системный подход к обеспечению живучести судна / Л. А. Безнос // Судостроение. — 1982. — № 1.
2. *Сергиенко Л. И.* Электроэнергетические системы морских судов / Л. И. Сергиенко, В. В. Миронов. — М.: Транспорт, 1991. — 264 с.
3. *Бойко В. Д.* Система контроля и оценки живучести оборудования корабля на основе функционально-когнитивной модели / В. Д. Бойко, В. В. Вычужанин // Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ–2012): науч.-практ. конф. — Одеса, 2012.
4. *Бойко В. Д.* Оцінка структурних загроз за допомогою поразяючого моделюючого імпульсу / В. Д. Бойко, В. О. Савченко // Інформатика, інформаційні системи та технології: десята Всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців. — Одеса, 2013.
5. *Колоколова В. А.* Алгоритмы и программные средства проектирования функционально-топологических структур распределенных систем по критериям живучести (на примере корабельных систем) / В. А. Колоколова, П. В. Холодных, И. П. Симаков // Вычислительные, измерительные и управляющие системы: сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2010.
6. *Ярошенко А. В.* Математическое описание технологической взаимозависимости всех систем и механизмов корабля и алгоритм его практического применения / А. В. Ярошенко // Судостроение. — 2000. — № 1.

УДК 621.822

В. Ю. Иванов,
ст. преподаватель,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ПРОУШИН ШАРНИРНЫХ УЗЛОВ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

TOPICAL QUESTIONS OF METHODOLOGY FOR CALCULATION OF EYES STRENGTH OF HINGED UNITS FOR GANTRY CRANES

В статье для проушин шарнирных узлов порталных кранов предлагается расчетная методика, в которой при определении максимальных напряжений в проушине учитывается протяженность контактной зоны.

In an article for the eyes hinge units gantry cranes offers a computational technique, in which, when determining the maximum stresses in the eye, takes account of the length of the surface area.

Ключевые слова: проушина, шарнирное соединение, напряжения.

Key words: eye ring, articulated joint, stress.



ШАРНИРНЫЕ соединения отдельных частей металлических конструкций кранов относятся к наиболее ответственным и высоконагруженным силовым элементам конструкций.

Для различных шарнирных узлов порталных кранов, как и для узлов других машин, характерна различная подвижность сопрягаемых деталей. Подвижное соединение характеризуется наличием взаимных перемещений сопрягаемых деталей при действии расчетной нагрузки, например шарниры стреловых систем. Кроме подвижных соединений, имеют место также малоподвижные или условно неподвижные и неподвижные шарнирные узлы. Сопряженные детали малоподвижных соединений совершают весьма малые относительные перемещения (крепления оттяжек, балансиров, шарнирные связи элементов конструкций).

Использование в подобных конструкциях цилиндрического подшипника скольжения или осуществление соединения на осях дает существенно меньшие габаритные размеры и достаточно большую грузоподъемность.

В силу указанных обстоятельств данные соединения получили широкое распространение в крановой технике.

С учетом сказанного, а также отмечая значительное разнообразие форм проушин и сопряжений оси с проушиной и сложившиеся в определенных отраслях техники традиции, установились разные подходы к расчету прочности проушин шарнирных соединений на осях. Тем не менее общепринятой и сколько-нибудь убедительной методики расчета проушин металлоконструкций порталных кранов не имеется.

В статье на основе анализа существующих подходов к оценке прочности шарнирных соединений с учетом результатов исследования [1, с. 124–129], а также учитывая опыт проектирования и эксплуатации малоподвижных соединений, накопленный в ООО «Ленподъемтрансмаш», даются предложения по методике расчета прочности проушин шарнирных узлов порталных кранов.

В авиационной промышленности оценка прочности проушин типовых форм производится по отношению к пределу прочности с учетом коэффициента концентрации напряжений, причем под последним понимается коэффициент снижения предела прочности, учитывающий концентрацию напряжений вблизи отверстия.

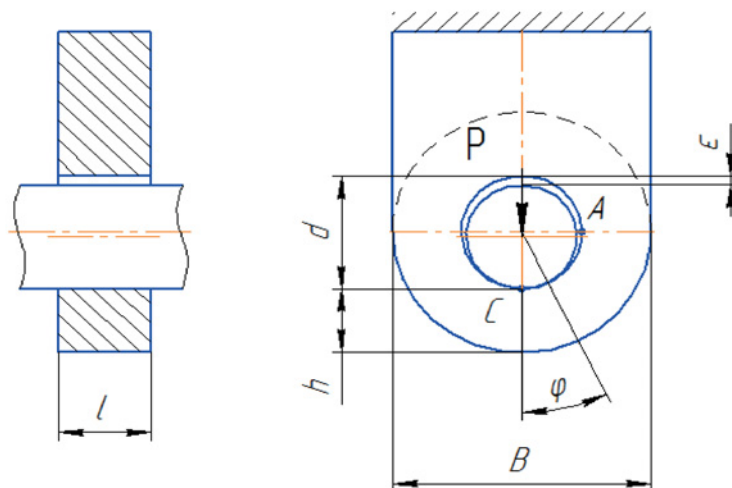


Рис. 1. Расчетная схема

В мостовых кранах большой грузоподъемности [2] конструкции проушин предлагается проверять на растяжение (по номинальным напряжениям) и дополнительно определять напряжения во внутреннем растянутом волокне кривого бруса по методу Бернгарда. При этом уровень допускаемых напряжений в первом и втором расчетах существенно различается.

В обоих изданиях книги «Справочник по кранам» под ред. профессора А. И. Дукельского расчет проушин также предлагается производить по формулам для кривого бруса, основываясь на работах Ф. Блейха. При этом проверяются наибольшие напряжения в растянутой проушине данного шарнира в поперечном сечении (в точке *A*) и в продольном сечении, проходящем через точку *C* (рис. 1). В дальнейшем эти методики в расчетах конструкций проушин порталных кранов распространения не получили.

Экспериментальные исследования проушин до разрушения, выполненные Д. Я. Кулешовым, показали, что прочность проушины возрастает и напряжения в поперечном сечении распределяются более равномерно, если перемычка в продольном сечении имеет большие размеры, чем в поперечном. С учетом этого обстоятельства принимают, в частности в шарнирах стреловых систем, для обеспечения прочности продольного сечения высоту перемычки увеличенной:

$$\frac{2h}{(B-d)} = 1,1, \dots, 1,3 (1,4). \quad (1)$$

В этом случае расчет проушины на прочность производят по максимальным нормальным напряжениям только в поперечном сечении. Для проведения упрощенных инженерных расчетов в практике получила применение методика, определяющая максимальные напряжения через средние (номинальные) в ослабленном сечении, проходящем через отверстие (сечение «нетто»):

$$\sigma_A = k_{\alpha s} \frac{P}{(B-d)l} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где $k_{\alpha s}$ — коэффициент концентрации напряжений по отношению к номинальному напряжению и определяющий максимальные окружные напряжения на внутреннем волокне (точка *A*); l — толщина проушины. Достоинство подобной методики состоит в том, что она сохраняет структуру традиционной формулы для проверки прочности проушины на растяжение в указанном сечении. В этом случае накопленные сведения о значениях $k_{\alpha s}$ в различных конструкциях позволяют с незначительными затратами времени осуществлять прикидочные оценки на стадии схемного или эскизного проектирования.

Опубликовано сравнительно большое количество информации, касающееся коэффициента концентрации напряжений. Тем не менее универсальных зависимостей или формул для коэффициента $k_{\alpha s}$ нет.

В литературе наметились два направления к расчету проушин. Характерной особенностью первого направления является использование сведений о концентрации напряжений в элементах с отверстиями без учета протяженности зоны контакта в шарнире. Дело в том, что шарнирные соединения в металлических конструкциях кранов относятся к типу соединений с гарантированным зазором (посадки Н9 (Н8)/f9, e9; Н11/d11) и для них площадка контакта между осью и листами мала. Так для осей крановых металлических конструкций с учетом отмеченных выше посадок характерны малые углы — полуугол φ контакта, по терминологии профессора Ю. Н. Дроздова, согласно работам профессора М. М. Гохберга, составляет $\varphi = 0-20^\circ$. По данным представлениям значения $k_{\alpha s}$ колеблются в пределах от 3,8 до 4,3.

В работе [3] для проушин определенной конструкции предложена простая формула для нахождения коэффициента $k_{\alpha s}$, видимо, полученная путем аппроксимации экспериментальных данных работы [4, с. 278–282]:

$$k_{\alpha s} = 4,5 - 3m^{-1}, \quad (3)$$

со значениями параметра m , лежащими в указанных ниже пределах:

$$m = \frac{B}{d} = 1,43, \dots, 4. \quad (4)$$

Заметим, что в практике конструирования выбор параметра m всегда остается за конструктором и, как правило, назначается с учетом опыта проектирования данного типа шарнирного соединения.

Относительно формулы (3) следует сделать несколько замечаний. Во-первых, в работе [4] обобщенные результаты экспериментов, представленные в виде графиков $k_{\alpha s}$ от параметра m , отнесены к конструкции, в которой высота перемычки h назначена равной значению $0,5(B - d)$. Поэтому благоприятное влияние утолщения перемычки на напряженное состояние, которое, правда, идет в запас прочности, формула не учитывает. Во-вторых, как видно из структуры формулы, она записана вне зависимости от угла 2φ контакта и диаметрального зазора ϵ . С другой стороны, результаты опытов показали зависимость коэффициента концентрации напряжений $k_{\alpha s}$ от закона распределения контактного давления:

$$p = \frac{P}{dl}, \quad (5)$$

по площадке контакта оси с телом проушины. Причем при различных средних контактных давлениях p и при одинаковых параметрах проушины наблюдается существенное различие величин.

Заметим, что если в знаменателе формулы (2) параметр d вынести за скобку, получим другую форму представления неравенства (2):

$$k_{\alpha s} \frac{P}{dl(m-1)} = k_{\alpha s} \frac{p}{m-1} \leq [\sigma]. \quad (5a)$$

В связи с наличием зависимости коэффициента концентрации напряжений $k_{\alpha s}$ от закона распределения контактного давления получило развитие второе направление, в котором назначение коэффициента концентрации напряжений поставлено в зависимость от геометрического фактора, обусловленного протяженностью зоны контакта.

В настоящее время существует несколько приближенных аналитических формул для определения контактного полуугла. Для их представления предварительно введем безразмерный параметр ψ :

$$\psi = \frac{P}{\epsilon l E_{\text{пр}}},$$

где приведенный модуль упругости $E_{\text{пр}} = 2 \frac{EE_1}{E + E_1}$; E, E_1 — модули упругости материала проушины и оси соответственно.

Одна из формул для определения контактного полуугла была предложена Г. Герцем, которая в принятых обозначениях запишется так:

$$\varphi_{\text{gertz}} = \arcsin \left(1,6 \sqrt{\psi \left(\frac{(1-\mu^2)E + (1-\mu_1^2)E_1}{E + E_1} \right)} \right), \quad (6)$$

где μ, μ_1 — коэффициент Пуассона материала проушины и оси соответственно.

Наиболее удачной эмпирической формулой для определения полуугла контакта является зависимость

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \operatorname{th} \left(0,68 \frac{m}{m-1} \sqrt{\psi} \right), \quad (7)$$

которая была подобрана на базе результатов параметрического решения нелинейной контактной задачи авторами работы [5, с. 7–10]. В этой же работе предлагаются графики для определения коэффициента концентрации напряжений $k_{\alpha s}$ в зависимости от полуугла контакта и параметра m .

Чтобы убедиться в применимости решений работы [5] к шарнирным узлам конструкций порталных кранов, автором статьи были выполнены следующие исследования. Во-первых, был проведен сравнительный анализ различных расчетных методик, определяющих контактные параметры соединения, и, во-вторых, получены решения различных тестовых задач, сформулированных применительно к параметрам и материалам конструкций шарнирных узлов конструкций порталных кранов [1] и проанализированы их результаты.

Результаты этих исследований отображены на графиках (рис. 3–5).

Так, например, для соединения с параметрами: $P = 128,5$ кН, $d = 110$ мм, $m = 1,77$, $l = 110$ мм, $h = 0,5(B - d)$ для пары «сталь–сталь» при численном решении с помощью МКЭ получены следующие результаты (см. рис. 2): полуугол контакта 21° (Sigma X), максимальные напряжения растяжения на контуре отверстия (точка A) составляют 48,72 МПа (Sigma Y), что соответствует коэффициенту концентрации напряжений 3,55. По данным работы [5], для подобного соединения $k_{\alpha s} = 3,93$ (см. рис. 3), а контактный полуугол составляет 23° .

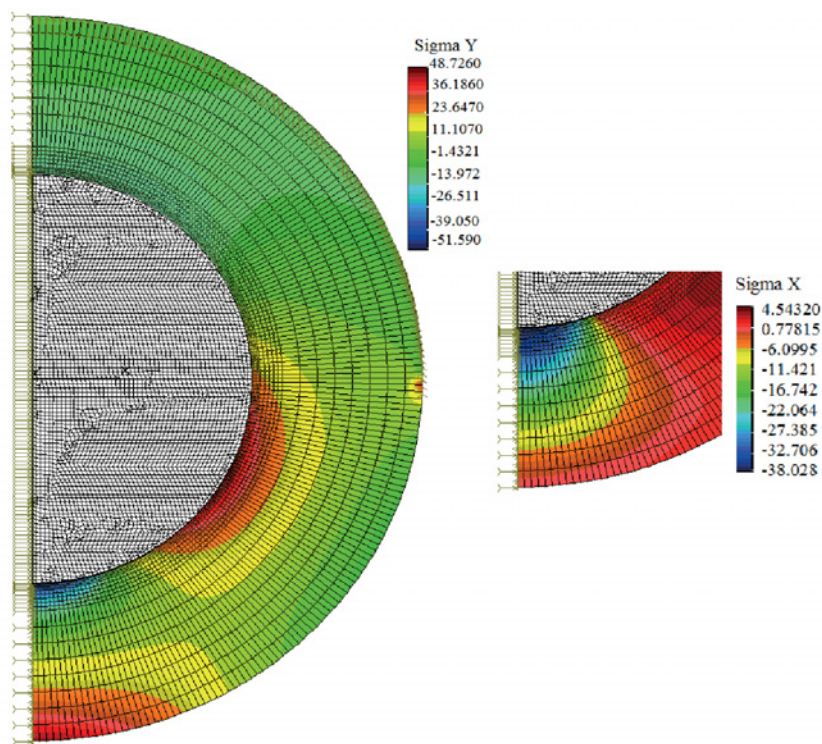


Рис. 2. Напряжения в теле проушины

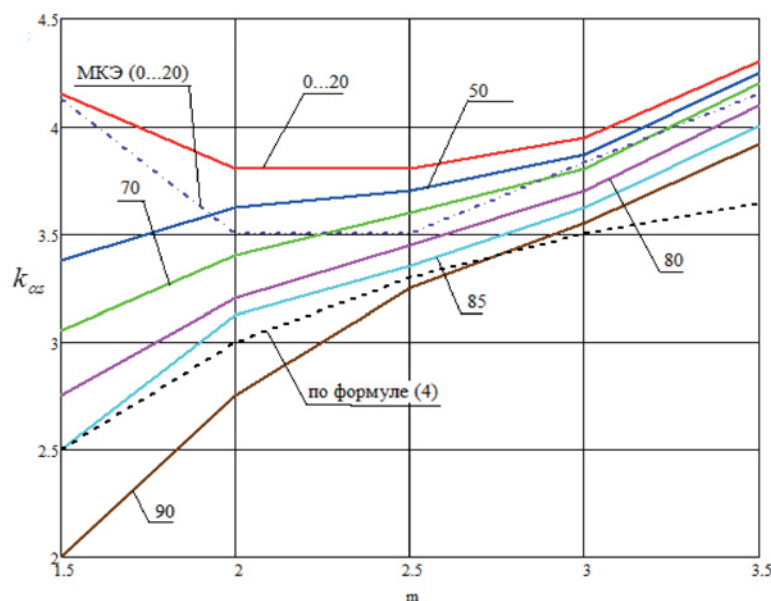


Рис. 3. Коэффициент концентрации напряжений $k_{\sigma s}$ при различных полууглах контакта ϕ и различных m для пары «сталь–сталь»

Дополнительно на график по рис. 3 наложено уравнение (3) — штриховая кривая и данные численного эксперимента работы [1], полученные для полуугла контакта $\phi = 0...20^\circ$ — штрихпунктирная кривая. Как видно из рис. 3, использование формулы (3) возможно при $\phi \geq 80^\circ$, то есть при посадке оси в проушине с нулевым (малым) зазором, что нехарактерно для шарниров крановых конструкций.

Кривые изменения коэффициента $k_{\sigma s}$ для шарниров с полууглом контакта $0...20^\circ$, построенные по результатам опытов работы [5] и полученные в результате численного эксперимента, имеют неплохую сходимость.

На рис. 4, 5 проиллюстрирован характер изменения полуугла контакта в зависимости от параметра ψ для различных m и при разных свойствах материалов контактной пары. Для пары «сталь–сталь» — рис. 4, для пары «сталь–бронза» — рис. 5.

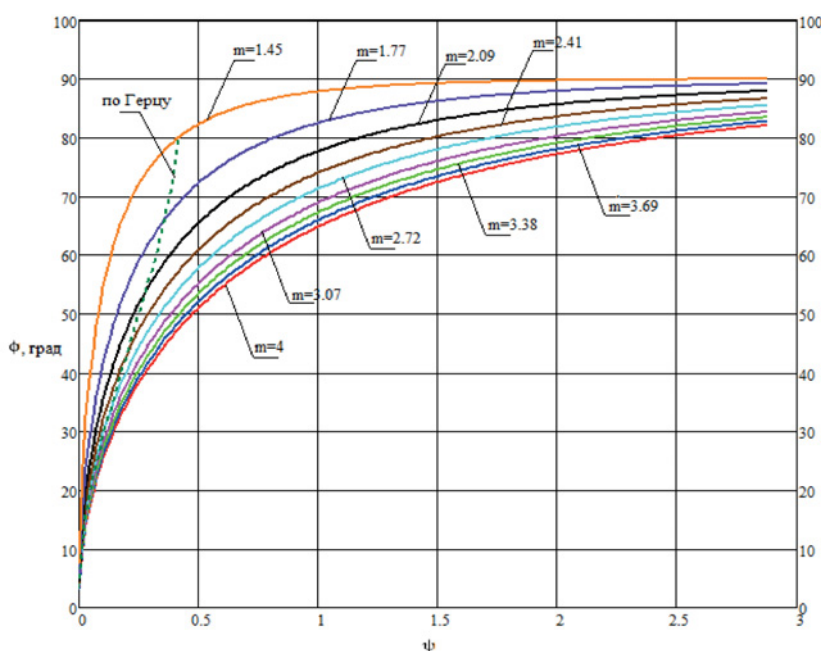


Рис. 4

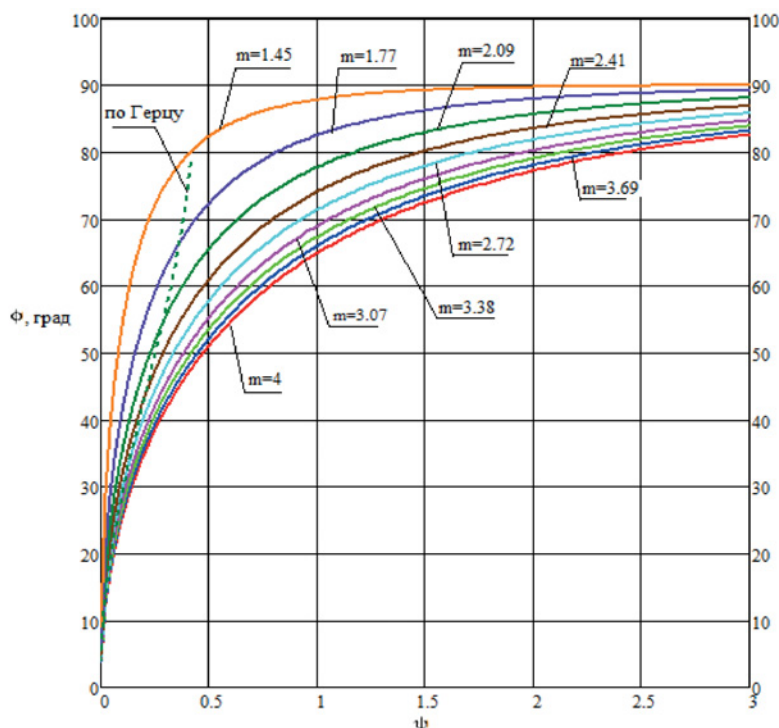


Рис. 5

Таким образом, в зависимости от свойств материалов пары и значения параметра ψ по рис. 4, 5 можно определить полуугол контакта для конкретного m . После чего представляется возможным найти коэффициент концентрации напряжений $k_{\alpha s}$, пользуясь рис. 3. Для соединений с малым зазором коэффициент концентрации напряжений можно также рассчитать по формуле (3). Максимальные напряжения на контуре отверстия проушины σ_A определяются по общепринятой формуле (2). Предложение С. Л. Гафнера о включении в знаменатель формулы (2) параметра $\sin(\varphi)$ с целью нахождения среднего по проекции площадки напряжения в зоне контакта применения в расчетной практике не получило.

Выводы

1. Использование формулы (3) для определения коэффициента концентрации напряжений $k_{\alpha s}$ для шарнирных узлов грузоподъемных машин независимо от величины параметра m допустимо дает заниженные результаты и может использоваться только в соединениях с нулевым зазором, то есть при $\varphi \geq 80^\circ$.
2. Приведен график изменения коэффициента $k_{\alpha s}$ в зависимости от параметра m , полученный в результате численного эксперимента, который можно рекомендовать для расчета максимальных нормальных напряжений в поперечном сечении проушины для полууглов контакта $\varphi = 0 \dots 20^\circ$.
3. Приведены удобные графики рис. 4, 5, позволяющие в зависимости от параметров ψ и m определять полуугол контакта для различных свойств материалов контактной пары.

Список литературы

1. Иванов В. Ю. О влиянии конечных размеров шарнира на решение контактной задачи / В. Ю. Иванов // Науч.-техн. вед. СПбГПУ. — 2010. — № 4 (110).

2. Верник А. Б. Мостовые краны большой грузоподъемности / А. Б. Верник. — М.: Машгиз, 1956.
3. Соколов С. А. Строительная механика и металлические конструкции машин / С. А. Соколов. — СПб.: Политехника, 2011. — 422 с.
4. Сухарев И. П. Исследование по оптимизации проушин, выполненное поляризационно-оптическим методом / И. П. Сухарев // Тр. Всесоюз. конф. по поляризационно-оптическому методу исследования напряжений. — Таллин: Изд. АН Эстонской ССР, 1971. — Т. III.
5. Ковальский Б. С. Расчет проушин / Б. С. Ковальский, Ф. Ф. Сороковенко // Вестник машиностроения. — 1969. — Вып. 10.

УДК 621.646.2

Е. О. Ольховик,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Ю. А. Резник,
ведущий специалист
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СИЛЬФОННЫХ СБОРОК ДЛЯ СУДОВОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

DEVELOPMENT OF LASER WELDING TECHNOLOGY OF BELLOWS ASSEMBLIES FOR SHIP PIPELINE VALVES

В статье рассмотрены актуальные проблемы надежности судовой трубопроводной арматуры с сильфонным уплотнением для автоматизированных судовых котлов, использующих высокотемпературный органический теплоноситель (термомасло). Проведен анализ причин известных неисправностей запорного узла арматуры, выявлены недостатки существующих технологий сварки сильфонной сборки. Предложена новая технология лазерной сварки, обеспечивающая более надежное и качественное соединение сильфона.

The article describes current problems of reliability of ship pipeline valves with bellows seal for automated marine boilers using high-temperature organic heat transfer fluid (thermo oil). The analysis of reasons of known fault isolation valve assembly is given, the shortcomings of existing technologies of welding of bellows assembly are revealed. The new technology of laser welding, providing a more reliable and quality connection for bellows is offered.

Ключевые слова: надежность, судовая трубопроводная арматура, сильфонное уплотнение, лазерная сварка, высокотемпературный органический теплоноситель.

Key words: reliability, ship pipe fittings, bellows, laser welding, high temperature organic coolant.

Введение

Арматура с сильфонным уплотнением штока получила широкое распространение в машиностроении, судостроении и энергетике, поскольку обладает повышенными техническими характеристиками по своей надежности и долговечности. Срок ее эксплуатации составляет не менее 15 лет. Однако для ряда конструктивных и технологических решений сильфонный узел не всегда обеспечивает необходимую долговечность, при этом 75 % неисправностей относится к нарушению герметичности затвора и только 25 % — к остальным неисправностям [1].

В судовой арматуре основные проблемы возникают при работе с высокотемпературными органическими теплоносителями при режимах свыше 200 °С и также связаны с разгерметизацией

сильфона. Традиционные методы крепления сильфона на шпинделе предусматривают его сварку, припайку, реже — роликовую сварку или механический обжим. Данные технологии хорошо зарекомендовали себя, полностью отработаны и проверены на практике, но имеют собственные недостатки.

Задача исследований

Анализ разрушений сильфонных сборок для арматуры в диапазоне условных проходов от 50 до 150 мм показал, что трещины и надрывы образуются в области околосшовной зоны приварки или паяного соединения со шпинделем или верхним фланцем. Также известной причиной разрушения сильфонной сборки является превышение действующего гидравлического давления. Сильфоны [2] изготавливаются из коррозионно-стойких сталей марок 12X18H10T, 10X17H13M3T или аналогичных по ГОСТ 5632 и 10498. При традиционной технологии присоединения сильфонов используют специальные втулки и кольца по ГОСТ 21557, которые изготавливают из материалов, аналогичных сильфону. Приварку сильфона производят аргонодуговой сваркой с использованием неплавящегося вольфрамового электрода методом оплавления цилиндрической части сильфона или элементов его крепления. Использование специальных припоев на основе тугоплавких элементов ограничено, поскольку они снижают как пластические свойства, так и свойства сопротивления усталостному разрушению всего соединения.

Для судовой арматуры с сильфонным уплотнением при эксплуатации в составе автоматизированных котлов с органическим теплоносителем согласно п. 20.6.3 [3] не допускается применение меди и ее сплавов для элементов трубопроводов, находящихся в контакте с органическим теплоносителем.

Таким образом, задача по разработке новых технологий герметичного крепления сильфона в составе судовой запорной арматуры является весьма актуальной. Основными эксплуатационными требованиями для сильфонной сборки является число циклов нагружений до разрушения и стойкость соединения сильфона к межкристаллитной коррозии.

Методы исследований

Одним из основных дефектов, проявляющихся при традиционной сварке сильфонной сборки, является перекося или сдвиг торцевой части сильфона относительно шпинделя или верхнего фланца. Даже самое небольшое смещение относительно центральной оси сильфона приводит к образованию сил внецентренного сжатия и снижению величины критического давления [4]. Эффективная площадь сильфона, а значит, и свойства сопротивления усталостному разрушению остаются постоянными только в условиях осевого растяжения–сжатия. Наличие перекося приводит к постоянному силовому нагружению сильфона изгибающим моментом, что отрицательно сказывается на его долговечности. Также глубокое проплавление вольфрамовым электродом приводит к значительному прогреву как самого сильфона, так и шпинделя, что добавляет в конструкцию внутренние температурные напряжения, для снижения которых необходимо применять дополнительную термообработку. Для данной технологии требуется последующая механическая обработка места сварки, что для отдельных соединений снижает их прочность.

В последние годы для приварки сильфонов применяют микроплазменную сварку. Такая технология позволяет избежать появления термических напряжений и практически отказаться от механической обработки, однако микроструктура шва имеет пористую структуру и подвержена межкристаллитной коррозии.

В настоящее время нами разрабатывается технология лазерной приварки сильфонов к шпинделю для последующей работы в составе судовой трубопроводной арматуры. Основным отличием от существующих методов является то, что сварку производят в условиях совместного вращения шпинделя и сильфона. Это позволяет обеспечить их точную взаимную центровку и избежать перекося. Предлагаемая схема лазерной приварки сильфона к шпинделю представлена на рис. 1.

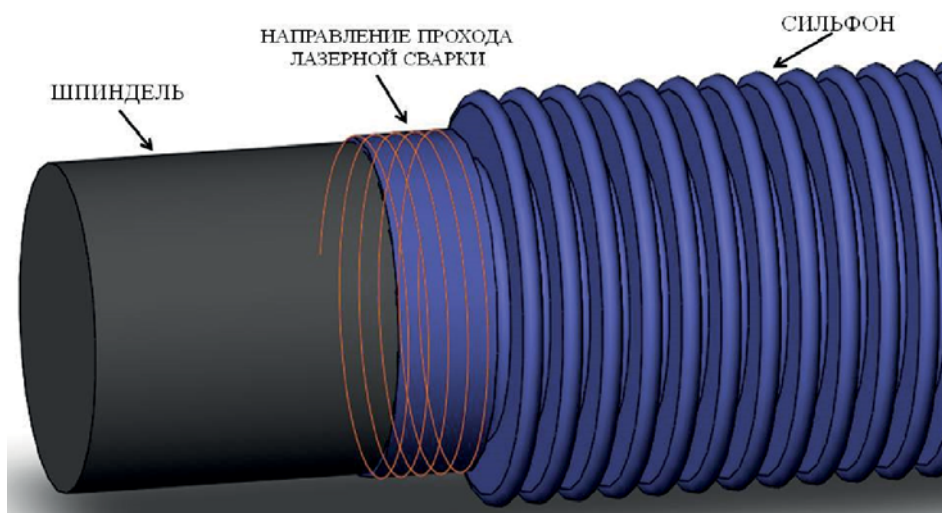


Рис. 1. Принципиальная схема технологии лазерной сварки сильфона к шпинделю судовой трубопроводной арматуры

Описание разработанной технологии

Сильфон, имеющий по краям цилиндрические припуски, размещается непосредственно на шпинделе, который затем приводится во вращение. Лазерную сварку осуществляют в один или несколько проходов методом кинжального проплавления. Далее луч лазерной сварки по цилиндрической (в несколько проходов) или спиралевидной траектории выполняет глубокое проплавление припуска сильфона к шпинделю, что обеспечивает надежное и герметичное соединение. Сварочный шов образуется за счет перемешивания основного металла. Практическое отсутствие усадочных напряжений позволяет производить процесс без предварительного подогрева и окончательной термообработки. Механическая обработка шва, полученного с использованием лазерной сварки, не требуется.

Для сравнения традиционной и разрабатываемой технологии было выполнено травление образцов сварки в 10 %-ном растворе подогретой до 50 °С серной кислоты в течение 1 ч с целью определения стойкости к межкристаллитной коррозии. Результаты в обоих случаях удовлетворительные.

Выводы

Предлагаемая технология, основанная на применении методов лазерной сварки для соединения сильфонов, позволяет достичь более высокого качества сварочного шва за счет более стабильного технологического процесса сварки, отсутствия прогаров, непроваров, шлаковых и металлических образований по длине сварочного шва, что обеспечивает надежность его соединения при эксплуатации. Дополнительным преимуществом разрабатываемой технологии является отсутствие механической обработки сварного шва и его стойкость к межкристаллитной коррозии.

Список литературы

1. Прочность и надежность нефтегазового оборудования: материалы межотр. семинара. — М. : ГУП НИКИЭТ, 2003.
2. ГОСТ Р 55019-2012. Арматура трубопроводная. Сильфоны многослойные металлические. Общие технические условия.

3. Правила классификации и постройки морских судов. НД № 2-020101-077. — Т. 2.
4. Сильфоны. Расчет и проектирование / под ред. Л. Е. Андреевой. — М.: Машиностроение, 1975. — 156 с.

УДК 621.384.6;620.178.16

С. Г. Чулкин,

д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

В. М. Петров,

д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Буцанец,

ведущий специалист по НТП
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВОЙ ЗАПОРНОЙ АППАРАТУРЫ

PROMISING TECHNOLOGICAL METHODS TO INCREASE WEAR RESISTANCE OF SURFACES OF SHIP LOCKING DEVICES PARTS

В статье приведены данные о существующих технологиях ионно-лучевой обработки поверхностных слоев ответственных деталей, применяемых в судостроении и машиностроении с целью повышения их эксплуатационных свойств. Дана классификация видов данной обработки. Отмечены их достоинства и недостатки. Отдельно рассмотрены вопросы технологии ионной азотации.

In article the data about existing technologies of ion-beam processing of the surface layers of the critical parts used in shipbuilding and engineering to improve their operational properties are given. A classification of the species of the given processing is presented, their advantages and disadvantages are marked. The problems of ion nitration technology are considered separately.

Ключевые слова: судовые трубопроводы, запорная арматура, технологии упрочнения, ионная имплантация, азотирование поверхностей.

Key words: marine pipelines, stop valves, technologies of hardening, ion implantation, surface nitration.



ЛЕМЕНТЫ судовой запорной трубопроводной арматуры работают в тяжелых условиях эксплуатации. Транспортируемые жидкости по трубопроводам и элементам запорной аппаратуры находятся под давлением и, как правило, нагреты до 300 °С. Высокие температуры в совокупности с агрессивными свойствами и химической активностью органических перегретых теплоносителей негативно влияют на состояние поверхностей внутренних элементов запорной аппаратуры (уплотнительные втулки, сильфоны, клапаны, седла и т. п.), что приводит к общему снижению работоспособности и сокращению срока службы изделия. Для функциональных деталей запорной арматуры широко применяют высоколегированные коррозионно-стойкие стали согласно ГОСТ 5632, наплавочные износостойкие покрытия СТ ЦКБА 053-2008. Однако повышение эксплуатационных свойств методом наплавки не всегда дает желаемый результат,

а в отдельных частных случаях исполнения запорной трубопроводной аппаратуры экономически нецелесообразно. Поэтому актуально стоит вопрос о возможном применении других методов высокоэнергетического воздействия на функциональные поверхности элементов запорной аппаратуры. Ниже приведен обзор метода ионной лучевой обработки поверхностных слоев деталей как один из наиболее перспективных.

1. Перспективные методы ионно-лучевой обработки для повышения износостойкости поверхностей ответственных деталей судовой запорной аппаратуры.

Среди основных методов ионно-лучевой обработки (ионной имплантации) поверхности конструкционных материалов, применяемых в судостроении и машиностроении, можно выделить [1]:

1) ***вакуумное испарение.*** Основная суть метода сводится к осаждению паров материала. Толщина слоев достаточна для решения триботехнических задач судостроения;

2) ***молекулярная эпитаксия.*** Суть метода заключается в создании термически генерированных молекулярных пучков в ультравысоком вакууме до 10^{-5} – 10^{-6} . Недостаток — высокая стоимость и сложность процесса, низкая производительность, трудности получения хорошей адгезии делают применение метода для получения износостойких покрытий неперспективным;

3) ***осаждение посредством ионного распыления.*** Метод основан на высокоэнергетическом воздействии вылетающих ионов с атомами поверхности твердого тела. Технология, реализующая данный метод, может быть применена для решения отдельных инклюзивных и специфических задач судостроения;

4) ***ионно-плазменное напыление.*** Осаждение материалов ведется из плазмы (тлеющий разряд в плазме, среды инертного газа) на деталь, находящуюся под отрицательным потенциалом, значение которого достигает 10^3 В. Метод перспективен для задач судостроения и позволяет получать пленки равномерной толщины с хорошей адгезией к подложке. К недостаткам ионно-плазменного напыления можно отнести большое число параметров, активно влияющих на структуру и свойства получаемых покрытий. Это делает задачу оптимизации технологического процесса сложной;

5) ***ионная имплантация.*** Суть метода весьма проста и заключается в поверхностной обработке изделия ионами с энергией выше $3 \cdot 10^{-18}$ Дж, достаточной для внедрения в поверхностные слои материала. Технологически реализуют три энергетических диапазона ионной имплантации: низкоэнергетическая (10^{-17} – 10^{-16} Дж), имплантация ионов средних энергий (10^{-15} – 10^{-14} Дж), высокоэнергетическая имплантация ($10^{-(15...13)}$ Дж и выше). Наиболее перспективной в судостроении сегодня представляется имплантация ионов средних энергий;

6) ***имплантация атомами отдачи и ионное перемешивание.*** Эти методы являются разновидностями ионной имплантации. Они основаны на изменении свойств, связанных с внедрением не первичных высокоэнергетических ионов в легируемый материал, а атомов отдачи из ранее нанесенной одним из вышеперечисленных методов тонкой пленки. Процесс протекает в газовой среде, что, в свою очередь, позволяет синтезировать карбиды или нитриды. Преимущество — более низкие дозы энергии, чем в методе прямой имплантации. Недостатком является динамическое перемешивание легирующих веществ. Метод перспективен для задач судостроения;

7) ***совмещенные методы формирования покрытий.*** Технология реализует комплексный подход, где покрытие формируется в условиях одновременной бомбардировки пучком высокоэнергетических ионов, или серию последовательных операций осаждения и имплантации. Суть работы — совместить преимущества методов напыления и легирования.

2. Обеспечение износостойкости ионно-легированных слоев. Методы ионного азотирования.

Существуют разные методы насыщения поверхностных слоев материалов азотом [2]. Наиболее перспективным для решения триботехнических задач трубопроводной аппаратуры является метод ионного азотирования. По сравнению с обычным газовым методом обладает рядом преимуществ.

ществ — более низкая энергоемкость, экологическая чистота, приспособленность к полной автоматизации.

Теоретические основы процесса разработаны в начале XXI века. Исходя из современных теоретических представлений, основным элементом, насыщающими поверхностные слои, является атомарный азот, который, в отличие от существующей технологии газового (печного) насыщения, позволяет избежать наводороживания металла и исключить охрупчивание.

Основные преимущества ионного азотирования перед обычным газовым заключаются в следующем:

- уменьшение общего цикла процесса в 1,5–3 раза;
- инжиниринг диффузионного слоя;
- отсутствие силовых деформаций и дефектов поверхности;
- низкая шероховатость поверхности;
- возможности обработки сталей с высоким содержанием хрома за один технологический цикл;
- большая экономичность процесса;
- повышенный КПД установки;
- сокращение расхода газов;
- большая экологическая чистота.

Сравнение двух методов ионного азотирования для различных сталей приведено в табл. 1 согласно данным работы [3].

Таблица 1

Режимы, глубина и твердость поверхностного слоя после ионного азотирования

Марка стали	Температура азотирования	Азотирование в тлеющем разряде			Ионное азотирование в модуле при давлении азота, $6 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.	
		Время, ч	Эффективная толщина слоя	Поверхностная твердость, H_{μ}^{50}	Поверхностная микротвердость, H_{μ}^{200}	Эффективная толщина слоя, мкм
40X13	550	1	15–20	900–1000	1060–1200	40–45
X12	510	1	25–30	1000–1100	1100–1200	42–49
5XHM	550	1	70–80	660–740	800–850	80–90
40X	500	1	50–55	680–760	780–850	110–120
ХВГ	500	1	55–60	780–850	850–900	65–70
12X18H10T	550	1	8/13	760–900	900–1140	5–7
45	550	1	50	380–440	380–400	80–90
P6M5	600	1	50–55	1130–1200	1200–1300	25–35

На практике возможны два варианта реализации схемы ионного азотирования. В обоих случаях концентрация плазмы в технологической камере и ее качественный состав будут определяться родом используемых плазмообразующих газов, их давлением и током разряда. Характеристики плазмы будут определять плотность потока и характер частиц, бомбардирующих поверхность,

подвергаемую азотированию. Энергия же *ионной компоненты потока* может регулироваться независимым образом путем изменения напряжения смещения на обрабатываемых деталях ($U_{\text{дет}}$) [3].

Данные работ [4, р. 3–9; 5] позволяют записать выражение для оценки величины падения напряжения на разрядном или основном разрядном промежутках U_p для случая низких давлений, когда пограничные слои между плазмой и электродами будут бесстолкновительными:

$$U_p = \frac{W_{0_k}}{e\xi_{1k}\xi_2\gamma_{\text{эф}}} \left[1 + \frac{i_{\text{евн}}(1 + U_{\text{евм}}/U_p)\xi_{1\text{вн}}}{j_{ik}S_k\gamma_k(W_{\text{евн}}/W_{0_k})\xi_{1k}} + \frac{\gamma_{\text{дет}}S_{\text{дет}}(1 + U_{\text{дет}}/U_p)\xi_{1\text{дет}}}{\gamma_kS_k(W_{\text{дет}}/W_{0_k})\xi_{1k}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где W_{0_k} , $W_{\text{евн}}$ и $W_{\text{дет}}$ — средние затраты энергии на один акт ионизации, совершаемой быстрым катодным электроном; e — заряд электрона; ξ_{1k} , $\xi_{1\text{вн}}$, $\xi_{1\text{дет}}$ — доля энергии, растрачиваемая быстрыми катодными внешними электронами или электронами из обрабатываемых деталей на ионизацию до их ухода из разрядной области; ξ_1 — доля ионов, приходящаяся на катод основного разряда из всех образований в объеме газоразрядной камеры; j_{ik} — плотность ионного тока на катод; S_k , $S_{\text{дет}}$ — площади катода основного разряда и поверхности обрабатываемых деталей; eU_p , $eU_{\text{евн}}$, $eU_{\text{дет}}$ — энергия быстрых электронов с катода; $\gamma_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии катода основного разряда:

$$\gamma_{\text{эф}} = \gamma_k + (1 + \gamma_{\text{дет}}) \frac{S_{\text{дет}}}{S_k} + \frac{i_{\text{евн}}}{j_{ik}S_k}, \quad (2)$$

где γ_k , $\gamma_{\text{дет}}$ — коэффициенты вторичной электронно-ионной эмиссии материала катода основного разряда и деталей; $i_{\text{евн}}$ — ток электронов, инжектируемых в основной разрядный промежуток от вспомогательного источника, определяется согласно работам [6, р. 103–108; 7, р. 93–101; 8, р. 387–394; 9].

Плазма будет проникать в полость только в том случае, если характерный размер полости R , будет удовлетворять неравенству $R > d_{\text{сл}}$ ($d_{\text{сл}}$ — размер пристеночного слоя между поверхностью детали и плазмой), а $d_{\text{сл}}$ можно оценить из выражения

$$d_{\text{сл}} = \left(\frac{5,48 \cdot 10^{-8} U_{\text{дет}}^{3/2}}{\sqrt{\tilde{A}} j_{i_{\text{дет}}}} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где $\tilde{A}$ — усредненная атомная масса ионов, бомбардирующих обрабатываемое изделие.

Представленные зависимости можно вставить в алгоритм блока управления процессом управления ионного азотирования деталей.

В результате ионного азотирования можно улучшить следующие характеристики деталей запорного узла судовой арматуры: золотник, седло клапана.

В целом азотирование повышает теплостойкость поверхностей, что позволяет снизить коэффициент трения и повысить антифрикционные свойства.

Заключение

Инновационные установки ионно-плазменного азотирования позволяют комплексно использовать разные рабочие газовые среды, регулируемые по составу смеси водорода, азота и аргона, а также плазму «пульсирующего», а не постоянного тока, технологичность процесса ионного азотирования существенно возросла.

По сравнению с постоянным импульсный тлеющий разряд обеспечивает:

- стабильность процесса;
- отсутствие электрических дуг во время протекания технологического процесса;
- надежное покрытие плазмой обрабатываемых поверхностей;
- повышение производительности и качества обработки.

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси. Температура обработки должна быть как минимум на 10–20 °С ниже температуры отпуска.

В целом, имеющиеся данные позволяют с оптимизмом говорить о больших возможностях технологии ионного азотирования применительно к возникающим задачам триботехнического плана при изготовлении и эксплуатации судовой запорной арматуры.

Список литературы

1. *Петров В. М.* Управление процессами контактного взаимодействия элементов трибосопряжения машин и технологических систем путем применения активных сред: дис. д-ра техн. наук: 05.02.04 / В. М. Петров. — СПб., 2004. — 335 с.
2. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин [и др.]. — М.: Металлургия, 1991. — 320 с.
3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. — М.: МГТУ им. М. Э. Баумана, 1999. — 400 с.
4. Non-self maintained glow discharges for ion-beam and plasma technologies // *Vacuum Physics and Technology*. — 1993. — Vol. 1, № 1.
5. *Абрамов И. С.* Математическое моделирование приборов и устройств плазменной электроники / И. С. Абрамов, В. Т. Барченко. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. — 72 с.
6. *Korhonen A. S.* A new low pressure plasma nitriding metod / A. S. Korhonen, E. H. Sirvio // *Thin Solid Films*. — 1982. — № 96.
7. *Sirvio E. H.* Abrasive wear of ion-playted titanium nitride coatings on plasma-nitrided steel surfaces / E. H. Sirvio, M. S. Sulonen, H. Sundquist // *Thin Solid Films*. — 1982. — № 96.
8. *Korhonen A. S.* Plasma nitriding and ion plating with an intensified glow discharge / A. S. Korhonen, E. H. Sirvio, M. S. Sulonen // *Thin Solid Films*. — 1983. — № 107.
9. Разработка технологии и элементов оборудования для вакуумно-дугового осаждения покрытий и модификации поверхностных слоев: отчет по НИР / СПбГЭТУ. — СПб., 1995.

МОРСКИЕ И ВНУТРЕННИЕ ВОДНЫЕ ПУТИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ПОРТЫ

УДК 656.627.3

М. А. Колосов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

С. Ю. Ладенко,
канд. техн. наук,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

О НЕОБХОДИМОСТИ ПОДГОТОВКИ ПАВЛОВСКОГО ШЛЮЗА К ПРОПУСКУ ПАВОДКОВЫХ ВОД

ON THE PREPARATION OF THE PAVLOVSK GATEWAY FOR PASSAGE OF HIGH WATERS

В статье приводятся результаты оценки технического состояния шлюза Павловской ГЭС по данным обследования. Показано, что пропуск паводковых вод через шлюз может привести к значительным разрушениям его камеры. По данным наблюдений уточняются максимальные расходы притока половодья обеспеченностью 1 и 0,1 %, моделируется гидрограф пропуска половодья 0,1 % обеспеченности, рассчитывается динамика отметок поверхности воды верхнего и нижнего бьефов Павловской ГЭС. Показано, что пропуск половодья можно осуществить без открытия отверстий шлюза для сброса воды.

The article presents the results of evaluation of technical condition gateway of Pavlovskaya HPP. It is shown that the pass of flood waters through the gateway can lead to significant destruction of his camera. The calculation of the maximum flow through the waterworks showed that flood passage may be effected without opening holes gateway.

Ключевые слова: камера шлюза, пропуск половодья, гидрологический режим, максимальный расход, норма стока, половодье, гидроузел, водопропускные сооружения.

Key words: gateway, the dam, flood, hydrological regime, the maximum runoff, flooding, hydro-technical constructions.



ПАВЛОВСКИЙ высоконапорный шлюз предназначен как для пропуска судов, так и для пропуска воды в период катастрофических паводков. Однако за весь период эксплуатации с 1958 г. через шлюз проходят только суда, пропуск паводковых вод через его камеру не проводился. Все паводковые воды сбрасываются через отверстия водосброса водосливной плотины.

Обследование конструкций камеры шлюза (2006–2008) показало, что поверхности лицевых стен камеры имеют значительные выколы, трещины, обнажения арматуры. Особенно интенсивные разрушения происходят в зоне колебаний нижнего бьефа, а также в зоне межсекционных температурно-осадочных швов.

Гидродинамические нагрузки, возникающие при пропуске паводковых вод через верхнюю голову шлюза, могут привести к интенсивному разрушению бетона в стенах и днище камеры, а их воздействие на переливную стенку верхней головы может вызвать дальнейшее разрушение ее бетона.

Проводимые Управлением Комводпути текущие преддекларационные обследования (2008, 2013) не дают оценку возможных последствий для технического состояния камеры и механического оборудования шлюза при пропуске паводка. В декларациях безопасности не приводится и вероятность наступления подобных событий.

В настоящей работе представлены результаты анализа гидрологических условий р. Уфы в створе Павловкой ГЭС, дается оценка величины максимальных расходов притока половодья, а также оценивается возможность осуществить пропуск половодья расчетной обеспеченности без открытия камеры шлюза для сброса воды.

Цель проведенных исследований — моделирование пропуска половодья расчетной обеспеченности через водопропускные сооружения Павловской ГЭС с учетом изменения гидрологического режима р. Уфы за период эксплуатации ГЭС. В работе были использованы проектные данные института «Энергосетьпроект» (Москва, 1970 г.), АО «Самарагидропроект» (Самара, 1995 г.), а также данные наблюдений службы эксплуатации Павловской ГЭС (за период 1959–2013 гг.).

Изучению изменений количественных характеристик стока уделяется большое внимание в отечественной и зарубежной литературе. Фундаментальные исследования проведены А. И. Чеботаревым [1]. И. А. Шикломановым [2] рассматривается современное состояние проблемы, методы учета и оценки влияния хозяйственной деятельности на гидрологический режим и водные ресурсы для различных физико-географических условий. Для р. Уфы были проведены исследования изменения водности рек в связи с климатическими условиями и антропогенными изменениями на водосборе бассейна р. Белой в период 1936–2006 гг. [3, с. 20–26].

Река Уфа берет начало в Уральских горах и впадает в р. Белую справа у г. Уфы. Длина водотока — 918 км, площадь водосбора — 53 100 км². Бассейн р. Уфы охватывает Уральские горы и их западное предгорье, лесную зону. Речная сеть хорошо развита, сравнительно небольшие, но многочисленные притоки впадают в основном справа. Река имеет отчетливо выраженное продолжительное весеннее половодье, неустойчивую летне-осеннюю межень, часто с дождевыми паводками и длительную низкую зимнюю межень. Питание водотока по характеру смешанное и происходит главным образом за счет снеготаяния и отчасти — летних и осенних осадков. Территория водосбора р. Уфы относится к районам с высоким уровнем развития хозяйства, в то же время основные ландшафтные переформирования здесь произошли еще до начала инструментальных наблюдений за гидрологическим режимом реки, поэтому существующая база данных в основном учитывает их последствия.

Павловское водохранилище расположено в нижнем течении реки на 177 км от ее устья. Площадь водосбора р. Уфы, замыкаемая створом Павловского гидроузла, составляет 47 100 км². Наполнение водохранилища началось в 1958 г., в апреле 1960 г. была достигнута отметка НПУ. Назначение гидроузла — энергетика, водный транспорт, водоснабжение г. Уфы и населенных пунктов, расположенных ниже, рыбное хозяйство, рекреация. Длина водохранилища при НПУ 150 км, наибольшая ширина 1,8 км (средняя — 0,8 км), наибольшая глубина 35 м (средняя — 11,7 м), площадь зеркала при НПУ 115,9 км², площадь зеркала при УМО 57,5 км², полный объем 1,41 км³, полезный — 0,895 км³, мертвый объем 0,46 км³, НПУ = 140,00 м, ФПУ = 142,00 м, УМО = 128,50 м. Водохранилище обеспечивает сезонное, недельное и суточное регулирование, аккумулируя до 16 % притока половодья. Весеннее наполнение происходит с середины апреля в течение от одного до полутора месяцев в соответствии с диспетчерским графиком. В зимний сезон водохранилище подвергается интенсивной сработке. Резкое понижение уровня происходит в среднем в первой декаде января. Заканчивается сработка в первой половине апреля. Пропуск воды на Павловской ГЭС осуществляется через гидротурбины, водослив, шлюз. Общая пропускная способность сооружений гидроузла по проекту при НПУ составляет 6640 м³/с, при ФПУ — 8150 м³/с.

Изучение гидрологических условий в бассейне р. Уфы ведется с 1912 г. с открытия водомерных постов у с. Караидель и пос. Красный Ключ. В 1914–1916 гг. сеть водомерных постов была расширена. Накопленные материалы наблюдений позволили при проектировании оценить водохозяйственные условия в створе Павловской ГЭС по восстановленным рядам продолжительностью 44 года. Проектные гидрологические характеристики были получены с 1913 по 1941 г. по связи среднемесячных расходов воды р. Уфа у пос. Красный Ключ и у с. Караидель, а за период с 1942 по 1958 г. — приняты равными расходам воды у пос. Красный Ключ, расположенного 10 км ниже.

Приток в Павловское водохранилище за период эксплуатации рассчитывается суммированием расходов воды, поступающих через входные створы в водохранилище (р. Уфа — с. Янбай, р. Юрюзань — с. Ятияш, р. Туй — с. Гумбино и р. Сарс — с. Султанбеково), контролирующее поступление воды с 90 % площади его водосбора. Приводка к устью производится введением коэффициента 1,04, учитывающего разницы площадей водосбора в контрольном створе и устье р. Юрюзань. Приемлемость такого способа расчета обоснована институтом «Энергосетьпроект».

Норма и изменчивость годового притока к створу ГЭС

Известно, что при создании водохранилищ основные количественные изменения годового стока рек происходят в результате дополнительного испарения с водного зеркала, аккумуляции в чаше водохранилища и водозабора на различные нужды. Согласно [1] влияние испарения с водохранилищ на годовой сток в зоне избыточного и достаточного увлажнения не превышает 1 %, что находится в пределах погрешности расчетов. Водный баланс Павловского водохранилища, рассчитанный за период наблюдений 1961–1967 гг., приведен в [4]. По опубликованным данным, испарение с водного зеркала, водопотребление и аккумуляция в чаше водохранилища составляют незначительную долю баланса, а само водохранилище мало влияет на величину годового стока — нормы стока в п. г. т. Павловка (верхний бьеф, створ гидроузла) и Павловской ГЭС (нижний бьеф) практически не отличаются.

На рис. 1 приводится график динамики среднегодового расхода притока по проектному ряду, приведенному по аналогу р. Уфа — п. г. т. Красный Ключ (45 лет) и наблюдениям за притоком воды в створе ГЭС периода эксплуатации (54 года). Статистические параметры рядов приведены в табл. 1. Относительные средние квадратические погрешности расчетных значений среднегодового расхода не превышают 10 %, следовательно, ряды являются репрезентативными [5].

Оценка однородности (стационарности) рядов годового расхода притока проведена в соответствии с [5; 6]. Расчетные значения статистик Стьюдента и Фишера соответственно равны: $F = 1,63$, $t = 0,53$. Критические значения определены по таблицам [6] при уровне значимости 5 %: $F^* = 1,82$ и $t^* = 2,82$, что больше расчетных значений и позволяет принять гипотезу о стационарности ряда. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие хозяйственной деятельности в данном случае не оказывает существенного влияния на статистическую однородность ряда, а изменение параметров распределения годового стока р. Уфы в створе Павловской ГЭС под влиянием хозяйственной деятельности значительно меньше изменений, происходящих в результате естественных колебаний водности. Поэтому гидрологические расчеты можно осуществлять по всему ряду наблюдений. Приведенный ряд с количеством членов $n = 99$ представлен на рис. 1. Тенденции изменения среднегодового расхода притока к створу ГЭС по этому ряду не выявлено.

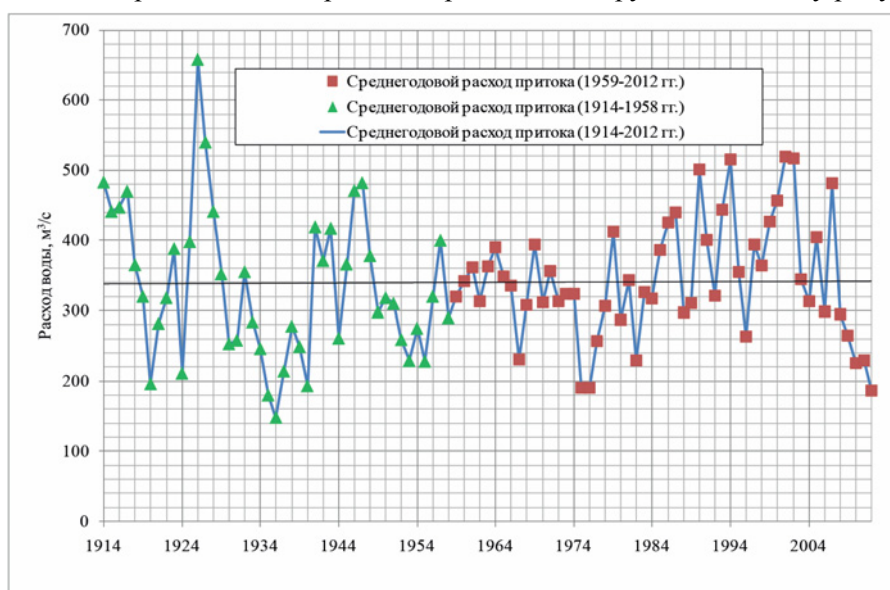


Рис. 1. Среднегодовые значения расхода воды р. Уфа — Павловская ГЭС

Таблица 1

**Характеристики рядов среднегодового расхода
притока р. Уфа — Павловская ГЭС**

№ п/п	Наименование показателя	Проект 1914–1958 гг. (45 лет)	Ряд наблюдений 1959–2012 гг. (54 года)	Приведенный ряд 1914–2012 гг. (99 лет)
1	Средний многолетний расход, м³/с	334	344	340
2	Среднеквадратическое отклонение, σ , м³/с	106	84	94
3	Коэффициент автокорреляции, r	0,58	0,43	0,52
4	Коэффициент вариации, C_v	0,32	0,24	0,27
5	C_s/C_v	2	2	2
	Относительная средняя квадратическая погрешность, %	9,3	5,2	5,0
6	Среднегодовой расход, м³/с			
	75 %	254	285	272
	95 %	195	215	199

Большие значения коэффициентов автокорреляции рядов среднегодового притока расхода р. Уфы в створе Павловской ГЭС свидетельствуют о цикличности колебаний, заключающейся в смене периодов маловодных и многоводных лет (с пониженной или повышенной по сравнению с нормой водностью). Такая цикличность характерна для большинства рек континентальных областей в естественных условиях [2].

Максимальный приток половодья к створу Павловской ГЭС

Для р. Уфы максимальные расходы наблюдаются в период весеннего половодья [4]. К основным факторам весеннего половодья относятся запасы воды в снежном покрове, интенсивность и продолжительность снеготаяния, наличие или отсутствие дождей.

Максимальные расходы притока воды по проектным данным и данным наблюдений 1960–2013 гг. представлены на рис. 2, объема притока половодья — на рис. 3. Ряды были признаны однородными по критериям Фишера и Стьюдента, что дало возможность рассчитать гидрологические характеристики по рядам продолжительностью 101 год для максимального расхода притока (1913–2013) и 79 лет для объема притока половодья (1913–2013).

На графиках отмечается тенденция к уменьшению величины среднесуточных максимальных расходов. Проверка гипотезы наличия статистически значимого тренда в ходе многолетних колебаний максимального расхода притока выполняется в соответствии с [6]. Уравнение линейного тренда и величина достоверности аппроксимации приведены на рис. 2. Средняя квадратическая ошибка коэффициента корреляции:

$$\sigma_R = \frac{(1-R)}{\sqrt{(n-1)}} = 0,098.$$

При уровне значимости 5 % получается значение 0,196, что больше коэффициента корреляции $R = 0,144$, следовательно, гипотеза неоднородности ряда во времени не признается. Также не выявлено тенденции изменения объема притока половодья и его продолжительности (рис. 3 и 4).

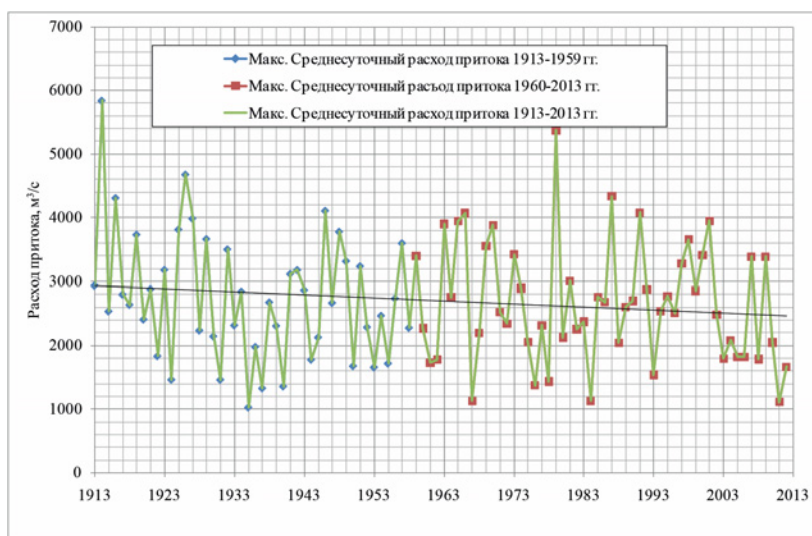


Рис. 2. Динамика максимального расхода притока воды р. Уфа — Павловская ГЭС

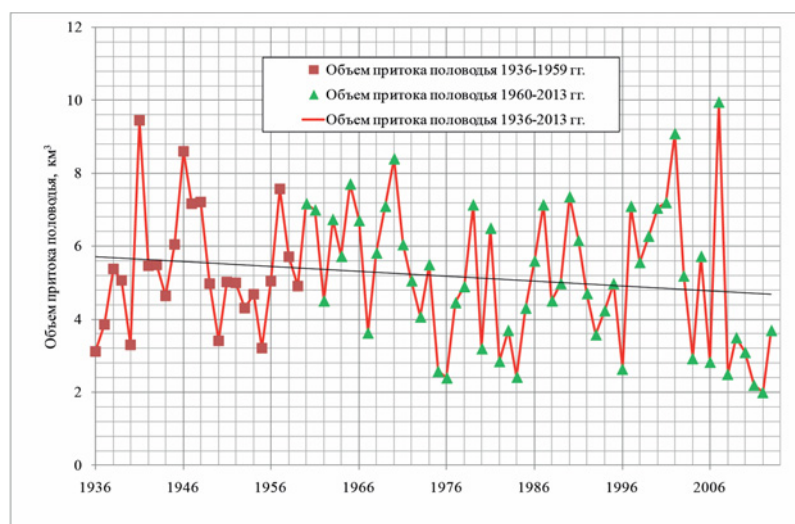


Рис. 3. Динамика объема притока половодья р. Уфа — Павловская ГЭС

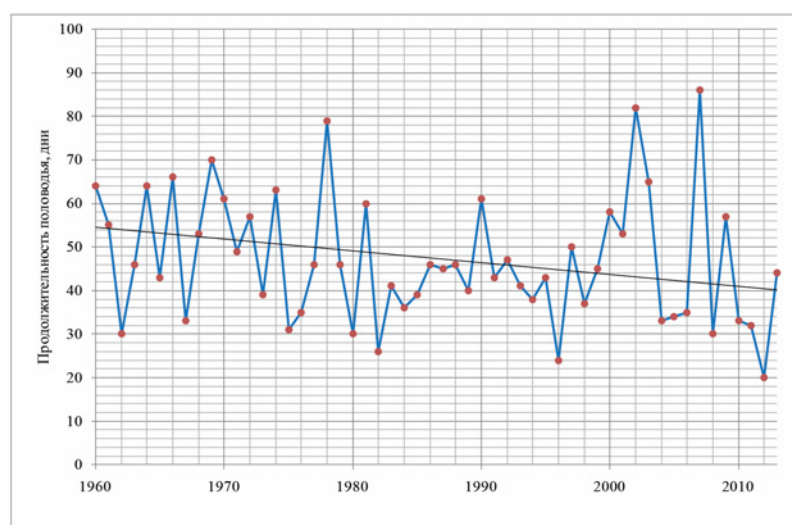


Рис. 4. Динамика продолжительности половодья (количество дней с наблюдаемыми среднесуточными расходами воды больше 500 м³/с) р. Уфа — Павловская ГЭС, 1960–2012 гг.

В табл. 2 приведены некоторые статистические характеристики максимального притока половодья по ряду 1913–2013 гг. Расчетные значения получены с учетом современной нормативной базы СП 33-101-2003 [5].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что тенденции к изменению величины максимального расхода, объема половодья и его продолжительности не выявлено, а относительная средняя квадратическая погрешность расчетного значения не превышает допустимую (20 % для максимального расхода) [5].

Таблица 2

Характеристики максимального притока половодья р. Уфа — Павловская ГЭС

	Наименование показателя	Значение показателя	Значение показателя
		Объем притока половодья	Среднесуточный максимальный расход половодья
1	Продолжительность ряда	1936–2013 гг. (78 лет)	1913–2013 гг. (101 год)
2	Среднее значение	5,20 км ³	2690 м ³ /с
3	Коэффициент вариации, C_v	0,35	0,35
4	Среднеквадратическое отклонение, σ	1,83 км ³	949 м ³ /с
5	Относительная средняя квадратическая погрешность, %	4,0	5,3
6	Коэффициент автокорреляции, k	0,19	0,02
7	C_s/C_v	3	3
8	Расчетные характеристики		
	0,1 %	14,0 км ³	7170 м ³ /с
	1 %	10,8 км ³	5950 м ³ /с

Расчет пропуска половодья расчетной обеспеченности в современных условиях

Расчет пропуска половодья проводился по модельному гидрографу притока воды к створу Павловской ГЭС, построенному по статистическим характеристикам ряда наблюдений с учетом диспетчерского графика и опыта эксплуатации ГЭС.

Основные этапы расчета:

- 1) обоснование выбора гидрографа-модели;
- 2) обоснование модели работы водопропускных сооружений гидроузла в соответствии с диспетчерским графиком и опытом эксплуатации;
- 3) проведение водно-балансовых расчетов пропуска половодья через водопропускные сооружения;
- 4) построение модели пропуска половодья через гидроузел;
- 5) определение максимальных расчетных расходов и уровней.

При регулирующем влиянии водохранилищ гидрограф половодья трансформируется в гидрограф сброса, максимальные расходы при этом уменьшаются. Гидрографы половодий формируются природными факторами и не зависят от размеров сооружений и водохранилища. На сбросные расходы оказывают влияние ограничения максимальных расходов воды, допускаемых к пропуску в нижний бьеф, порядок открытия водопропускных и судопропускных сооружений в период наполнения водохранилища, требования гидроэнергетики, уровень сработки к началу половодья и другие факторы.

Для оценки возможности пропуска расчетного половодья 0,1 %-ной обеспеченности через водопропускные отверстия расчетный гидрограф половодья 0,1 %-ной обеспеченности моделируется в соответствии с действующим нормативным документом СП 33-101-2003 [5].

Необходимым условием корректного расчета является правильный выбор модели гидрографа. В [5] устанавливаются основные требования к расчетной модели по максимальному расходу и объему притока. Анализ экстремальных значений этих параметров за период эксплуатации позволил определить их расчетные значения.

За период наблюдений 1959–2012 гг. наибольшие расходы весеннего половодья наблюдались в 1965 г. (3944 м³/с); 1966 г. (4070 м³/с); 1979 г. (5370 м³/с); 1987 г. (4337 м³/с); 1991 г. (4080 м³/с); 2001 г. (3948 м³/с).

Наибольшие объемы половодья наблюдались в 1979 г. (7,14 км³); 2001 г. (7,20 км³); 2002 г. (9,09 км³); 2007 г. (9,95 км³).

Из сопоставления характеристик выдающихся половодий наибольший объем и максимальный расход воды наблюдался в 1979 и 2001 гг. Продолжительность половодья в 2001 г. составила 53 дня, а в 1979 г. — 46 дней. Для моделирования наиболее неблагоприятных условий пропуска половодья целесообразно использовать в качестве модели гидрограф более длительного половодья 2001 г. (рис. 5) при уточненных расчетных значениях максимального расхода и объема притока половодья.

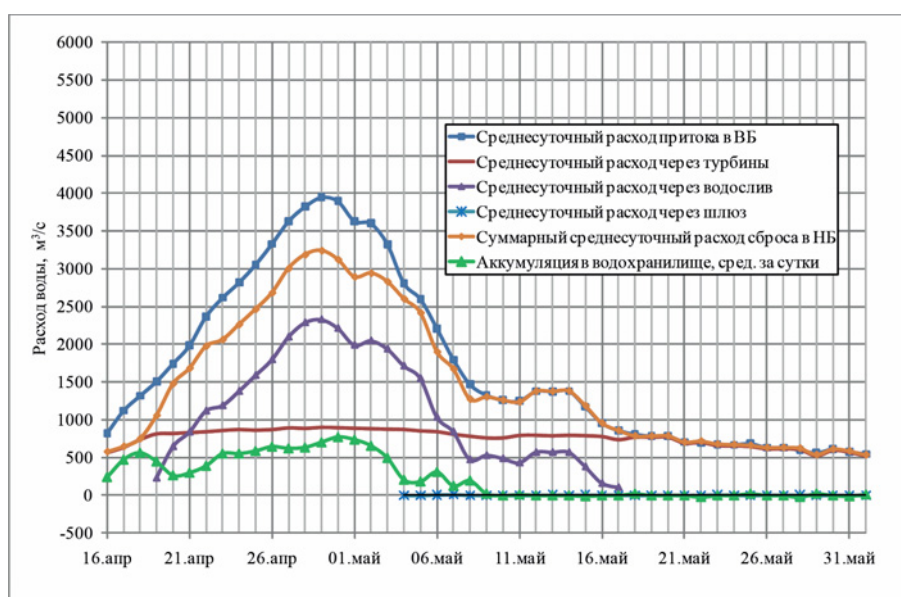


Рис. 5. Гидрограф пропуска половодья 2001 г. через водопропускные сооружения Павловской ГЭС (шлюз был открыт для пропуска судов с 4 мая)

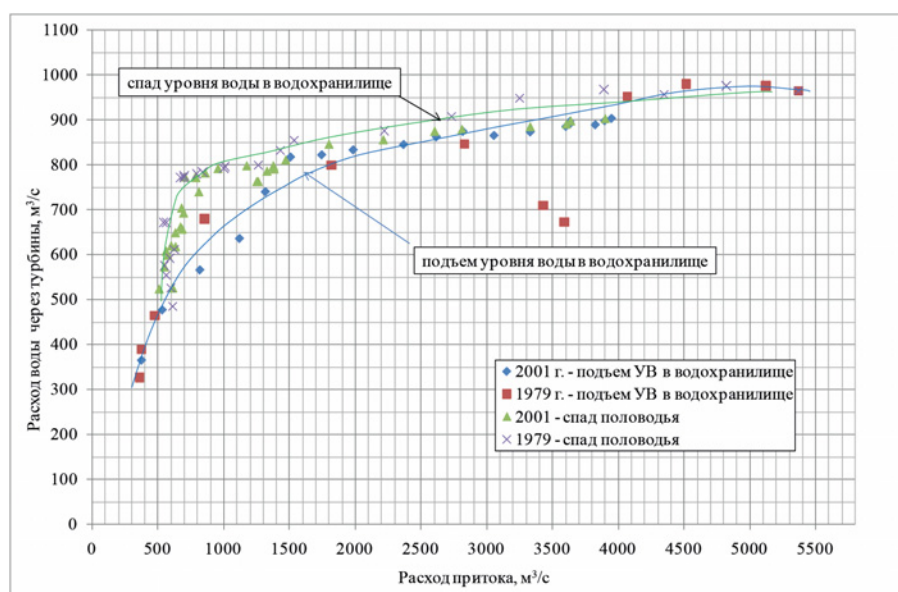


Рис. 6. Расход воды через турбины ГЭС в зависимости от расхода притока на подъеме и спаде половодья за 1979 и 2001 гг.

Условия пропуска половодья (через турбины ГЭС, водослив, шлюз) моделируются с учетом диспетчерского графика, а также опыта пропуска экстремальных расходов воды в 1979 и 2001 гг. В эти годы водохранилище к началу весеннего половодья было сработано в соответствии с диспетчерским графиком и прогнозом половодья до минимального уровня 128,50 м, расход воды через турбины назначался в зависимости от притока (рис. 6).

Моделирование пропуска расчетного половодья обеспеченности 1 % (основной расчетный случай) и 0,1 % (поверочный расчетный случай) выполнялось водно-балансовым методом. Полученные результаты показали, что осуществить пропуск половодья расчетной обеспеченности можно без открытия отверстий шлюза для сброса воды (рис. 7). Расчетные уровни верхнего и нижнего бьефов представлены на рис. 8.

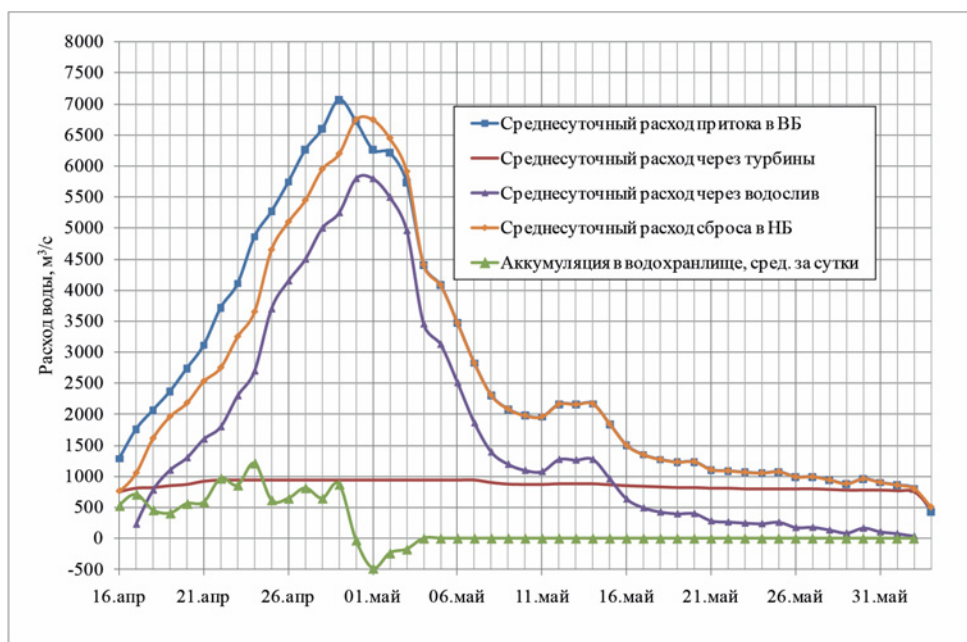


Рис. 7. Модель пропуска половодья 0,1 %-ной обеспеченности через водопропускные сооружения Павловской ГЭС

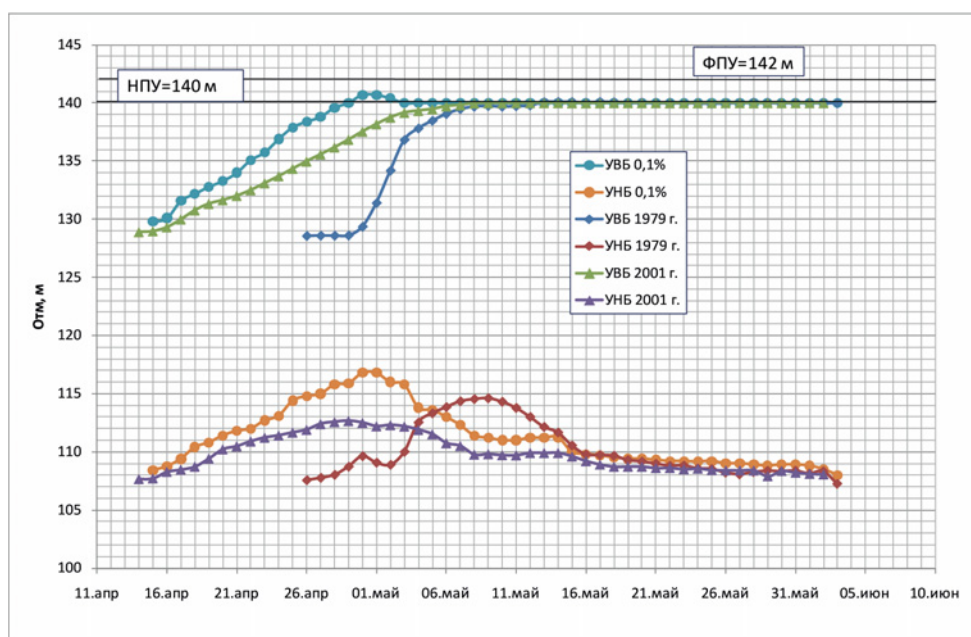


Рис. 8. Расчетные уровни воды 0,1 %-ной обеспеченности в верхнем и нижнем бьефах Павловской ГЭС

Таким образом, выполненный анализ гидрологических условий р. Уфы в створе Павловской ГЭС за период 1913–2013 гг. показал, что за исследуемый период (101 год) значительных изменений среднегодового и максимального притока к створу ГЭС не произошло. С помощью модельного гидрографа пропуска половодья 0,1 %-ной обеспеченности, построенного с учетом натурных данных по притоку и опыта эксплуатации ГЭС, установлено, что открытия камеры шлюза для пропуска паводковых расходов расчетной обеспеченности не требуется.

Выводы

Для обеспечения надежной и безопасной работы водопропускных сооружений ГЭС при длительном периоде эксплуатации водохозяйственной системы необходимо уточнять проектные характеристики притока воды к створу ГЭС и выполнять оценку возможных изменений гидрологического режима водотока.

Анализ ряда наблюдений среднегодового притока р. Уфы в створе Павловской ГЭС не выявил изменения нормы стока и подтвердил соответствие натурных данных проектным. При этом отмечена цикличность колебаний, заключающаяся в смене периодов с пониженной или повышенной по сравнению с нормой водностью. Такая цикличность характерна для большинства рек континентальных областей в естественных условиях.

За период наблюдений не выявлено тенденций к изменению характеристик максимального притока половодья (объем половодья, максимальный расход, продолжительность половодья). Это позволило по данным наблюдений уточнить статистические характеристики максимального притока к створу ГЭС и с учетом диспетчерского графика и опыта эксплуатации смоделировать пропуск половодья расчетной обеспеченности через водопропускные сооружения ГЭС.

Проведенное исследование показало, что при половодье 0,1 %-ной обеспеченности сбросы воды из водохранилища могут быть произведены через водосливную плотину гидроузла, необходимость использования шлюза для пропуска половодья расчетной обеспеченности маловероятна.

Список литературы

1. Чеботарев А. И. Вопросы влияния хозяйственной деятельности на водный режим и водные ресурсы / А. И. Чеботарев // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — Вып. 206.
2. Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток / И. А. Шикломанов. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 334 с.
3. Красногорская Н. Н. Оценка изменений водности реки Белой как фактора обеспечения безопасности жизнедеятельности человека / Н. Н. Красногорская, Т. Б. Фащевская [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. — 2009. — № 3 (98).
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Л., 1972. — Т. 11. Прил.
5. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. — М., 2004.
6. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 78 с.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НИЖНЕМ ПОДХОДНОМ
КАНАЛЕ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА И ИХ ВЛИЯНИЕ
НА УСЛОВИЯ СТОЯНКИ СУДНА, ОЖИДАЮЩЕГО ШЛЮЗОВАНИЯ
У ПРИЧАЛЬНОЙ СТЕНКИ**

**A STUDY OF WAVE PROCESSES IN THE BOTTOM
APPROACH CHANNEL OF A NAVIGABLE LOCK
AND THEIR INFLUENCE ON CONDITIONS OF MOORAGE
OF THE VESSEL EXPECTING SLUICING AT A MOORING WALL**

В статье разработана математическая модель нестационарных волновых процессов в подходном и магистральном каналах нижнего бьефа шлюза при опорожнении камеры шлюза. Для идеализированной геометрии системы «подходный канал–магистральный канал» модель сведена к одномерному волновому уравнению. Методом отражений получено аналитическое решение задачи для данного случая. Показано, как на основе решенной задачи можно рассчитать продольную гидродинамическую силу, действующую на судно в подходном канале. С целью спецификации граничного условия для одномерного волнового уравнения рассчитана скорость истечения из камеры шлюза для линейной зависимости коэффициента расхода от времени.

The mathematical model of non-stationary wave processes in approach and main channels of bottom bief of a lock is developed at depletion of the lock's camera. For idealized geometry of a system "the approach channel — the main channel" model is reduced to one-dimensional wave equation. Analytical solution of the problem is obtained by the method of reflections for this case. It is shown how on the basis of the solved problem it is possible to calculate the longitudinal hydrodynamic force acting on a vessel in the approach channel. To specify a boundary condition for the one-dimensional wave equation expiration speed from the lock camera for linear dependence of coefficient of an expense on time is calculated.

Ключевые слова: нижний бьеф, шлюз, подходный канал, магистральный канал, продольная гидродинамическая сила.

Key words: bottom bief, lock, approach channel, main channel, longitudinal hydrodynamic force.

1. Разработка математической модели волновых процессов при опорожнении камеры шлюза в симметричном подходном канале.

Задача о волновых процессах в подходном канале нижнего бьефа шлюза будет решаться нами для идеализированной геометрии системы «подходный канал–магистральный канал», что позволит получить аналитическое решение задачи в замкнутом виде.

Примем, что и подходный, и магистральные каналы имеют постоянную (и одинаковую) глубину h и постоянное прямоугольное сечение. Ширина подходного канала равна B_{1cp} , ширина (полубесконечного) магистрального канала равна B_{2cp} , причем $B_{1cp} > B_{2cp}$ (подходный канал шире магистрального). Ниже всюду индекс 1 относится к параметрам и переменным, описывающим подходный канал, а индекс 2 — магистральный канал.

Направим ось координат x по длине канала, причем начало координат $x = 0$ соответствует нижней голове шлюза, а точка $x = L$ является точкой сопряжения подходного и магистрального каналов, в которой ширина канала скачком убывает с B_{1cp} до B_{2cp} (рис. 1).

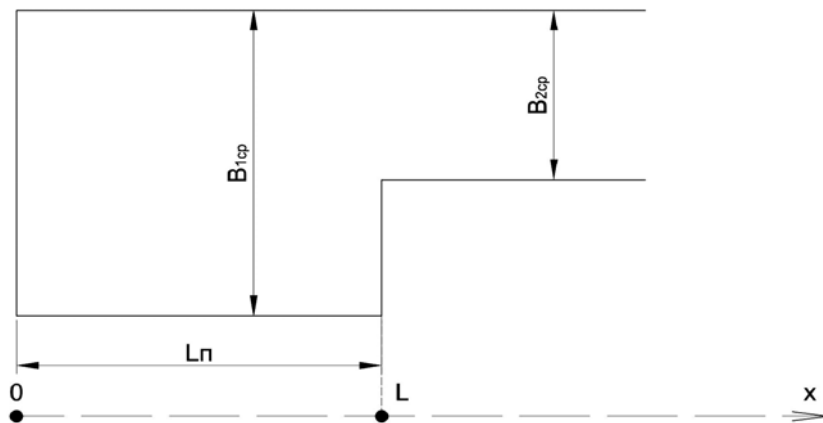


Рис. 1. Идеализированная расчетная схема

Отметим, что, поскольку математическая модель волновых процессов в каналах будет рассматриваться в одномерном приближении (см. ниже), простота геометрии модельной задачи приводит к тому, что она будет давать одинаковые результаты как для симметричного, так и для несимметричного подходных каналов.

Ось координат z направим вертикально вверх, причем уровень $z = 0$ будет соответствовать уровню невозмущенной поверхности воды в каналах, а уровень $z = -H$ — дну каналов.

Гравитационные волны в каналах могут быть описаны в линейном приближении при помощи следующих уравнений [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\nabla_- p}{\rho_0} &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \\ \nabla_- \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$p = g\rho_0\zeta, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} w|_{z=0} &= \frac{\partial \zeta}{\partial t} \\ w|_{z=-H} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{u} = (u, v)$ — вектор горизонтальной скорости воды; w — вертикальная скорость воды; p — отклонение давления от гидростатического давления невозмущенного столба воды, вызванное переменным возвышением возмущенной поверхности воды, ρ_0 — плотность воды,

$$\nabla_- = \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y} \quad (4)$$

(где $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ — единичные векторы, направленные по координатным осям x и y); g — ускорение свободного падения; ζ — возвышение возмущенной поверхности воды.

В одномерном приближении все переменные, входящие в (1)–(3), будут зависеть от (x, z) , но не от y ; кроме того, полагаем $v = 0$ (поперечная компонента скорости отсутствует). Тогда система уравнений (1) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

В [1] вышеприведенная система уравнений преобразована к виду, содержащему в качестве неизвестной функции лишь вертикальную скорость w , однако для наших целей удобнее решать задачу в терминах горизонтальной скорости u . Выведем соответствующие уравнения в приближении мелкой воды, то есть рассматривая лишь достаточно длинные волны (длина волны много больше ширины и глубины каналов).

Из структуры частных решений волнового уравнения в приближении мелкой воды [1] видно, что в данном приближении горизонтальная скорость не зависит от глубины ($u(x, z, t) = u(x, t)$), а вертикальная скорость убывает с глубиной линейно. Последнее условие с учетом (3) приводит к зависимости

$$w(x, z, t) = \left(1 + \frac{z}{H}\right) \frac{\partial \zeta}{\partial t}(x, t). \quad (6)$$

Подставляя (6) во второе уравнение системы (5), находим

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

Дифференцируя первое уравнение системы (5) по t , а (7) — по x , получаем

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= -g \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial t} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= -\frac{1}{H} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial t} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

откуда приходим к одномерному волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad (9)$$

где

$$c = \sqrt{gH} \quad (10)$$

— скорость длинных волн в приближении мелкой воды. Отметим, что в данном приближении дисперсия волн отсутствует, то есть фазовая скорость не зависит от частоты и равна групповой.

Как отмечалось выше, в рассматриваемом приближении горизонтальная скорость не зависит от глубины, поэтому для расхода можем записать:

$$Q_1(x, t) = \omega_1 u_1(x, t) \text{ — для подходного канала;} \quad (11)$$

$$Q_2(x, t) = \omega_2 u_2(x, t) \text{ — для магистрального канала,} \quad (12)$$

где ω_1 (ω_2) — площадь живого сечения подходного (магистрального) канала, которую с требуемой степенью точности можно принять постоянной и равной:

$$\omega_1 = B_{1cp} H, \quad \omega_2 = B_{2cp} H. \quad (13)$$

Уравнение (9) описывает динамику скорости воды как в подходном, так и в магистральном канале, при этом в силу одинаковой глубины каналов скорость волны в них согласно (10) также будет одинаковой.

Выведем теперь условия сшивания решений $u_1(x, t)$ в подходном канале и $u_2(x, t)$ в магистральном канале в точке сопряжения $x = L$.

Во-первых, необходимо потребовать непрерывности расхода при $x = L$, то есть

$$Q_1(L, t) = Q_2(L, t), \quad (14)$$

откуда с учетом (11)–(13) получаем первое условие сшивания решений:

$$u_1(L, t) = b u_2(L, t), \quad (15)$$

где введен параметр

$$b = \frac{B_{2cp}}{B_{1cp}} \quad (16)$$

(отметим, что $0 < b < 1$, так как подходный канал шире магистрального).

Во-вторых, необходимо потребовать непрерывности возвышения поверхности воды при $x = L$, то есть

$$\zeta_1(L, t) = \zeta_2(L, t). \quad (17)$$

Подставляя (17) в (7), получаем второе условие сшивания решений:

$$\frac{\partial u_1}{\partial x}(L, t) = \frac{\partial u_2}{\partial x}(L, t). \quad (18)$$

Окончательно приходим к следующей математической модели:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = 0, \quad 0 < x < L, \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} = 0, \quad x > L, \quad (20)$$

$$u_1(0, t) = u_0(t), \quad (21)$$

$$u_1(L, t) = bu_2(L, t), \quad (22)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x}(L, t) = \frac{\partial u_2}{\partial x}(L, t). \quad (23)$$

$$u_1(x, 0) = 0, \quad 0 < x < L, \quad (24)$$

$$u_2(x, 0) = 0, \quad x > L, \quad (25)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t}(x, 0) = 0, \quad 0 < x < L, \quad (26)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t}(x, 0) = 0, \quad x > L. \quad (27)$$

Уравнение (21) — это граничное условие при $x = 0$, где $u_0(t)$ — заданная функция времени. Уравнения (24)–(27) — это естественные начальные условия (предполагается, что вода в каналах до начала опорожнения камеры шлюза покоилась).

Отметим, что в силу полубесконечности модельного магистрального канала систему (19)–(27) необходимо дополнить условием при $x = +\infty$, заключающимся в наличии только прямой (прошедшей) волны и отсутствием обратной волны. Это условие, замыкающее задачу, будет естественным образом учтено при построении решения системы (19)–(27) методом отражений.

2. Аналитическое решение задачи.

Методы решения задач, сводящихся к одномерному волновому уравнению, детально разработаны в [3]. Решим систему (19)–(27) методом отражений, предполагая временную зависимость $u_0(t)$ в граничном условии (21) заданной.

Известно, что решения одномерного волнового уравнения (9) (соответственно (19), (20)) обладают следующими свойствами:

- 1) в силу линейности уравнения для решений справедлив принцип суперпозиции;
- 2) в силу отсутствия дисперсии импульс возмущения распространяется без искажения формы;

3) решения представляются в виде суперпозиции прямых (вида $u(x - ct)$) и обратных (вида $u(x + ct)$) волн.

Будем предполагать функцию $u_0(t)$, фигурирующую в граничном условии (21), финитной, то есть отличной от нуля лишь на конечном промежутке $0 < t < T_2$ ($t = 0$ — момент начала опорожнения камеры шлюза, $t = T_2$ — момент окончания опорожнения камеры шлюза).

Пусть в момент времени $t = 0$ $u_0(t)$ начинает возрастать от нуля. В подходном канале медленно начнет распространяться прямая волна вида $u(x - ct)$, причем согласно граничному условию (21) имеем

$$u(0, t) = u(-ct) = u_0(t), \quad (28)$$

откуда следует соотношение

$$u(\xi) = u_0\left(-\frac{\xi}{c}\right) \quad (29)$$

и, в частности,

$$u(x, t) = u(x - ct) = u_0\left(t - \frac{x}{c}\right). \quad (30)$$

Таким образом, на промежутке времени $0 < t < \tau$, где

$$\tau = \frac{L}{c} \quad (31)$$

— время распространения возмущения от начала координат до точки сопряжения, имеем решение (рис. 2):

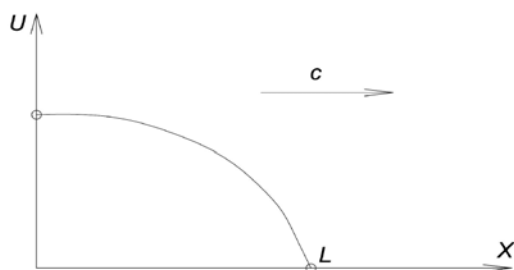


Рис. 2. Зависимость распространения волн

$$u_1(x, t) = u(x - ct), \quad 0 < x < L, \quad (32)$$

$$u_2(x, t) = 0, \quad x > L. \quad (33)$$

В момент времени $t = \tau$ фронт возмущения достигнет точки сопряжения, после чего будет иметь место частичное отражение и частичное прохождение падающего возмущения (рис. 3). Запишем решение при $\tau < t < 2\tau$ в виде

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= u(x - ct) - Ru(2L - x - ct), \quad 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= Tu(x - ct), \quad x > L \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Величины $(-R)$ и T играют роль (пока неизвестных) коэффициентов отражения и прохождения. Их значения могут быть определены из условия сшивания решений в точке сопряжения $x = L$. Действительно, при $x = L$ решение системы уравнений (34) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} u_1(L, t) &= (1 - R)u(L - ct) \\ u_2(L, t) &= Tu(L - ct) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Вместе с тем, дифференцируя решение (34) по x , получаем

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial x}(L, t) &= (1 + R)u'(L - ct) \\ \frac{\partial u_2}{\partial x}(L, t) &= Tu'(L - ct) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

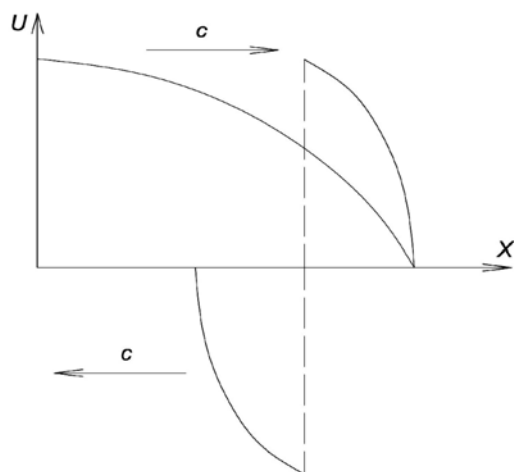


Рис. 3. Отражение волн

С учетом условий сшивания решений (22)–(23) получаем из (34)–(36) систему уравнений для R и T :

$$\left. \begin{aligned} 1 - R &= bT \\ 1 + R &= T \end{aligned} \right\}, \quad (37)$$

решая которую, находим

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{1-b}{1+b} \\ T &= \frac{2}{1+b} \end{aligned} \right\}. \quad (38)$$

Отметим, что ввиду соотношения $0 < b < 1$ для R и T выполнены неравенства:

$$0 < R < 1, \quad (39)$$

$$T > 1. \quad (40)$$

Итак, решение (34) с коэффициентом отражения $(-R)$ и коэффициентом прохождения T , заданных системой (38), справедливо на промежутке времени $\tau < t < 2\tau$.

В момент времени $t = 2\tau$ обратная волна отразится от начала координат (с коэффициентом отражения, равным -1) и в подходном канале возникнет вторая прямая волна. В результате на промежутке времени $2\tau < t < 3\tau$ решение будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= u(x - ct) - Ru(2L - x - ct) + Ru(x - ct + 2L), \quad 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= Tu(x - ct), \quad x > L \end{aligned} \right\}. \quad (41)$$

В момент времени $t = 3\tau$ вторая прямая волна достигнет точки сопряжения, где вновь будет иметь место частичное отражение и частичное прохождение. Поэтому на промежутке времени $3\tau < t < 4\tau$ решение будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= u(x - ct) - Ru(2L - x - ct) + Ru(x - ct + 2L) - R^2u(4L - x - ct), \quad 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= T(u(x - ct) + Ru(x - ct + 2L)), \quad x > L \end{aligned} \right\}. \quad (42)$$

Продолжая подобные рассуждения, можем записать решения задачи в виде ряда

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} R^n u(x - ct + 2nL) - \sum_{n=1}^{\infty} R^n u(2nL - x - ct), \quad 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= T \sum_{n=0}^{\infty} R^n u(x - ct + 2nL), \quad x > L \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

или, переходя от u к u_0 согласно формуле (29):

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} R^n u_0\left(t - 2n\tau - \frac{x}{c}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} R^n u_0\left(t - 2n\tau + \frac{x}{c}\right), \quad 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= T \sum_{n=0}^{\infty} R^n u_0\left(t - 2n\tau - \frac{x}{c}\right), \quad x > L \end{aligned} \right\}. \quad (44)$$

Отметим, что, формально, ряды в системах уравнений (43)–(44) содержат бесконечное число членов. Однако, поскольку, как отмечалось выше, функция $u_0(t)$ предполагается финитной, реально при каждом конкретном x все суммы в (43)–(44) содержат лишь конечное (хотя и растущее со временем) число членов.

3. Гидродинамическое воздействие потока на судно, ожидающее шлюзования в нижнем подходном канале.

Судно, находящееся в камере при ее наполнении, испытывает давление неустановившегося потока воды — гидродинамическую силу, которая меняется по величине и направлению. Гидродинамическая сила складывается из трех составляющих:

- 1) волновая составляющая гидродинамической силы (P_1);
- 2) составляющая гидродинамической силы, обусловленная силами трения о корпус судна и лобового сопротивления (P_2);
- 3) составляющая гидродинамической силы, обусловленная неравномерностью распределения скоростей по глубине потока (P_3).

Лимитирующей является прямая гидродинамическая сила, а обратная, возникающая при отражении волны, всегда меньше прямой и зависит от коэффициента отражения. Так как мы рассматриваем волновое воздействие на судно при условии $x = +\infty$ для системы (19)–(27), то обратную силу рассматривать не будем.

Согласно [2] продольная гидродинамическая сила, действующая на судно в подходном канале, может быть представлена (в обозначениях, принятых в настоящей работе) в следующем виде:

$$P(x, t) = P_1(x, t) + P_2(x, t) + P_3(x, t), \quad (45)$$

где

$$P_1(x, t) = \frac{W}{g(\omega_1 - \otimes)} \frac{\partial Q_1}{\partial t}(x, t) \quad (46)$$

— волновая составляющая гидродинамической силы;

$$P_2(x, t) = \kappa \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \otimes u^2(x, t) \quad (47)$$

— составляющая гидродинамической силы, обусловленная силами трения о корпус судна и лобового сопротивления;

$$P_3(x, t) = (\alpha - 1) P_2(x, t) \quad (48)$$

— составляющая гидродинамической силы, обусловленная неравномерностью распределения скоростей по глубине потока.

В (46) W — весовое водоизмещение судна; $\otimes$ — площадь погруженной части поперечного сечения судна по миделю; $Q_1(x, t)$ — расход, заданный формулой (11). В (47) κ — эмпирический коэффициент, зависящий от рода поверхности судна;

$$n = \frac{\omega_1}{\otimes} \quad (49)$$

— коэффициент стеснения судном живого сечения подходного канала.

В (48) α — коэффициент кинетической энергии потока (см. [2]).

Если скорость $u_1(x, t)$ в подходном канале вычислена по формуле (44), то с учетом (11), (45)–(48) полная продольная гидродинамическая сила, действующая на судно в подходном канале, может быть записана в форме

$$P(x, t) = A \frac{\partial u_1}{\partial t}(x, t) + \alpha B u_1^2(x, t), \quad (50)$$

где введены новые вспомогательные параметры:

$$A = \frac{\omega_1}{\omega_1 - \otimes} \frac{W}{g}, \quad (51)$$

$$B = \kappa \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \otimes. \quad (52)$$

Для практических расчетов по формуле (50) с учетом явного вида решения (44) для $u_1(x, t)$ необходимо знать зависимость от времени функции $u_0(t)$, фигурирующей в граничном условии (21). Для определения функции $u_0(t)$ воспользуемся положениями, изложенными в [2], однако итоговые результаты представляют собой новые формулы, не содержащиеся в цитированной работе.

Пусть $v(t)$ — скорость истечения воды из камеры шлюза при ее опорожнении, ω_s — расчетное сечение водопроводной галереи. Тогда из условия равенства расходов запишем

$$\omega_1 u_0(t) = \omega_s v(t), \quad (53)$$

откуда

$$u_0(t) = \frac{\omega_s}{\omega_1} v(t). \quad (54)$$

Найдем $v(t)$, используя соотношение, вытекающее из формулы Бернулли [2]:

$$v = \mu_t \sqrt{2gh}, \quad (55)$$

где μ_t — зависящий от времени коэффициент расхода; h — превышение уровня воды в камере шлюза.

Вместе с тем из условия равенства расходов получаем

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{\omega_s}{\Omega} v, \quad (56)$$

где Ω — площадь камеры шлюза.

Подставляя (55) в (56), приходим к замкнутому дифференциальному уравнению:

$$\frac{dh}{dt} = -\mu_t \frac{\omega_s}{\Omega} \sqrt{2gh}, \quad (57)$$

переменные в котором разделяются:

$$\frac{dh}{\sqrt{h}} = -\sqrt{2g} \frac{\omega_s}{\Omega} \mu_t dt, \quad (58)$$

Отсюда интегрированием находим

$$2(\sqrt{h} - \sqrt{h_0}) = -\sqrt{2g} \frac{\omega_s}{\Omega} \int_0^t \mu_t dt', \quad (59)$$

где h_0 — превышение уровня воды в камере шлюза в начальный момент времени.

Вновь используя (55), получаем из (59):

$$v(t) = \mu_t v_b \left(1 - \frac{1}{T^*} \int_0^t \mu_t dt' \right), \quad (60)$$

где введены вспомогательные обозначения:

$$v_b = \sqrt{2gh_0}, \quad (61)$$

$$T^* = \frac{v_b}{g} \frac{\Omega}{\omega_s}. \quad (62)$$

Скорость v_b в (61) — это скорость истечения в начальный момент времени, которая имела бы

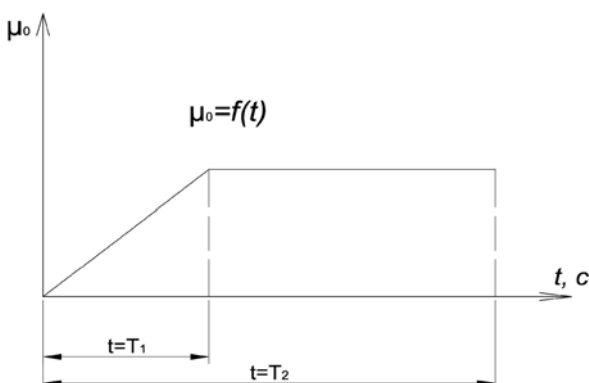


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода μ_0 от времени t

место в гипотетическом случае, когда затвор открывается мгновенно. Время T^* — это время опорожнения камеры, которое наблюдалось бы, если бы затвор открывался мгновенно и коэффициент расхода μ_t имел бы постоянное значение, равное единице (иными словами, это минимально возможное время опорожнения камеры).

Зададимся теперь конкретной зависимостью от времени коэффициента расхода μ_t (рис. 4).

Положим, что μ_t сперва нарастает во времени линейно, от значения 0 при $t = 0$ до некоторого значения μ_0 при $t = T_1 = (v_{з.п.})_{доп} / h_{з.п.}$ (должно быть равно полному времени подъема затвора опорожнения), а затем сохраняет достигнутое постоянное значение μ_0 до конца опорожнения камеры, аналогично [2]. Иными словами,

$$\mu_t = \begin{cases} \mu_0 \frac{t}{T_1}, & 0 < t < T_1, \\ \mu_0, & t > T_1. \end{cases} \quad (63)$$

Тогда, очевидно:

$$\int_0^t \mu_{t'} dt' = \begin{cases} \frac{\mu_0}{2T_1} t^2, & 0 < t < T_1, \\ \mu_0 \left(t - \frac{T_1}{2} \right), & t > T_1, \end{cases} \quad (64)$$

и, подставляя (63)–(64) в (60), находим

$$v(t) = \begin{cases} v_b \frac{\mu_0}{T_1} t \left(1 - \frac{\mu_0}{2T_1 T^*} t^2 \right), & 0 < t < T_1, \\ v_b \mu_0 \left(1 - \frac{\mu_0}{T^*} \left\{ t - \frac{T_1}{2} \right\} \right), & t > T_1. \end{cases} \quad (65)$$

Из второго из уравнений (65), в частности, несложно усмотреть, что время полного опорожнения камеры задается формулой

$$T_2 = \frac{T^*}{\mu_0} + \frac{T_1}{2}. \quad (66)$$

Тогда согласно (54) получаем граничное условие для волновой задачи в виде:

$$u_0(t) = \begin{cases} v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \frac{\mu_0}{T_1} t \left(1 - \frac{\mu_0}{2T_1 T^*} t^2 \right), & 0 < t < T_1, \\ v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \mu_0 \left(1 - \frac{\mu_0}{T^*} \left\{ t - \frac{T_1}{2} \right\} \right), & T_1 < t < T_2, \end{cases} \quad (67)$$

где T_2 задается формулой (66).

Зная $u_0(t)$, можем найти $u(x, t)$ для любых x и t по формулам (43)–(44). Подставляя результат расчета по формуле (43) в формулу для продольной силы (50), получим продольную гидродинамическую силу, действующую на судно в подходном канале.

Отметим, что, поскольку в (50) фигурирует частная производная $\partial u_1(x, t) / \partial t$, при практических расчетах нужно еще почленно продифференцировать по времени ряд (43), что в итоге сведется к отысканию производной от $u_0(t)$. Действительно, дифференцируя (43) по времени, находим

$$\frac{\partial u_1}{\partial t}(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} R^n u'_0 \left(t - 2n\tau - \frac{x}{c} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} R^n u'_0 \left(t - 2n\tau + \frac{x}{c} \right), \quad 0 < x < L. \quad (68)$$

Если для коэффициента расхода μ_t принята временная зависимость (63), как это было сделано выше, то соответствующее дифференцирование решения задачи об опорожнении камеры шлюза в форме (67) дает:

$$u'_0(t) = \begin{cases} v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \frac{\mu_0}{T_1} \left(1 - \frac{3\mu_0}{2T_1 T^*} t^2 \right), & 0 < t < T_1, \\ -v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \frac{\mu_0^2}{T^*}, & T_1 < t < T_2. \end{cases} \quad (69)$$

Резюмируя, для расчета продольной гидродинамической силы, действующей на судно в некоторой точке подходного канала x в некоторый момент времени t , необходимо подставить в формулу (50) с коэффициентами (51)–(52) (конечные) ряды (43) и (68). Если для временной зависимости коэффициента расхода μ_t принята модель (43), то в указанные (конечные) ряды надо, в свою очередь, подставить соотношения (67) и (69). Задав численные значения параметров системы, можем указанным методом рассчитать численное значение продольной гидродинамической силы, действующей на судно. Численные расчеты по определению гидродинамической силы на примере конкретного шлюза с построением графиков зависимостей и определением оптимального места стоянки судна в ожидании шлюзования будут представлены в следующей статье.

4. Заключение.

Таким образом, при исследовании волновых процессов в нижнем подходном канале судного шлюза и их влияния на условия стоянки судна, ожидающего шлюзования у причальной стенки, получены следующие основные результаты:

- 1) разработана математическая модель, описывающая волновые процессы в нижнем подходном канале при опорожнении камеры судного шлюза;
- 2) рассмотрено аналитическое решение задачи;
- 3) определено гидродинамическое воздействие на судно, ожидающее шлюзования у причальной стенки.

Список литературы

1. *Бреховских Л. М.* Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн) / Л. М. Бреховских, В. В. Гончаров. — М.: Наука, 1982. — 336 с.
2. *Семанов Н. А.* Судходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1970. — 352 с.
3. *Соболев С. Л.* Уравнения математической физики / С. Л. Соболев. — 2-е изд., перераб. — М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1950. — 424 с.

**ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ ВКЛАДЫШАМИ ОПОРНО-УПОРНЫХ
ПОДУШЕК НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ УСИЛИЙ
И НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ДВУСТВОРЧАТЫХ ШЛЮЗОВЫХ ВОРОТ**

**INFLUENCE OF GAPS IN ABUTMENT INSERTS
ON CONTACT FORCES DISTRIBUTION AND STRESS-STRAIN STATE
OF DOUBLEWING LOCK GATE**

В данной статье рассматриваются отклонения от проектных параметров зазоров в опорных элементах и их влияние на опорные реакции и напряжения в металлоконструкциях двустворчатых ворот.

In this article fluctuations in abutments and their effects on forces and stresses in hardware of doublewing lock gate are considered.

Ключевые слова: прочность, металлоконструкции, двустворчатые шлюзовые ворота, зазоры в опорных элементах, реакции, напряжения.

Key words: strength, hardware, doublewing lock gate, fluctuations in abutments, forces, stresses.

Введение

Среди имеющегося разнообразия конструкций шлюзовых ворот особое место занимают двухстворчатые шлюзовые ворота (ДШВ), входящие в напорные фронты крупнейших гидротехнических комплексов и воспринимающие гидростатические напоры до 25 м и выше.

ДШВ являются высоконагруженными конструкциями, что с учетом повышенных требований [1; 2; 4], предъявляемых к сооружениям данного типа, требует проведения [3; 6]:

- 1) периодического контроля уровня их напряженно-деформированного состояния;
- 2) визуального осмотра зон повышенных напряжений и зон, в которых с наибольшей вероятностью возможно образование трещин и остаточных деформаций;
- 3) замеров остаточных толщин силовых элементов металлоконструкций.
- 4) наблюдений за положением упорно-опорных элементов с измерением величин зазоров между вкладышами и с последующим проведением работ по их регулировке.

Механизм перераспределения усилий при отклонениях одиночных вкладышей достаточно ясен. Подушка с выступающим вкладышем вступает в контакт со своей опорной подушкой раньше соседних и воспринимает частично или полностью, в зависимости от величины выступления, приходящиеся на них опорные реакции. Подушка с западающим вкладышем вступает в контакт позже соседних (или вообще не вступает). Приходящуюся на нее опорную реакцию частично или полностью, в зависимости от величины западания, воспринимают соседние подушки. Очевидно также, что при выступании вкладыша возможно появление большего усилия в подушках, чем при его западании, поскольку в условно упругой задаче опорная реакция на одиночную выступающую подушку, в принципе, ограничена лишь суммарной реакцией опор на том краю створки, где находится эта подушка, а в случае западания вкладыша увеличение усилий в соседних подушках ограничено величиной усилия, «снятого» с этого вкладыша.

Характерной особенностью двухстворчатых ворот является то, что отклонения положения тех или иных вкладышей от проектных положений оказывают существенное влияние на перераспределение усилий в подушках того края ворот (вереяльного или створного), где находятся эти вкладыши. В то же время выступания и западания вкладышей одного края ворот в меньшей степени влияют на распределение усилий в подушках другого края. Это объясняется большой жесткостью створки в плоскости полотнища. По наиболее нагруженным подушкам изменения усилий при отклонениях вкладышей от проектных значений противоположной стороны не превышают 10 %.

Анализ результатов исследований

Для оценки реальных величин возможных западаний или выступаний вкладышей подушек двухстворчатых ворот различных типов был проведен анализ данных по замерам зазоров между вкладышами ворот в верях и створах. С использованием метода наименьших квадратов, с учетом усилий в подушках как весовых функций были построены прямые линии, аппроксимирующие поведение зазоров по высоте створок.

Углы наклона построенных прямых к оси абсцисс характеризуют отклонения кромок створок ворот от контактных плоскостей в верях и створах (клиновые углы) при сведенных створках в отсутствие перепада гидростатического давления. Величины этих углов зависят от провисания створки как жесткого тела под действием весовой нагрузки, а также от ее остаточной деформации под влиянием распорных усилий.

Западание и выступание вкладышей подушек определяется отклонением экспериментально замеренных точек от прямой линии (причем это отклонение характеризует взаимное расположение вкладышей в парах контактирующих подушек). В качестве примера на рис. 1 приводятся графики прямых номинального положения вкладышей подушек для изучаемых шлюзовых ворот. Величины отклонений вкладышей от номинальных положений проставлены на рисунках над маркерами. Положительный знак отклонения соответствует западанию вкладыша, отрицательный — его выступанию.

Имеющийся опыт расчетов двухстворчатых шлюзовых ворот, а также специально проведенные расчетные исследования показывают, что наиболее неблагоприятными случаями отклонений являются выступания вкладышей одиночных подушек, приводящие к существенному возрастанию в них усилий. Поэтому в качестве примера для ворот шлюза № 1 канала им. Москвы рассмотрены случаи одиночных выступаний вкладышей упорных подушек вереяльного и створного столба.

Следует отметить, что суммарные реакции опор на вереяльном и створном краях определяются статическими условиями равновесия створки и практически не зависят от жесткостей элементов ее конструкции. В частности, появление коррозии не изменяет суммарные реакции и слабо влияет на реакции в каждой подушке, поскольку одинаковое снижение толщин стенок и полок всех ригелей и диафрагм приводит к равномерному по створке уменьшению жесткостных характеристик ее несущих элементов. В связи с этим представленные ниже исследования усилий в подушках при нештатных граничных условиях проводились без учета влияния коррозии.

Жесткости упорных элементов расчетной модели были найдены из расчета локальной податливости концевой участка фрагмента створки с подушкой. Достоверность этого расчета подтвердилась в ходе ресурсных испытаний фрагмента створки ворот средней головы шлюза № 31 Волгоградского РГС путем замера перемещений на вереяльном участке в направлении оси подушки.

1. Влияние выступания вкладышей на усилия в подушках и напряжения в конструкции на примере двухстворчатых ворот канала им. Москвы.

На основании результатов обработки данных по зазорам были проведены расчеты створки в упругой постановке при следующих величинах одиночных выступаний вкладышей: 8-й подушки верей на 0,7 мм и 1-й подушки створа на 1, 3 и 5 мм.

Характер распределения усилий по подушкам резко изменяется в створе при выступании вкладыша створной подушки и в верее при выступании вкладышей веревяльных подушек по сравнению с расчетом без отклонений вкладышей от номинальных положений.

В выступающей на 0,7 мм 8-й подушке верее усилие возросло почти в полтора раза и составило более 475 тс. При этом снизились усилия в соседних с ней 7, 9 и 11-й подушках, поскольку их вхождение в контакт с закладными затруднено из-за наличия выступающей 8-й подушки.

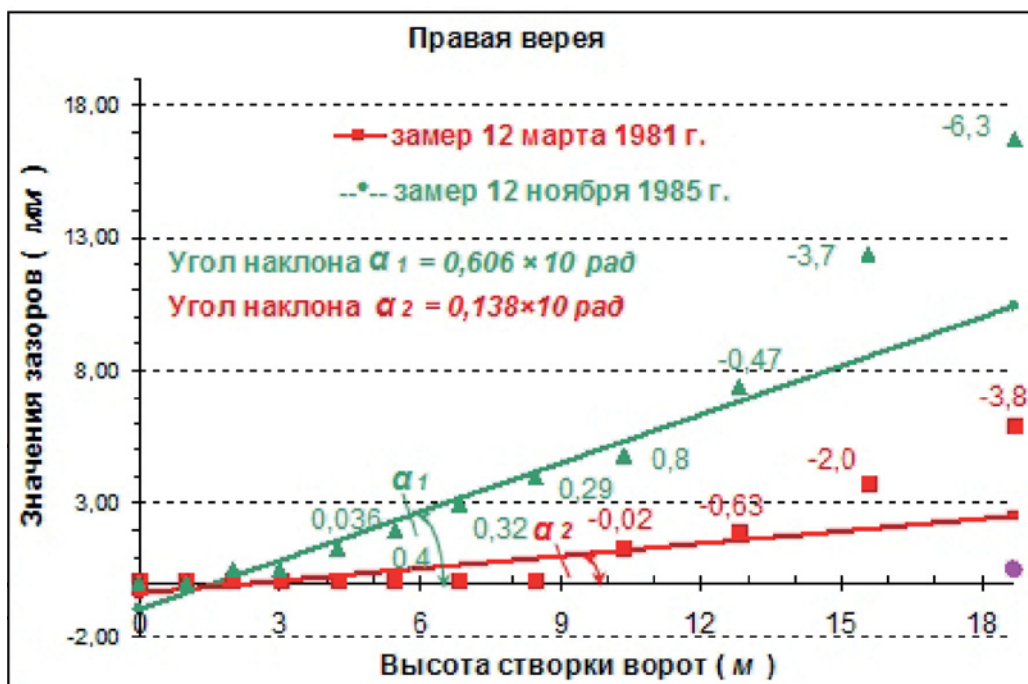
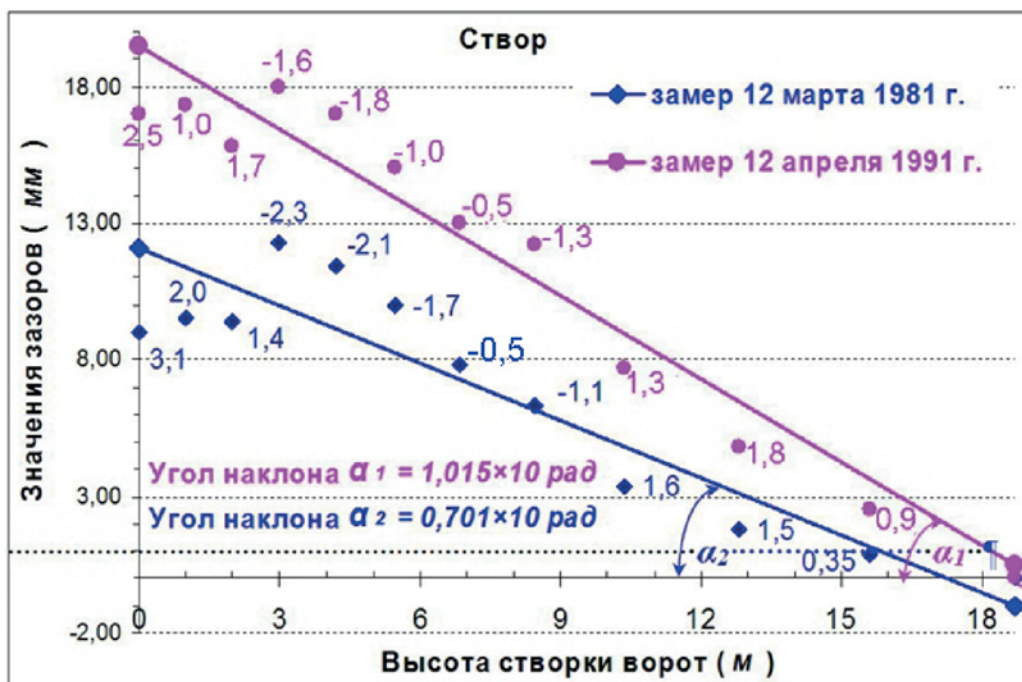


Рис. 1. Зазоры между вкладышами подушек и отклонения вкладышей от усредненной линии номинальных положений в створе и правой верее двустворчатых ворот шлюза № 1 канала им. Москвы

Увеличение усилий в подушках с выступающими вкладышами вызывает значительный рост напряжений в зонах этих подушек у верей и створа. Так, в случае выступления вкладыша 1-й створной подушки на 3 мм напряжения при коррозии до 4 мм достигают вблизи створа почти 30 кгс/мм^2 , тогда как при номинальном положении вкладыша (без выступления) они находятся в пределах 15 кгс/мм^2 . При выступании вкладыша 8-й веревальной подушки на 0,7 мм напряжения в ее окрестности возрастают с 20,8 до $25,7 \text{ кгс/мм}^2$ в соответствии с рис. 2.

Полученные значения напряжений в зонах верей и створа при указанных величинах выступаний вкладышей упорных подушек превышают уровень, допускаемый нормативными документами для несущих элементов металлоконструкций из материала Ст.3.

2. Влияние жесткостей контактирующих подушек на рассогласование усилий в них при выступаниях вкладышей и пределы допустимых отклонений вкладышей.

Проведенная выше расчетная оценка усилий в веревальных и створных подушках при полученных значениях отклонений вкладышей от идеальных положений показывает, что уровень усилий в отдельных подушках может возрасть в 2–2,5 раза по сравнению с номиналом, что приводит к существенной неоднородности условий нагружения веревального и створного столбов и примыкающих к ним зон.

Следует отметить, что возникновение в подушках усилий, существенно превышающих номинальную величину, является одним из возможных факторов образования локальных повреждений торцевых листов в местах крепления упорных подушек.

В связи с этим при проведении плановых замеров зазоров между вкладышами подушек следует обращать особое внимание на точность их установки в оголовках подушек с целью исключения их значительных выступаний.

Допустимая величина отклонений вкладышей должна определяться расчетным путем для каждого типа двустворчатых ворот. Она зависит от жесткости створок в плоскости полотна в направлении распорных усилий, а также от жесткостей закладных подушек и береговых устоев.

В существующих ныне конструкциях двустворчатых ворот податливость створок в направлении действия распорных сил определяется главным образом продольной податливостью ригелей, поскольку последовательно соединенные с ними упорные подушки обладают на порядок меньшей податливостью, а их соединения с ригелями являются жесткими.

Сравнение результатов обработки данных по зазорам для различных ворот показывает, что типовые величины отклонений положения вкладышей в них различаются в несколько раз. Так, типовые выступления вкладышей нижних створных подушек московских ворот составляют 2–5 мм, а новосибирских — 0,5–1,0 мм.

Это в значительной мере связано с большей податливостью створок московских ворот из-за большей длины их ригелей при примерно одинаковой с новосибирскими воротами жесткости ($EF \sim 10^6 \text{ тс/м}$) поперечных сечений ригелей.

Для количественной оценки влияния податливости створок на допустимые величины отклонений вкладышей и усилий в подушках проведены расчеты новосибирских ворот с варьированием величины жесткости упорных элементов при различных значениях выступления вкладыша одной из подушек.

Жесткости упорных элементов расчетной модели, имитирующие жесткости подушек и их соединений с ригелями, варьировались в таких пределах, в которых они являются соразмерными с продольными жесткостями ригелей и тем самым влияют на общую податливость створки.

На рис. 3 представлены графики зависимости расчетной величины усилия в 4-й створной подушке новосибирских ворот от величины жесткости упорных элементов в диапазоне значений от 10^5 до 10^6 тс/м при выступании вкладыша этой подушки на 0,5, 0,7 и 1 мм.

Из графиков следует, что при уменьшении жесткости с 10^6 до 10^5 тс/м усилие в выступающей подушке значительно снижается, причем тем больше, чем больше величина выступа вклада. Усилие в подушке снижается с 345 до 221 тс, то есть на 36 %, при выступании створного вклада на 0,5 мм, с 403 до 234 тс, то есть на 42 %, при выступании створного вклада на 0,7 мм, с 490 до 255 тс, то есть на 48 %, при выступании створного вклада на 1 мм.

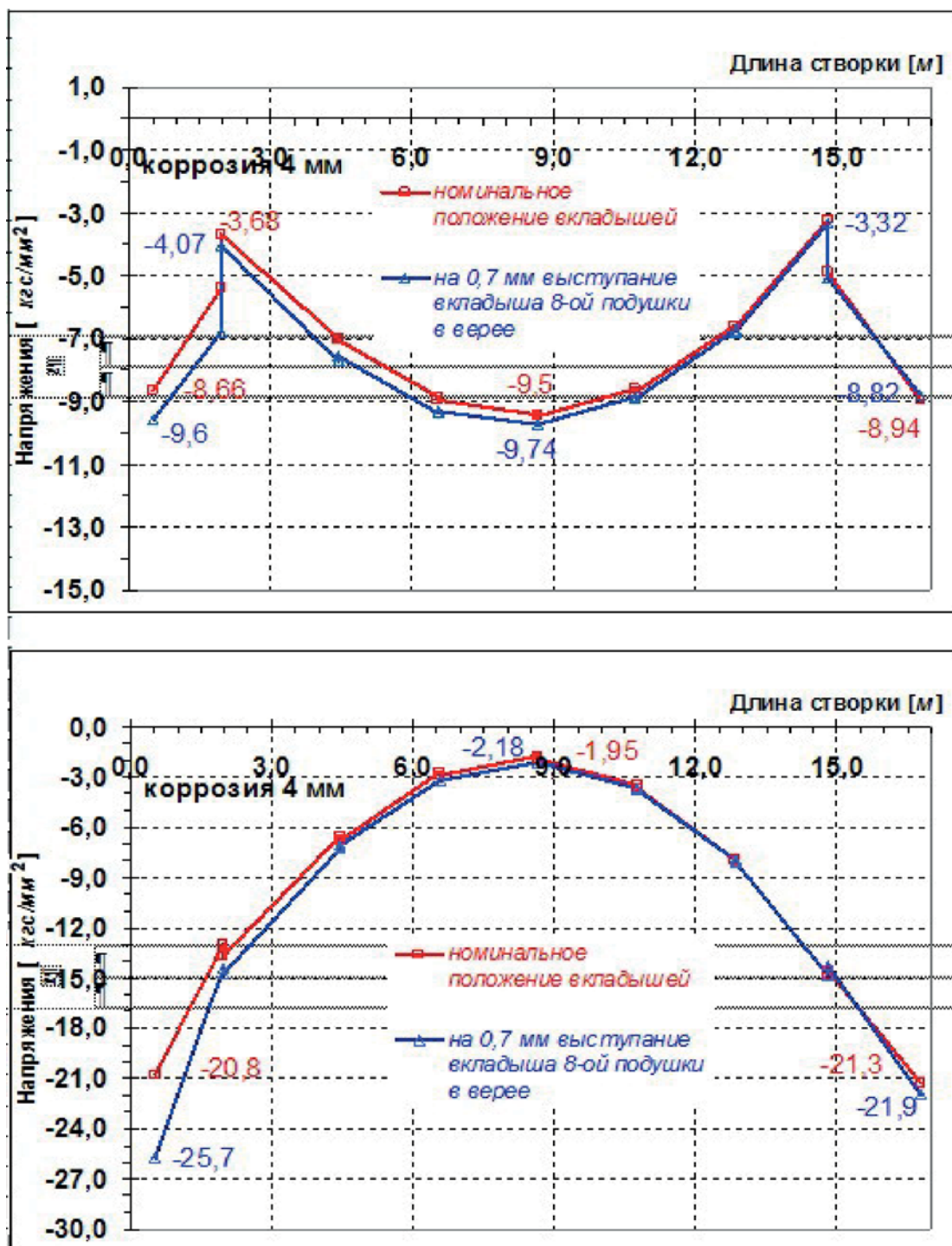


Рис. 2. Влияние выступа вкладышей веревальных подушек на напряжения в конструкции двустворчатых ворот канала им. Москвы

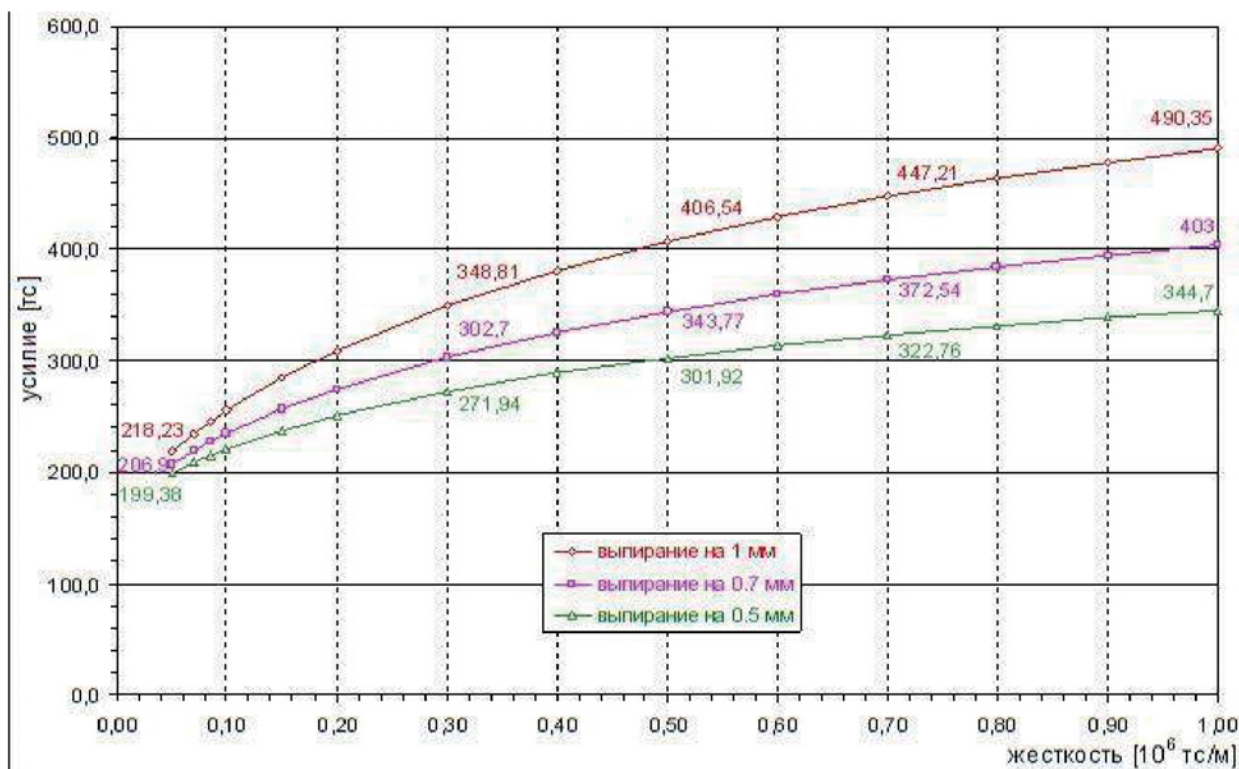


Рис. 3. Величина усилия в 4-й створной подушке новосибирских ворот с выступающим вкладышем в зависимости от жесткости упорных подушек

На рис. 4 приведены диаграммы усилий в створных подушках тех же шлюзовых ворот при жесткостях 10^6 , 5×10^5 и 10^5 тс/м, полученные с учетом выступа вкладки 4-й створной подушки на 3 мм.

Сопоставление значений этих усилий показывает, что при снижении жесткости уменьшается как абсолютная, так и относительная величина усилия в выступающей подушке по сравнению с остальными створными подушками. Если при жесткости 10^6 тс/м это усилие в 2,5 раза превосходит ближайшее к нему по величине, то при жесткостях 5×10^5 тс/м и 10^5 тс/м — соответственно в 2,3 и в 1,4 раза. Из этого следует, что со снижением жесткости упорных элементов уменьшается рассогласование контактных усилий и их распределение по подушкам становится более равномерным.

Это объясняется тем, что при увеличении податливости выступающей подушки возрастает степень включения остальных, особенно соседних подушек, которым становится «легче» достигать своих опор. Таким образом, с уменьшением жесткости подушек выступающая подушка берет на себя убывающую долю суммарной опорной реакции на данном крае створки (суммарные усилия на каждой из сторон створки, как указывалось выше, от жесткостей не зависят).

Анализ графиков на рис. 4 показывает также, что одна и та же величина усилия создается в вариантах с меньшей жесткостью упорных элементов при большей величине выступа. Так, например, усилие ~ 350 тс в вариантах с жесткостью 10^6 тс/м возникает при выступании вкладки на 0,5 мм, с жесткостью $5,4 \times 10^5$ тс/м — на 0,7 мм, с жесткостью 3×10^5 тс/м — на 1 мм. Следовательно, при снижении жесткости на 70 % данная величина усилия сохраняется при вдвое большем выступании.

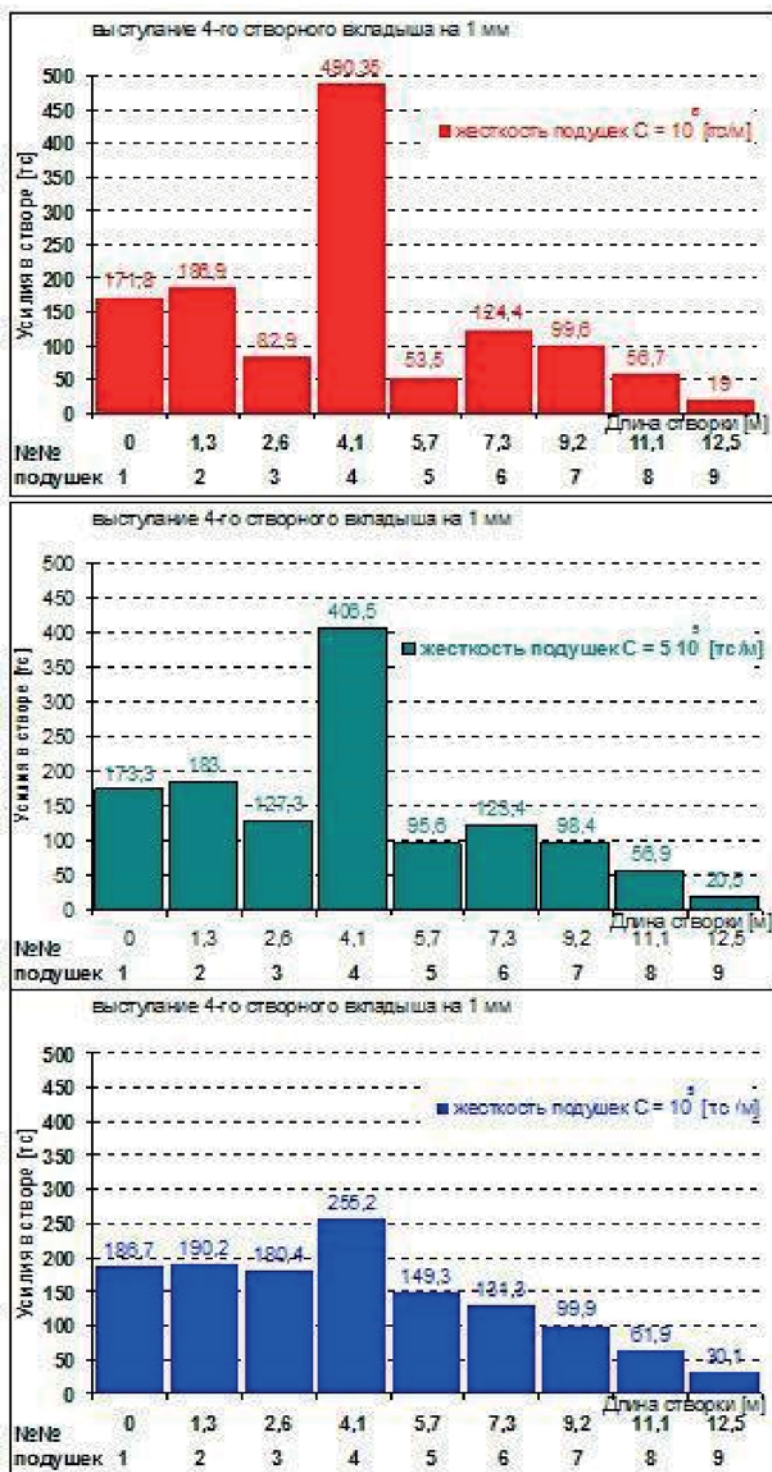


Рис. 4. Зависимость усилий в створных подушках от их жесткости

Выводы

Увеличение податливости упорных элементов ворот позволяет не только понизить усилия в подушках с выступающими вкладышами (и сделать распределение усилий по подушкам более равномерным), но и расширить допустимые пределы отклонений вкладышей от номинальных положений.

В связи с этим при проектировании новых ворот рекомендуется введение в конструкцию створки специальных упругих элементов, предназначенных для увеличения податливости соеди-

нений упорных подушек с ригелями и закладных подушек с колоннами в устоях. Это могут быть, например, амортизирующие резиноподобные прокладки, устанавливаемые под основания подушек, либо профилированная заливка баббита с переменным сечением по толщине слоя.

Следует отметить необходимость экспериментальной проверки работоспособности амортизирующих элементов, а также возможности их замены.

Список литературы

1. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. — М.: Госстрой, 2006. — 30 с.
2. СНиП II-23-81-90. — М.: ЦИТП, 1990. — Ч. II: Нормы проектирования. Стальные конструкции. — 125 с.
3. МУ 050.025-2001. Методические указания. Определение технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС. — М.: ФГУП ЦБНТИ МТ РФ, 2002. — 86 с.
4. Рекомендации по декларированию безопасности судоходных гидротехнических сооружений. — М.: ФАМРТ, 2010. — 34 с.
5. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М.: Мир, 1975. — 539 с.
6. *Лиходед А. И.* Оценка состояния двухстворчатых шлюзовых ворот по величинам коррозионного износа характерных зон металлоконструкций / А. И. Лиходед, И. Ю. Мартынов, В. С. Синельников // Обеспечение прочности и безопасности судоходных гидротехнических сооружений: сб. материалов науч.-практ. конф. — СПб.: ФГОУ ВПО «СПГУВК», 2010.

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ, ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.078.8

Н. С. Корюкин,
аспирант,

ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

КОНКУРЕНТНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА КАК ЦЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОРТОВЫХ ТЕРМИНАЛОВ

COMPETITIVE ADVANTAGE AS THE GOAL AND THE RESULT OF USING INNOVATIVE POTENTIAL OF PORT TERMINALS

Рассматриваются особенности условий конкуренции, состав и источники формирования конкурентных преимуществ портовых терминалов, необходимость комплексного инновационного развития и наличия инновационного потенциала.

The features of competitive conditions, the composition and sources of competitive advantages for port terminals, the need for integrated innovative development and availability of innovative potential are considered.

Ключевые слова: конкуренция, конкурентное преимущество, конкурентоспособность, портовый терминал, инновационное развитие, инновационный потенциал.

Key words: competition, competitive advantage, competitiveness, port terminal, innovative development, innovative potential.

КОНКУРЕНЦИЯ в портах — это динамичный процесс, в нем много участников, действующих самостоятельно или в составе крупных транснациональных транспортных компаний в быстро изменяющейся внешней рыночной среде. Конкуренция создает стимулы для обновления и развития предприятия. Конкуренция может протекать в разных формах, но ее главной целью является сохранение и увеличение объемов оказываемых транспортных работ, то есть рост объема спроса на предлагаемые услуги.

В настоящее время успеха в конкуренции достигает то предприятие, которое предлагает более качественную услугу. Проблема в том, что стивидорной компании для изменения состава и качества оказываемых услуг всегда требуются не только инвестиции, но и время.

Для сохранения конкурентоспособности необходимо формирование и сохранение конкурентных преимуществ. Конкурентное преимущество — это наличие у предприятия дополнительных возможностей по привлечению грузопотоков, клиентов, снижению их чувствительности к уровню тарифов по сравнению с другими предприятиями аналогичного профиля. Чем шире состав конкурентных преимуществ и сильнее их проявление, тем выше оказывается конкурентоспособность стивидорной компании на данном рынке в данное время.

Модель пяти конкурентных сил М. Портера является инструментом изучения конкурентных условий рынка и выбора базовой конкурентной стратегии.

Предприятие формирует конкурентную стратегию с целью сохранения и повышения конкурентоспособности. Базовые стратегии конкуренции, предложенные М. Портером, являются основой стратегической ориентации предприятия и описывают схему обеспечения «определенных конкурентных преимуществ» [4, с. 39]. От выбора стратегии зависят все последующие маркетинговые действия, динамика грузооборота и прибыли.

При этом могут использоваться следующие базовые стратегии:

- экономии издержек;
- дифференциации состава и качества работ и услуг;
- фокусирования, то есть концентрации на сегменте (узкой специализации).

Предприятия, решившие использовать стратегию экономии издержек, все свои действия направляют на всемерное сокращение затрат.

Снижение себестоимости перегрузочных работ на основе экономии затрат — это хороший результат. Но он не может быть главным инструментом конкуренции и борьбы за рост объема грузооборота в условиях обновляющейся структуры грузопотоков, преобладания в структуре импорта дорогостоящих генеральных грузов и, как следствие, повышенных требований к сохранности грузов и скорости их доставки.

Стратегией дифференциации пользуются предприятия, производящие разные по составу и качеству продукты (работы, услуги). Это создает им конкурентные преимущества в глазах многих групп потребителей (партнеров) благодаря возможности удовлетворения комплекса различающихся по составу потребностей («все сразу и в одном месте»). При этом затраты не относятся к числу приоритетных факторов. Примером стратегии дифференциации могут служить стратегии крупнейших универсальных транспортных комплексов РФ.

Данная стратегия успешно используется такими стивидорными компаниями, как ОАО «Морской порт «Санкт-Петербург», ОАО «Петролеспорт», портом «Усть-Луга» и другими портами.

Стратегию концентрации на сегменте (узкую специализацию) в основном применяют предприятия, которые все свои действия направляют на определенный сегмент рынка. При этом они могут стремиться к лидерству за счет экономии на издержках (эффект масштаба), либо к дифференцированию продукта, обеспечению очень высокого качества работ и услуг, либо к совмещению того и другого.

Данная стратегия успешно используется такими специализированными стивидорными компаниями, как ЗАО «Первый контейнерный терминал», ООО «Моби Дик», порт «Бронка», который строится как узкопрофильный. Транспортные терминалы этих компаний специализируются на переработке контейнеров и накатных грузов.

Условия деятельности транспортных терминалов зависят от уровня и характера развития базовых отраслей экономики, а также от развития международной торговли. Особенности рынка портовых услуг делают конкуренцию международной. Например, конкуренцию российским портам составляют в Северо-Западном регионе ограниченное число портов прибалтийских государств и Финляндии, на юге — Украины, на Дальнем Востоке — КНР и Кореи. В последние десятилетия усиление конкуренции происходит на фоне развития международной интеграции транспортных компаний.

Государство поддерживает конкурентоспособность национальных портов. Деятельность многих конкурирующих друг с другом стивидорных компаний на одной территории (в одном транспортном узле) формирует синергетический эффект, повышает их общую конкурентоспособность по сравнению с другими видами транспорта, способными обслужить те же самые грузопотоки. Примером может служить «Большой порт Санкт-Петербург».

Структура грузовых потоков, их распределение по времени и направлениям, применяемые подвижной состав и технологии доставки грузов влияют на динамику объемов, структуру и себестоимость услуг портовых терминалов. Конкуренция между портами оказывается не только ценовой. Она все более сдвигается в сторону информативности, надежности, комплексности и интенсивности обслуживания. Более приоритетными, чем ценовые факторы, являются: скорость (время) обработки судов, сохранность груза, его доступность, а также скорость и качество обработки документов, оформления прихода/отхода судов, таможенных формальностей.

Стивидорная компания, способная максимально быстро обслужить прием и вывоз груза со своей территории, будет обладать большим экономическим преимуществом перед остальными. На первый план выступают информационное обслуживание и уровень развития инфраструктуры порта.

Оценка конкурентоспособности основана на системном и комплексном учете факторов внешней и внутренней среды предприятия. Природно-климатические и географические условия также важны для портов. Для оценки и управления конкурентоспособностью необходимо изучение тенденций развития мирового рынка.

Динамичность условий конкуренции требует от предприятия решения двух проблем: получения высоких результатов в настоящее время и сохранения конкурентоспособности в будущем, то есть обеспечения устойчивости полученного результата. Проблема обеспечения устойчивости конкурентных преимуществ изучается многими экономистами [2; 4].

Многочисленность и разнообразие источников создания конкурентных преимуществ делают конкурентоспособность многоаспектной экономической категорией. Достигнутые конкурентные преимущества должны обладать устойчивостью в пространстве и во времени. Успешное решение этой задачи зависит от наличия у предприятия инновационного потенциала.

В условиях острой конкуренции и изменчивости рынка внедрение инноваций оказывается единственным надежным способом сохранения конкурентоспособности терминалов. При этом состав инновационных изменений у разных терминалов оказывается разным: технико-эксплуатационные, маркетинговые, организационно-экономические, информационные и др.

Способность использовать достижения научно-технического прогресса, выявлять скрытые резервы, обеспечивать ресурсами их внедрение в производство зависит от имеющегося инновационного потенциала. Получаемый при этом экономический эффект создает материальную основу для его дальнейшего развития.

В качестве примера можно рассмотреть состав конкурентных преимуществ, имеющихся в настоящее время у ОАО «Петролеспорт» — современного производственно-технологического портового комплекса. Порт имеет специализированные терминалы: контейнерный, паромный, рефрижераторный, развитую инфраструктуру, современное оборудование, квалифицированный персонал.

Это предприятие на практике реализует стратегию многоаспектного инновационного развития, что обеспечивает ему формирование многих конкурентных преимуществ по сравнению с другими участниками рынка стивидорных услуг и позволяет в течение ряда лет сохранять высокую конкурентоспособность. В результате обеспечены стабильность и возможность выполнения долгосрочной инвестиционной программы. Современный этап ее реализации был начат в 2002 г. Горизонт планирования охватывает 2030 г.

Характер инновационных изменений, внедряемых портом, разнообразен. Они создают предприятию конкурентные преимущества, что видно из рисунка, и позволяют компании обеспечивать для клиентов и партнеров высокое качество обслуживания.

В настоящее время наиболее активно используются следующие из них:

- 1) дифференцированный состав, комплексный характер предоставляемых работ/услуг;
- 2) современная материально-техническая база, наличие развитой транспортной инфраструктуры, выгодное географическое месторасположение;
- 3) надежная клиентская база в лице крупных российских и иностранных компаний;
- 4) комплексное информационное обслуживание всех процессов, клиентов, партнеров, система электронного документооборота. Этим обеспечивается доступность услуг, оперативность управления и регулирования прохождения грузов, подвижного состава, документов через порт;
- 5) успешная реализация долгосрочных инвестиционных программ с участием государства;
- 6) вхождение в международный транспортный холдинг и обслуживание международных грузовых линий;
- 7) своевременная переориентация на переработку наиболее эффективных и быстро растущих грузопотоков накатных (Ro-Ro) грузов, контейнерных грузов, включая рефрижераторные;
- 8) наличие аванпорта в пос. Янино и др.

Достигнутые конкурентные преимущества, возрастающие объемы грузооборота создают возможности и требуют комплексного инновационного развития предприятия.

Порт расположен в морской акватории Санкт-Петербурга. Удобное территориальное расположение обеспечивает условия взаимодействия морского, речного, автомобильного и железнодорожного транспорта.

В 2009 г. порт завершил базовый этап программы развития специализированного паромного терминала, в ходе которого были значительно расширены мощности компании по перевалке легковых автомобилей и других грузов Ro-Ro. Паромный терминал порта — крупнейший в России комплекс по обработке Ro-Ro грузов, на нем возможна перегрузка всех типов автомобилей, колесной техники и других грузов.

Операции по инспекции легковых автомобилей в круглосуточном режиме проводит ведущая сюрвейерская компания “SGS”, осуществляющая аналогичный сервис в ряде европейских портов. Таможенная очистка импортируемой техники осуществляется на территории терминала.

В 2010 г. на паромном терминале ОАО «Петролеспорт» был введен в эксплуатацию новый склад крытого хранения. Это позволило ОАО «Петролеспорт» и его партнерам — линейным операторам привлечь к перевозкам на европейском направлении дополнительные объемы грузов, требующих крытого хранения, таких как фрукты, овощи, бумага, бумажная продукция, строительные материалы и пр. На складе возможна перетарка грузов Ro-Ro и перегрузка на транспорт получателей.

Новый склад не только значительно расширил возможности ОАО «Петролеспорт» по оказанию услуг клиентам Ro-Ro терминала, но и повысил конкурентоспособность линейных Ro-Ro операторов, для которых ОАО «Петролеспорт» является базовым терминалом в России (рис. 1).



Рис. 1. Используемые конкурентные преимущества ОАО «Петролеспорт»

Завершение в 2009 г. строительства транспортной развязки (включающей тоннель) обеспечило возможность пересечения железной дороги на нескольких уровнях, что позволит перемещать грузы в направлении других стивидорных компаний «Большого порта Санкт-Петербург».

Паромный терминал ОАО «Петролеспорта» включен в линейное расписание нескольких линейных операторов: Transfennica, DFDS-Совкомфлот, K-Line (KESS), Rolf Logistics (Wallenius

Wilhelmsen Logistics). Предприятие стало базовой площадкой по ввозу в Россию легковых автомобилей иностранного производства для ведущего автомобильного дилера компании “Rolf SCS” (входит в группу «РОЛЬФ»).

Перегруженная в 2010 г. партия локомотивов стала первой поставкой техники из Соединенных Штатов Америки в адрес казахстанских железнодорожников через северо-запад России. Предыдущие партии доставлялись в Казахстан по другой логистической схеме — через порты Ильичевск (Украина) и Новороссийск (Россия). В итоге инновационные изменения сформировали технологические, ассортиментные и иные конкурентные преимущества.

Очередной этап реализации программы обновления ОАО «Петролеспорт» был начат в 2011 г. после утверждения совместной с государством инвестиционной программы развития и обновления порта. От лица государства в реализации программы выступает ФГУП «Росморпорт».

Руководство любого предприятия, достигшего определенного уровня конкурентоспособности, понимает, что имеющийся состав конкурентных преимуществ в будущем может измениться. Для сохранения конкурентоспособности портового терминала необходима многоплановая инновационная деятельность по созданию конкурентных преимуществ бизнеса, формированию и развитию его инновационного потенциала.

Список литературы

1. *Бабурин В. А.* Конкуренция и конкурентоспособность портов / В. А. Бабурин, Л. Н. Буянова. — СПб.: СПГУВК, 2011. — 140 с.
2. *Ламбен Ж.-Ж.* Менеджмент, ориентированный на рынок / Ж.-Ж. Ламбен, Р. Чумпитас, И. Шулинг; пер. с англ. под ред. В. Б. Колчанова. — 2-е изд. — СПб.: Питер. 2010. — 720 с.
3. *Поваров Г. В.* Экономика предприятия: учеб. пособие / Г. В. Поваров, Е. В. Черняева. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 232 с.
4. *Портер М. Е.* Конкурентное преимущество: Как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость / М. Е. Портер. — М.: Издат. дом «Альпина Бизнес Букс», 2005. — 715 с.
5. www.petrolesport.ru
6. www.portnews.ru
7. www.tks.ru

УДК 656.614.3:339.5

С. Е. Иванова,
канд. экон. наук, профессор;

Н. В. Митрофанова,
канд. экон. наук,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАТЫ В КОНТЕЙНЕРНОМ СУДОХОДСТВЕ

METHODICAL BASES OF MAKING OF PRICE ON MARINE CONTAINER TRANSPORT

В рыночных условиях определение цены перевозки груза является важным элементом процесса купли-продажи товара. Авторами статьи была предпринята попытка методически обобщить современную практику формирования стоимости перевозки в контейнерном судоходстве. В статье приводится формульная база и подробный перечень надбавок к ставке фрахта на линии. В заключение делается вывод об итогах проведенного исследования.

The cost for carriage of cargo is the important element of the sale of good in market circumstances. The authors of the article try to show the methodical bases of making the price for carriage of containers in present time. In the article there is full list of increase to the rate of freight on line. In the end of article there is conclusion about the research made.

Ключевые слова: контейнерное судоходство, ставка фрахта, надбавки к ставке фрахта, терминальные работы, контейнерный терминал.

Key words: container shipping, rate of freight, increase to the rate of freight, terminal works, container terminal.



АСТОЯЩАЯ статья является продолжением исследования процесса тарификации в контейнерном судоходстве.

Процесс перевозки груза нуждается в тщательной организации не только с позиций качества и скорости доставки. Немаловажное значение имеет стоимость его перемещения от продавца к покупателю. И чем большее расстояние преодолевает товар, тем большую долю составляют транспортные расходы в его конечной стоимости.

В настоящее время в мире в контейнерах перевозится более 60 % грузов, пригодных для этого способа транспортировки [7]. При этом рынок морских контейнерных перевозок в интересах российского экспорта и импорта по оценке Минтранса составляет порядка 2 млрд долл. [8]. За последние шесть лет темпы роста оборота контейнеров в морских портах России демонстрируют положительную динамику. Главными причинами роста российских контейнерных перевозок являются: формирование глобальной производственно-экономической системы, сопровождающейся углублением международного разделения труда, стремительным ростом международной торговли и переход России от модели автаркии к стратегии открытости мировому рынку [1, с. 20–23]. Вхождение России в мировой рынок привело к росту всех ее внешнеторговых показателей. Если в структуре российского экспорта преобладает сырье, то в импорте — готовая продукция: от продуктов питания до автомобильной техники, как правило, перевозимая в контейнерах. В связи со вступлением России в ВТО прогнозируется дальнейший рост контейнерных перевозок на/из российских портов как в краткосрочной (до 2015 г.), так и долгосрочной (до 2030 г.) перспективе.

Именно поэтому с ростом торговых взаимоотношений становится так важно сделать процесс ценообразования в контейнерных перевозках, доля которых преобладает над другими вида-

ми транспорта, более прозрачным для потребителя-грузовладельца. Проанализированные автором современные источники не предоставляют такой возможности, что позволяет считать данное исследование актуальным. Актуальность изучения процесса формирования стоимости услуг в данном сегменте также подтверждается пристальным вниманием Федеральной антимонопольной службы РФ, которая осенью 2013 г. возбудила дело по признакам картельного сговора в отношении российских агентов компаний, занимающихся морскими торговыми перевозками.

Весной 2013 г. авторами статьи была проведена совместная работа с отделом по борьбе с картелями ФАС РФ по изучению деятельности океанских контейнерных перевозчиков в части формирования стоимости доставки контейнера. Данный факт подтверждает практическую значимость представляемого исследования. Ранее авторами были проанализированы особенности функционирования российских агентов контейнерных линий в российских портах, что отразилось в нескольких опубликованных статьях. В настоящий момент в результате проделанной работы авторами разработаны методические основы формирования стоимости морской перевозки груза в контейнере, приведенные ниже.

Процесс расчета стоимости перевозки груза на линии начинается с обращения, обычно экспедитором грузовладельца, в контейнерную компанию. Клиентам контейнерного перевозчика, как правило, официально предлагается базисная ставка линии — BAS, дополнительно указывается BAF-бункерная надбавка, которая необходима для учета изменения цен на топливо и CAF (Currency Adjustment Factor) — надбавка, учитывающая изменение курса валют. Иногда перевозчики предоставляют ставки фрахта с включением обеих надбавок. Помимо этого, линейное судходство в настоящее время насчитывает не один десяток различных надбавок к ставке фрахта, которые соответственно в тех или иных случаях применяются для формирования окончательной стоимости перевозки конкретного груза (см. табл. 2). Главными среди них являются надбавки за терминальную обработку в портах отправления/назначения. В период глубокого спада на рынке перевозок ставки линейных тарифов снижаются в несколько раз, затем по мере выхода из кризиса снова поднимаются.

В настоящее время фиксации тарифа в контейнерном судходстве практически не происходит. При этом публикуемые тарифы являются для любых клиентов только неким ориентиром. Общий уровень тарифов, как показывает современная практика, контролируют объединения перевозчиков — альянсы, соглашения и пр. Эти объединения, членами которых являются почти все контейнерные перевозчики, диктуют изменения поправок (надбавок) к тарифам. Антимонопольные органы в настоящее время пытаются оценить правомерность данной координационной деятельности в части возможных нарушений конкурентных принципов предоставления услуг по перевозке. Сама процедура работы с клиентом строится следующим образом. Чаще всего линия дает своим специалистам в отдел продаж на определенное время (обычно около месяца) уровень базовой ставки (bas), ниже которой не следует предлагать клиенту, и рекомендуемый уровень ставки (target). А далее все зависит от возможностей менеджера и конъюнктуры рынка. В коммерческой практике морских контейнерных перевозок приняты основные сокращения для линейных условий транспортировки груза, учитывающие специфику терминальных работ в портах, которые указаны в табл. 1.

Таблица 1

Основные аббревиатуры условий грузовых работ, принятые в международной практике морских контейнерных перевозок

Аббревиатура	Полное наименование	Пояснение
FIFO (FIOS)	free in/out	Погрузка и выгрузка не входят в стоимость фрахта
FILO	free in/liner out	Погрузка за счет отправителя, выгрузка включена во фрахт
LIFO	liner in/free out	Погрузка включена во фрахт/выгрузка за счет получателя

Таблица 1
(Окончание)

LILO	liner in /out	Погрузка и выгрузка включены в стоимость фрахта
FICY	free in/ container yard	Погрузка за счет отправителя/выгрузка только на причал
LI-Door	Liner in/Door	Погрузка включена во фрахт, по прибытии доставка до двери
FOR	free on rail	Погрузка на платформу включена в ставку
FOT	free on truck	Погрузка на машину включена в ставку
FOB	free on board	Погрузка на борт судна включена в ставку
FOW	free on wagon	Погрузка в вагон включена в ставку

При необходимости клиент может запросить доставить контейнер не только в порт, но и на контейнерный терминал (container yard), если тот находится не в самом порту, все зависит от возможностей линии и портовой инфраструктуры. Наиболее удобной, хотя и самой дорогой, по-прежнему является поставка товара «от двери до двери» клиента. Важно уточнить, что даже при такой форме доставки линия практически никогда не осуществляет затаривание/растаривание контейнера (stuffing/unstuffing). Поэтому при контейнерных перевозках необходимо определить, линия или отправитель/получатель груза осуществляют затаривание/растаривание контейнера. В зависимости от этого в договор включаются следующие условия:

- FCL/FCL (Full container load) — контейнеры затариваются и растариваются отправителем/получателем;
- LCL/LCL (Less then container load) — контейнеры затариваются/растариваются линией;
- LCL/FCL — контейнеры затариваются линией, растариваются клиентом;
- FCL/LCL — контейнеры затариваются клиентом, растариваются линией.

Автором в результате изучения в течение пяти лет работы некоторых агентов контейнерных линий в российских портах были собраны и разъяснены наиболее часто употребляемые надбавки к ставке фрахта за перевозку контейнера.

Таблица 2

**Наиболее популярные виды надбавок, применяемых различными линиями
к ставке фрахта (по материалам деятельности контейнерных линий
MAERSK, MSC, ARKAS, APL, NYK, CMA CGM, ZIM)**

№ п/п	Аббревиатура	Полное наименование	Пояснение
1	BAF	Bunker Adjustment Factor	Надбавка прибавляется к стоимости фрахта в зависимости от колебаний цен на рынке топлива, коэффициента изменения цен на нефть. Эта составляющая меняется несколько раз в год. Может взиматься в стоимостных единицах (в долларах или евро), а может в процентном соотношении от фрахта
2	HCS	High Cube Surcharge	Надбавка за повышенную вместимость контейнера, составляет 10 % от стоимости морского фрахта, действительна для всех грузов высотой более 2,25 м
3	CAF	Currency Adjustment Factor	Надбавка к стоимости фрахта, применяется для компенсации потерь от колебаний курса валют. Выражается в процентах от базовой ставки
4	CON	Congestion Surcharge	Дополнительный сбор, который взимается для компенсации дополнительных затрат, связанных с задержкой судов в перегруженных портах

Таблица 2
(Продолжение)

5	DDF/DOC	Documentation Fee — Destination	Сбор за оформление документов в порту назначения, взимаемый линейной компанией поконосаментно
6	DHC	Handling Charge — Destination	Терминальная обработка в порту назначения
7	ERS	Emergency Risk Surcharge	Дополнительный налог за чрезвычайный риск для судна оплачивается пропорционально по каждому контейнеру
8	EXP	Export Service Charge	Экспортная плата за обслуживание контейнера
9	MHH	Merchant Haulage	Плата за возможность вывоза контейнера с терминала контейнерной линии для целей осуществления затаривания/растаривания
10	ODF	Documentation Fee — Origin	Сбор за оформление документов в порту отправления, взимаемый линейной компанией, который включает составление коносамента получателя на его партию груза и составление сервисного коносамента. Взимается поконосаментно
11	OHC	Handling Charge — Origin	Терминальная обработка в порту отправления
12	OPA	Transport Arbitrary — Origin	Случайные транспортные расходы в порту отправления
13	PAE	Port Additional/ Port Dues — Export	Сбор за дополнительные экспортные пошлины в порту
14	PSE/ISPS	Port Security Charge — Export/ International Security Port Surcharge	Надбавка за безопасность, наложение пломбы. Появившаяся в 2004 г. надбавка, связанная с усиленными мероприятиями по осуществлению безопасного функционирования портов и их охраны
15	GRI	General Rate Increasing	Дополнительный сбор к базовой ставке фрахта, устанавливается в соответствии с тарифной политикой линейной компании, носит, как правило, сезонный характер
16	PSS	Peak Seasons Surcharge	Надбавка за высокий сезон, применяется к грузам, экспортируемым из стран Азии, обычно с августа по ноябрь (этот период считается пиковым для импортных отгрузок) в связи с большим спросом на этот сервис
17	ERR	Emergency Rate Restoration	Срочное повышение ставок (политика работы контейнерного перевозчика)
18	RR	Rate Restoration	Повышение ставок (политика работы контейнерного перевозчика)
19	GRR	General Rate Restoration	Дополнительный сбор к базовой ставке фрахта, устанавливается в соответствии с тарифной политикой линейной компании, носит, как правило, сезонный характер
20	SRR	Structural Revenue Recovery	Надбавка, используемая некоторыми контейнерными перевозчиками, именуется как «структурное восстановление доходов»
21	SER	Carrier Security Charge	Оплата организации безопасности перевозки

Таблица 2
(Окончание)

22	STT	Suez Transit Fee	Плата за прохождение Суэцкого канала
23	ULF	Agency/Logistics Fee	Оплата работы агентов и логистов
24	WFC	Wharfage	Портовая пошлина, применяемая к ставке фрахта в некоторых портах мира
25	WRS	War Risk surcharge	Военная надбавка — плата за риск при перевозке в районах повышенной военной активности. Распространяется на некоторые порты Африки и Израиля
26	HWS / OWS	Heavy or Over Weight Surcharge	Надбавка за превышение стандартного веса, применяющаяся к 20-футовым контейнерам. Стандартный вес может колебаться от 10 до 20 т в зависимости от морской линии
27	WSC	Winter Surcharge	Надбавка взимается в портах, где существует возможность обледенения акватории порта. Компенсирует работу ледоколов и проведение антиледовых мероприятий
28	BS	Bosphorus Surcharge	Надбавка за прохождение груза через пролив Босфор
29	IMOS	IMO Surcharge	Надбавка за опасный груз
30	UK Premium	UK Premium	Надбавка, взимаемая в английских портах

Вышеприведенный перечень надбавок к ставке фрахта, составленный автором, позволяет оценить их многообразие в контейнерном бизнесе, а также позволяет грузовладельцу понять смысл и назначение каждой из них. Что на практике часто бывает проблематично, так как в лучшем случае клиент видит только аббревиатуру и размер надбавки.

Стоимость перевозки груза на линии формируется обычно по следующему принципу:

- 1) Base rate (BAS) — базисная ставка фрахта линии;
- 2) BAF — бункерная надбавка;
- 3) CAF — коэффициент разности валют;
- 4) OHC — терминальные работы в порту погрузки Origin Handling Charge;
- 5) DHC — терминальные работы в порту назначения Destination Handling Charge;
- 6) другие надбавки.

По материалам работы контейнерных линий MAERSK, MSC, ARKAS, APL, NYK, CMA CGM, ZIM автором была обобщена практика функционирования контейнерных операторов и сформирована следующая методика расчета платы за перевозку грузов в контейнерах на линии.

При расчете ставки фрахта без терминальных работ (FIFO) к ставке фрахта прибавляют только надбавки BAF и CAF, терминальные работы в ставку не включаются, остальные надбавки в зависимости от требований каждой линии (наиболее часто используют дополнительно надбавки на непредвиденные расходы и безопасность перевозки):

$$f_{\text{FIFO}} = \text{BAS} + \text{CAF} + \text{BAF} + \text{ERS} + \text{SER}, \quad (1)$$

где f_{FIFO} — ставка фрахта для перевозки одного контейнера без терминальных работ, долл. США;

BAS — базовая ставка, долл. США;

CAF — надбавка к стоимости фрахта, применяется для компенсации потерь от колебаний курса валют, % (от базовой ставки);

BAF — надбавка прибавляется к стоимости фрахта в зависимости от колебаний цен на рынке топлива, коэффициент изменения цен на нефть, долл. США;

ERS — непредвиденные расходы и штрафы, долл. США;

SER — оплата организации безопасности перевозки, долл. США.

При включении в ставку терминальных работ дополнительно взимается плата за терминальную обработку, оформление документов и ввоз/вывоз контейнера с терминала для затаривания/растаривания. Следующая формула предназначена для ситуации с включением терминальной обработки в порту отправления:

$$f_{\text{LIFO}} = f_{\text{FIFO}} + \text{ОНС} + \text{DOC} + \text{МНН}_{\text{отпр}}, \quad (2)$$

где f_{LIFO} — ставка фрахта для перевозки одного контейнера с терминальными работами в порту отправления, долл. США;

DOC — сбор за оформление документов в порту отправления, взимаемый линейной компанией, долл. США;

ОНС — терминальная обработка в порту отправления, долл. США;

$\text{МНН}_{\text{отпр}}$ — плата за возможность вывоза контейнера с терминала контейнерной линии для целей осуществления затарки в порту отправления, долл. США.

Обратная ситуация с включением оплаты терминальной обработки в порту назначения:

$$f_{\text{FILO}} = f_{\text{FIFO}} + \text{ДНС} + \text{DOC} + \text{МНН}_{\text{назн}}, \quad (3)$$

где f_{FILO} — ставка фрахта для перевозки одного контейнера с терминальными работами в порту назначения, долл. США;

DOC — сбор за оформление документов в порту назначения, взимаемый линейной компанией, долл. США;

ДНС — терминальная обработка в порту назначения, долл. США;

$\text{МНН}_{\text{назн}}$ — плата за возможность вывоза контейнера с терминала контейнерной линии для осуществления растаривания в порту назначения, долл. США.

Последняя формула предназначена для использования при полном включении оплаты терминальных работ в порту отправления и назначения:

$$f_{\text{LIFO}} = f_{\text{LIFO}} + \text{ДНС} + \text{МНН}_{\text{назн}}, \quad (4)$$

где f_{LIFO} — ставка фрахта для перевозки одного контейнера терминальными работами в порту отправления и назначения, долл. США;

ДНС — терминальная обработка в порту назначения, долл. США;

$\text{МНН}_{\text{назн}}$ — плата за возможность вывоза контейнера с терминала, контейнерной линии для осуществления растаривания в порту назначения, долл. США.

Таблица 2 содержит гораздо большее количество надбавок к ставке фрахта, но не все были использованы автором в методике, так как оставшиеся являются дополнительными. Их применение связано с индивидуальной практикой работы каждой конкретной компании и зависит от особенностей контейнерной перевозки и конъюнктуры рынка. Наличие терминальных работ регулируется базисом поставки груза в соответствии с правилами “Incoterms 2010”. Возможно использование более ранних редакций с обязательным уточнением этого.

Расчет количества контейнеров производится на основе данных табл. 3 по формуле

$$N_{\text{конт}} = \frac{Q}{Q_{\text{конт}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{конт}}$ — количество контейнеров, шт.;

Q — общее количество груза, т;

$Q_{\text{конт}}$ — количество груза, помещаемое в один контейнер, т.

**Стандартное количество груза,
входящее в 20- и 40-футовые контейнеры, т**

Вид упаковки	20 DC	40 DC
Мешки (50 кг)	22–24	24–26
Паллеты	19–20	26–28
МКР (BIG BAG)	18–19	26–28
Навалом	23–25	26–28

В зависимости от плотности укладки терминалы могут организовать погрузку разного количества груза в один контейнер, поэтому стандарты содержат интервалы значений количества тонн груза.

Расчет суммы фрахта происходит на основе полученных значений ставки фрахта за один контейнер и количества контейнеров, необходимых для перевозки данного количества груза:

$$F = f_{\text{FIFO, LIFO, FILO, LILO}} \cdot N_{\text{конт}}, \quad (6)$$

где F — сумма фрахта, которую уплачивает грузоотправитель за перевозку всей партии груза, долл. США.

Стоимость затаривания/растаривания груза в/из контейнер(а) некоторые линии включают в ставку фрахта в виде надбавки, если оказывают такие услуги. Но в любом случае, даже если грузоотправитель будет ее организовывать самостоятельно, расходы ложатся на его плечи. Экспедитор (грузоотправитель) выбирает терминал для затаривания на основе принципа соотношения цены и качества выполняемой работы.

Стоимость затаривания одного контейнера рассчитывается следующим образом:

$$S_{\text{конт}} = s \cdot Q_{\text{конт}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{конт}}$ — стоимость затаривания одного контейнера, руб.;
 s — стоимость затаривания одной тонны, руб./т.

Затем для того, чтобы рассчитать стоимость затаривания всей партии груза, необходимо использовать посчитанное ранее количество контейнеров в партии — $N_{\text{конт}}$:

$$S_{\text{парт}} = S_{\text{конт}} \cdot N_{\text{конт}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{парт}}$ — стоимость затаривания всей партии груза, руб.

Таким образом, общие расходы грузоотправителя рассчитываются следующим образом:

$$R = F + S_{\text{парт}}, \quad (9)$$

где R — общие расходы грузоотправителя по поставке груза, с учетом условий по терминальной обработке и условий “Incoterms”, на которых заключен контракт, руб.

Сформированная методика является первой попыткой авторов обобщить накопленный опыт по изучению особенностей работы линейных морских контейнерных перевозчиков. Она в доступной форме позволяет грузовладельцам оценить расходы по доставке груза в контейнере.

Список литературы

1. Бабурина О. Н. Развитие морского транспорта России в условиях глобализации: роль государственной власти / О. Н. Бабурина // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 2 (45).
2. Грасс Е. Ю. К вопросу определения цены на контейнерные перевозки / Е. Ю. Грасс, Е. Ю. Евдокимова, Н. В. Митрофанова // Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России: материалы IX регион. науч.-техн. конф. — Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2011. — С. 70–71.
3. Иванова С. Е. Методические подходы к формированию линейных тарифов на морские перевозки грузов морем / С. Е. Иванова, Н. В. Митрофанова // Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России: материалы VIII регион. науч.-техн. конф. — Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2010. — С. 137–139.
4. Иванова С. Е. Современные принципы формирования цены перевозки грузов в линейном судоходстве / С. Е. Иванова, Н. В. Митрофанова // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: Изд-во СПГУВП, 2011. — Вып. 9 — С. 175–180.
5. Иванова С. Е. К вопросу о необходимости оценки российского рынка контейнерных перевозок на предмет ценового сговора / С. Е. Иванова, Н. В. Митрофанова // ЫЫЛЫМ ҚАЙНАРЫ: науч.-метод. журн. — Семей: РИО Университет Кайнар, 2013. — № 2. — С. 68–70.
6. <http://rosmorport.ru>media/File/State-Private...strategy...>
7. <http://www.morvesti.ru/news/index.php?news=17648>
8. <http://www.gruztech.net/article/324> (дата обращения: 01.07.2013).
9. http://astrabusiness.com/strategic_alliance/ (дата обращения: 11.04.2013).
10. <http://www.bimicon.ru/articles/vedushchie-konteynerynye-kompanii-uchredili-novy-yalyans.html> (дата обращения: 11.06.2013).

УДК 656.6

Е. А. Басов,
аспирант,

ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ СКЛАДИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ

CONTAINER YARD STACKING HEIGHT OPTIMIZATION

В статье обсуждается проблема оптимизации высоты складирования контейнеров как компромисс между операционными затратами и стоимостью площади.

The problem of the stacking height optimization as a trade-off between area and handling costs is discussed.

Ключевые слова: контейнерный терминал, площадка открытого хранения, высота штабеля.

Key words: container terminal, container yard, stacking height.



ПРОЦЕДУРА проектирования контейнерного терминала представляет собой процесс последовательного уточнения и детализации информации [1, с. 102, рис. 143, табл. 14]. Несколько упрощая, можно утверждать, что на первом этапе известен лишь период навигации (например, 365 дней) и желаемый годовой грузопоток. В принципе, уже из этого можно получить некоторые производные показатели:

Период навигации — Q ;

Годовой грузопоток — 365;

Суточная интенсивность операций — $q_{\text{сут}} = \frac{Q}{365}$.

Уточнение представлений о характеристиках акватории, подходных каналов и коммерческих условий работы позволяет составить представление о средневзвешенной судовой партии. В свою очередь это позволяет оценить среднее количество судов, обрабатываемых на терминале в год, а также средний интервал прибытия:

Средневзвешенная судовая партия — V ;

Число судозаходов на терминал — N ;

Средний интервал прибытия — $T_{\text{суд}} = \frac{365}{V}$.

Анализ работы портов-конкурентов, мирового опыта и практики ведения бизнеса в регионе позволяет оценить средние сроки хранения груза на терминале. Это в свою очередь позволяет сформулировать общие характеристики системы складирования: оборачиваемость склада, среднее число хранимых на складе полных судовых партий, среднее число одновременно формируемых на складе судовых партий и, наконец, средний объем склада [2, с. 9–14]:

Средний срок хранения — $T_{\text{хр}}$;

Среднее число хранимых судовых партий — $n = \frac{365}{T_{\text{хр}}}$;

Среднее число одновременно формируемых партий — $m = \frac{T_{\text{хр}}}{T_{\text{суд}}}$;

Средний объем склада — $E = mV = \frac{QT_{\text{хр}}}{365}$.

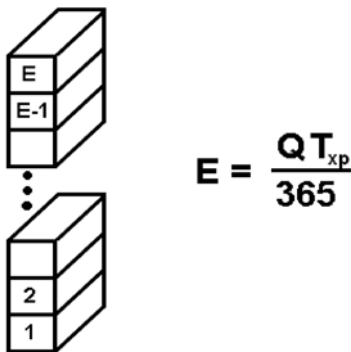


Рис. 1. Вместимость склада для заданного грузопотока Q

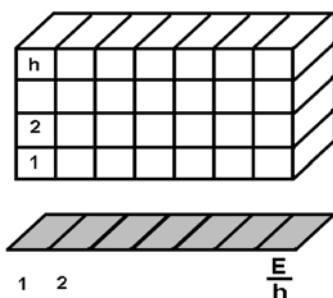


Рис. 2. Площадь основания в слотах для размещения склада объема E при высоте хранения h

Средний объем склада в виде условного вертикального «столбца» показывает рис. 1.

Та или иная технологическая схема контейнерного терминала предполагает размещение этого условного «столбца» контейнеров в некоторый штабель (близкий по форме к параллелепипеду). В зависимости от высоты складирования основание штабеля будет занимать различное количество наземных слотов:

Площадь склада в тгс — $S = \frac{E}{p} = \frac{Vm}{h}$.

Штабель, соответствующий требуемому среднему объему хранения E и высотой h , показан на рис. 2.

Штабель на рисунке условно представлен одной секцией, но это не ограничивает применимость рассуждений для случая штабеля с произвольным прямоугольным основанием.

Наземный слот контейнерного склада (tgs, или terminal ground slot), представляет собой площадь, занимаемую основанием одного TEU. Чистая площадь наземного слота составляет около 15 м². Валовая площадь s , занимаемая одним наземным слотом, различна для разных технологических систем [1].

Площадь штабеля в квадратных метрах определяется умножением валовой площади слота s на площадь основания, измеренной в слотах (рис. 3).

Площадь склада в м² — $S_{\text{м}^2} = \frac{sVm}{h}$.

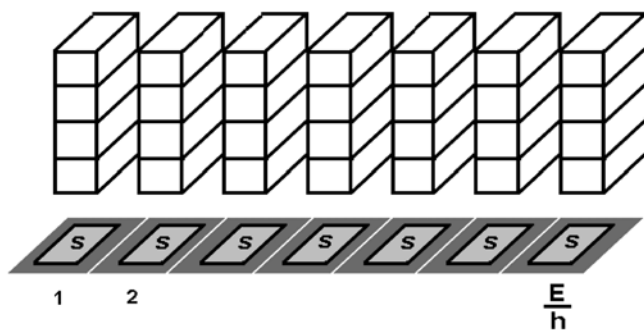


Рис. 3. Площадь штабеля в m^2 при высоте хранения h

Зная годовую стоимость аренды квадратного метра земли a , можно вычислить годовую стоимость аренды площади склада для той или иной схемы:

Годовые затраты на площадь — $C_s = \frac{asVm}{h}$.

Это позволяет рассчитать стоимость, связанную со складированием одного TEU:

$$c_s = \frac{C_s}{Q} = \frac{asVm}{Qh} = \frac{asVm}{NVh} = \frac{asm}{Nh} = \frac{asT_{суд}T_{хр}}{h365T_{суд}} = \frac{asT_{хр}}{365h}.$$

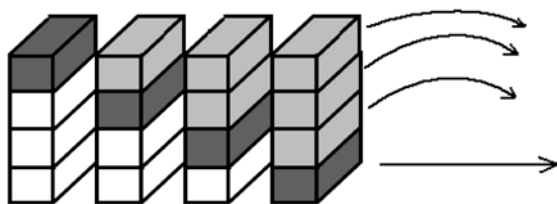


Рис. 4. Движения для выборки контейнера из штабеля

При хранении на одном слоте «столбца» из h контейнеров его обработка в среднем требует $\frac{(h+1)}{2}$ движений (рис. 4).

Действительно, верхний контейнер выбирается за одно движение, контейнер во втором слое сверху — за два движения, контейнер в нижнем слое — за h движений, то есть всего $1 + 2 + \dots + h = \frac{(h+1)h}{2}$ движений для обработки столбца высотой h , или $\frac{(h+1)}{2}$ движений на каждый из отдельных контейнеров «столбца».

При известной стоимости одного подъема b можно рассчитать затраты, связанные с выборкой одного контейнера из штабеля высотой h контейнеров.

Затраты на выборку — $c_h = b \frac{h+1}{2}$.

Отсюда рассчитывается полная стоимость обработки одного контейнера.

Полные затраты на TEU — $c_h = c_s + c_h = \frac{asT_{хр}}{365h} + b \frac{h+1}{2}$.

Для определения оптимальной высоты складирования, дающей минимум совокупных затрат, необходимо приравнять к нулю первую производную:

минимум затрат — $\frac{d}{dh}c = -\frac{asT_{хр}}{365h^2} + \frac{b}{2} = 0$.

Решение этого уравнения дает значение высоты:

оптимальная высота — $h = \sqrt{\frac{2asT_{хр}}{365b}}$.

Отношение $\frac{365}{T_{хр}}$ есть коэффициент оборачиваемости склада $k_{об}$, откуда получаем искомое значение оптимальной высоты складирования.

Оптимальная высота складирования — $h = \sqrt{\frac{2as}{k_{об}b}}$.

Полученные соотношения позволяют провести расчеты нескольких важных параметров, которые могут использоваться для выбора технологических схем и высоты складирования для каждой из них.

Для расчетов выбраны значения стоимости подъемов в условных единицах, осредненные по данным отечественных и зарубежных источников (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения стоимости одного подъема

Система складирования	FLT	RS	SC	RTG/RMG
Стоимость подъема, b	12	13	7	6

На рис. 5 представлены зависимости приведенной стоимости обработки контейнеров (связанной с использованием площади и трудоемкостью выборки из штабеля) для различных схем складирования контейнеров.

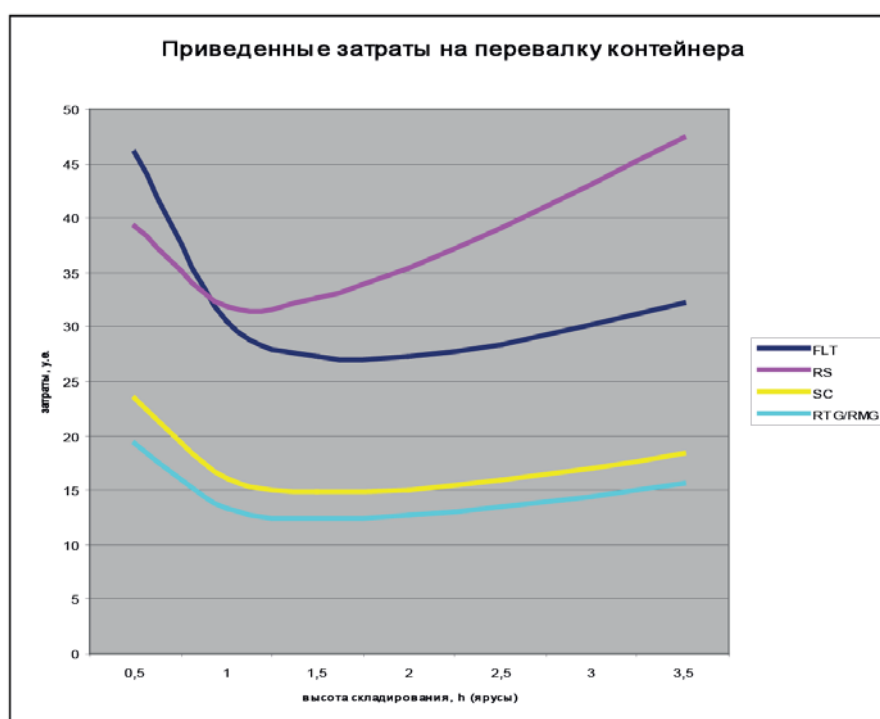


Рис. 5. Приведенные затраты обработки контейнера для различных технологических схем

Итак, стремление добиться высоты складирования, близкой к максимальной технической для выбранного оборудования, является экономически неоправданным. Как показывают проведенные рассуждения, эта высота должна определяться из экономических соображений и требований качества обслуживания клиента, а не геометрией купленной складской машины.

Выводы

1. Установлена связь между важнейшими коммерческими и технологическими параметрами деятельности контейнерного терминала — стоимостью аренды земли, себестоимостью подъема, сроком хранения, схемой складирования — и высотой складирования, оптимизирующей совокупные затраты на перевалку контейнера.

2. Теоретически рассчитаны валовые площади слотов для различных схем складирования, лежащие в основе методики определения плотности складирования для различных технологических систем.

3. Установлена зависимость числа перемещений для выборки контейнера от высоты складирования для различных схем складирования, позволяющая дать оценку увеличения времени выборки и себестоимости этой операции.

4. Проведенные с использованием практических данных расчеты показывают, что оптимальная высота складирования контейнеров с произвольной выборкой составляет 2–3 яруса, независимо от использованного оборудования.

5. Рост количества движений для выборки контейнера является одним из главных негативных факторов, сопровождающих увеличение высоты складирования, поскольку связан либо с ухудшением качества услуг, либо с затратами на приобретение дополнительного оборудования.

6. Предложенные методики дают владельцу или оператору терминала инструментарий для принятия обоснованных коммерческих решений.

Список литературы

1. Кузнецов А. Л. Оборудование контейнерных терминалов: учеб.-практ. пособие, рекомендованное КС по транспортному образованию и науке Минтранса РФ / А. Л. Кузнецов, А. Л. Степанов. — СПб., 2001.

2. Кузнецов А. Л. Сравнение различных методик оценки требуемой вместимости склада при технологическом проектировании контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. науч. ст. — 2008. — № 4 (54).

РАЗРАБОТКА МОРСКИХ И ШЕЛЬФОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

УДК 528.472

Ю. Г. Фирсов,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА СОВРЕМЕННОЙ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ (ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ) СЪЕМКИ

THE MAIN REQUIREMENTS FOR THE BATHYMETRIC (TOPOGRAPHIC) SURVEYING QUALITY CONTROL

Анализируются требования обеспечения качества батиметрической (морской топографической) съемки на всех этапах ее выполнения. Отмечается, что в современных нормативных документах в области гидрографии отсутствуют требования по обеспечению качества работ. Предлагается ввести в обиход такие понятия, как «критерии качества», «контроль качества», «процедуры обеспечения качества».

The issues for quality control of the bathymetric surveying are discussed. Observation of the new rules for hydrographic surveying show that the quality control and quality assurance issues are not included. Suggestions to include such terms as “quality control”, “quality assurance”, “quality criteria” are put forward.

Ключевые слова: качество батиметрической съемки, многолучевой эхолот, контроль качества, процедуры обеспечения качества.

Key words: bathymetric survey quality, multibeam echosounder, quality control, quality criteria.

СОВРЕМЕННАЯ электронная гидрография обладает арсеналом средств и методов, способных получать цифровые модели подводного рельефа с точностью, соизмеримой с цифровыми моделями суши. Отличие заключается в том, что цифровые модели суши доступны прямому контролю и проверке их качества, а дно водоемов скрыто от непосредственного визуального наблюдения, и поэтому контроль качества цифровой модели может быть осуществлен только косвенными методами. При этом обеспечение качества батиметрической съемки на всех этапах выполнения работ приобретает особое значение.

В отечественной гидрографической науке и практике вопросам качества, к сожалению, не уделяется должного внимания. В отечественных нормативно-технических документах (НТД) [1; 2] вопросы качества выполнения работ и представления их результатов не рассматриваются. В проектах новых НТД, например [3, с. 46–50], вопросы качества съемок также не отражены.

Рассмотрим вопросы качества применительно к выполнению прецизионной съемки рельефа дна, именуемой батиметрическими или топографическими работами на акватории. Отметим, что использование термина «топографическая съемка» применимо, как правило, в случае, когда в качестве нуля глубин используется национальная система отсчета высот (например, Балтийская) и результаты съемки подводного и надводного рельефа совмещаются. Батиметрическая съемка может выполняться в большом диапазоне глубин, имеет целью получение детальной модели микро-рельефа, который, как правило, необходим для инженерных целей, включая обеспечение создания инфраструктуры морских месторождений углеводородов на дне.

Рассмотрим общую методику выполнения детальной батиметрической (топографической) съемки с использованием средств площадной на основе применения многолучевого эхолота (МЛЭ) для получения цифровой модели рельефа дна на глубинах менее 200 м. Методика выполнения глубоководной батиметрической съемки с МЛЭ приведена в работе [4, с. 60–66].

Методика площадной съемки многолучевым эхолотом должна включать следующие этапы: подготовка к съемке; выполнение съемки; пост-обработка результатов съемки; представление результатов съемки; а также интерпретация и оценка результатов съемки.

На каждом из указанных этапов должен осуществляться контроль качества.

Для проведения площадной съемки рельефа в инженерных целях предпочтение следует отдавать методам GNSS-определения планово-высотного положения опорных точек и отметок глубин на акватории с применением технологии кинематики реального времени (Real Time Kinematic = RTK). Применение данной технологии позволяет существенно повысить качество площадной съемки. Под термином «качество» в дальнейшем предполагается совокупность трех взаимосвязанных характеристик: точности, правильности и надежности. При этом: точность — мера оценки случайных погрешностей; правильность — мера компенсации систематических ошибок; а надежность — мера исключения грубых ошибок (выбросов) глубин и их координат на дне.

При выполнении работ на особо сложных объектах, а также на объектах, где работы проводятся впервые, заказчик может потребовать привлечения независимого эксперта — своего представителя (супервайзера) для обеспечения выполнения функций *гарантии качества* [5, с. 348].

Методика подготовки к съемке должна включать следующие мероприятия:

- 1) подготовку персонала — сотрудников организации для выполнения съемки;
- 2) подготовку проекта выполнения съемки, включая разработку плана контроля качества;
- 3) подготовку исходных данных и оборудования для выполнения съемки;
- 4) метрологическую аттестацию и калибровку аппаратуры.

План контроля качества является необходимым документом, в котором описываются все действия исполнителя съемки, направленные на обеспечение контроля качества на всех этапах выполнения работ.

Организация, претендующая на получение контракта на проведение площадной съемки подводного рельефа, в том числе в инженерных целях, должна обеспечивать выполнение набора мероприятий по контролю качества:

- постоянную переподготовку и аттестацию сотрудников;
- метрологическую аттестацию и полевую калибровку оборудования;
- подготовку и поддержание в рабочем состоянии тестовых полигонов для калибровки оборудования на акватории проведения съемочных работ;
- создание и поддержание базы данных и знаний по используемому оборудованию, программному обеспечению и нормативной документации.

Организация должна иметь собственный типовой стандарт, регламентирующий выполнение площадной съемки с использованием многолучевого эхолота для формирования цифровой модели дна с заданным уровнем качества.

Методика выполнения съемки.

Методика выполнения съемки включает следующие этапы:

- подготовка к съемке на акватории.
- выполнение съемки с полевым контролем качества.

В процессе подготовки к съемке на акватории необходимо осуществить следующие мероприятия.

1. Определить геодезические координаты опорных точек в районе съемки:

- а) в системе координат ITRF (International Terrestrial Reference Frame) на текущую эпоху (точность определения координат береговых опорных точек должна быть не хуже 0,05 м (95 %); необходимо иметь не менее двух опорных точек в системе координат съемки, а также дополнительную опорную точку в районе стоянки плавсредства);

- б) в местной системе координат объекта (с аналогичной точностью).

2. Установить на акватории уровенные посты. Выполнить определения высотного положения нулей уровенных реек и самописцев уровня. Определить отсчеты по рейке, соответствующие положению нуля глубин. Количество уровенных постов на акватории съемки должно быть

не менее двух. При наличии самописцев уровня следует выполнить многократное сличение отчетов по рейке и самописцу уровня.

3. Смонтировать аппаратуру на судне-носителе и определить смещения антенн МЛЭ, средства позиционирования и статическое заглубление антенны МЛЭ. Точность определения смещений должна быть не хуже 0,05 м (95 %). Точность определения статического заглубления антенны должна быть не хуже 0,03 м (95 %).

4. Настроить проект съемки в гидрографической информационной системе.

При настройке проекта съемки следует выполнить:

— установку программы «геодезия»; должен обеспечиваться автоматический пересчет геодезических координат, определяемых системой позиционирования, в проекционные координаты съемки с контролем;

— загрузку картографической подложки с изображением акватории и береговой полосы с отображением необходимой нагрузки;

— настройку сопряжения со всеми внешними датчиками и проверку правильности настройки «геодезии» с использованием координат дополнительной опорной точки в районе стоянки плавсредства;

— при топографической съемке использовать режим определения высотных отметок рельефа (взамен глубин);

— расчет априорной модели погрешностей глубин и их плановых координат комплекса МЛЭ;

— настройку системы тревоги и предупреждений программы гидрографической информационной системе.

При завершении настройки проекта съемки необходимо провести швартовые испытания комплекса МЛЭ, заключающиеся в проверке работоспособности и качества работы: системы позиционирования; датчика перемещений судна (ДПС); измерителя скорости звука в воде на антенне МЛЭ; самого МЛЭ, а также в проверке стабильности электропитания всех элементов комплекса.

Швартовые испытания системы позиционирования должны включать проверку правильности и стабильности поступления данных в компьютер МЛЭ. Подтверждение качества работы системы позиционирования осуществляется с использованием специального программного обеспечения. Должен быть предусмотрен расчет точности по внутренней сходимости и расчет точности относительно координат дополнительной опорной точки в районе стоянки плавсредства; отклонение координат антенны системы позиционирования и опорной точки не должно превышать ± 1 м (95 %).

Швартовые испытания датчика перемещений судна и датчика скорости звука на антенне МЛЭ заключаются в проверке правильности и стабильности поступления данных в компьютер МЛЭ.

Швартовые испытания МЛЭ заключаются в проверке правильности и стабильности поступления данных от сопряженных датчиков в компьютер МЛЭ и получении стабильных значений поперечного профиля глубин.

Полевая калибровка комплекса МЛЭ должна выполняться по возможности на специально подготовленном полигоне, созданном на акватории, и заключается в выполнении следующих операций:

- 1) определение поправок динамического заглубления антенн МЛЭ (для глубин менее 40–50 м);
- 2) подготовка цифровой модели рельефа полигона;
- 3) выполнение измерений профиля скорости звука на полигоне и колебаний уровня;
- 4) выполнение калибровки МЛЭ в соответствии с программой, используемой в гидрографической информационной системе.

Выполнение эксплуатационного теста комплекса МЛЭ на подготовленном полигоне с одновременным определением ширины «гидрографической» полосы обзора МЛЭ [5]. Эксплуатационный тест должен подтвердить возможность выполнения площадной съемки рельефа с требуемой точностью. Калибровка МЛЭ должна быть выполнена перед началом и после окончания съемки.

Полевая калибровка имеет целью подтвердить заявленный уровень качества работы комплекса МЛЭ и его готовность для проведения съемки на акватории.

Выполнение съемки с контролем качества.

Выполнение съемки подводного рельефа с использованием МЛЭ заключается в обеспечении решения трех взаимосвязанных задач:

- вождение плавсредства по системе проектных галсов и выполнение заданного уровня перекрытия смежных полос многолучевой съемки;
- реализация непрерывной регистрации данных многолучевого промера в файл съемки, включая информацию о метаданных;
- полевой контроль комплекса МЛЭ, который в соответствии с рекомендациями Международной гидрографической организации (МГО) именуют «контролем целостности» [8, р. 28], включая оперативное сравнение данных от различных источников;
- выполнение контрольных галсов многолучевой съемки.

Контроль целостности комплекса МЛЭ при выполнении съемки является актуальной и сложной задачей и заключается в опережающем выявлении нештатных ситуаций в аппаратуре и их устранение путем своевременного вмешательства оператора. Для решения этой задачи должна максимально эффективно использоваться система тревоги гидрографической информационной системы. Контроль целостности является одним из средств контроля качества съемки в реальном масштабе времени. Контроль качества многолучевой съемки выполняется также путем непрерывного мониторинга МЛЭ и внешних датчиков путем графической визуализации правильности их работы.

Применительно к МЛЭ контроль должен осуществляться визуально путем оперативного анализа графической информации в окнах: «Поперечный профиль глубин», «Цифровая модель дна в полосе обзора 3D/2D», «Цифровая модель дна 3D». Большинство современных электронных гидрографических информационных систем (ЭГИС) имеют инструменты, обеспечивающие полевой контроль качества площадной батиметрической съемки, включая оперативную визуализацию цифровой модели рельефа дна, правильность работы МЛЭ и сопряженных датчиков, а также опций выдачи предупредительной сигнализации. Конкретная методика контроля качества работы МЛЭ зависит от доступных опций ЭГИС.

Визуальный анализ информации в графических окнах должен подтвердить:

- правильность детектирования дна по максимально возможному количеству лучей МЛЭ;
- контроль правильности введенного вертикального разреза скорости звука, возможный на участках с плоским дном на основе анализа формы поперечного профиля глубин (метод «улыбка»);
- отсутствие недопустимых пропусков в акустическом покрытии дна;
- достижение максимальной ширины полосы обзора при данных гидроакустических условиях.

Контроль качества работы внешних датчиков включает:

- анализ допустимой погрешности места определения по данным автономной оценки точности (GPS/ГЛОНАСС аппаратуры), а также сопоставление данных различных источников информации;
- допустимость рассогласования показаний датчика скорости звука, который находится на антенне МЛЭ, и данных из файла вертикального разреза скорости звука на горизонте антенны;
- контроль качества данных, выдаваемых ДПС, с использованием собственного программного обеспечения, а также проверка качества данных ДПС в самой ЭГИС.

ЭГИС, используемая для площадной съемки, должна иметь опции автоматизированного создания файла метаданных, который должен входить в набор файлов результатов многолучевой съемки.

В качестве примера полевого контроля качества многолучевой съемки приведем ЭГИС QINSy [6]. При выполнении высокоточной площадной батиметрической съемки для гарантии качества выработки позиции в составе комплекса МЛЭ, как правило, используются два спутниковых приемника. В этом случае для контроля качества позиционирования может быть использована опция оперативного сравнения позиций, приведенных к единой точке на корпусе носителя, например к центру судовой системы координат.

На рис. 1 показано окно Scatter Plot (Планшет рассеивания), показывающее параметры средних квадратических эллипсов каждой позиции, а также параметры соединяющего их вектора в виде проекций по широте (delta Northing), долготы (delta Easting) и высоте (delta Height).

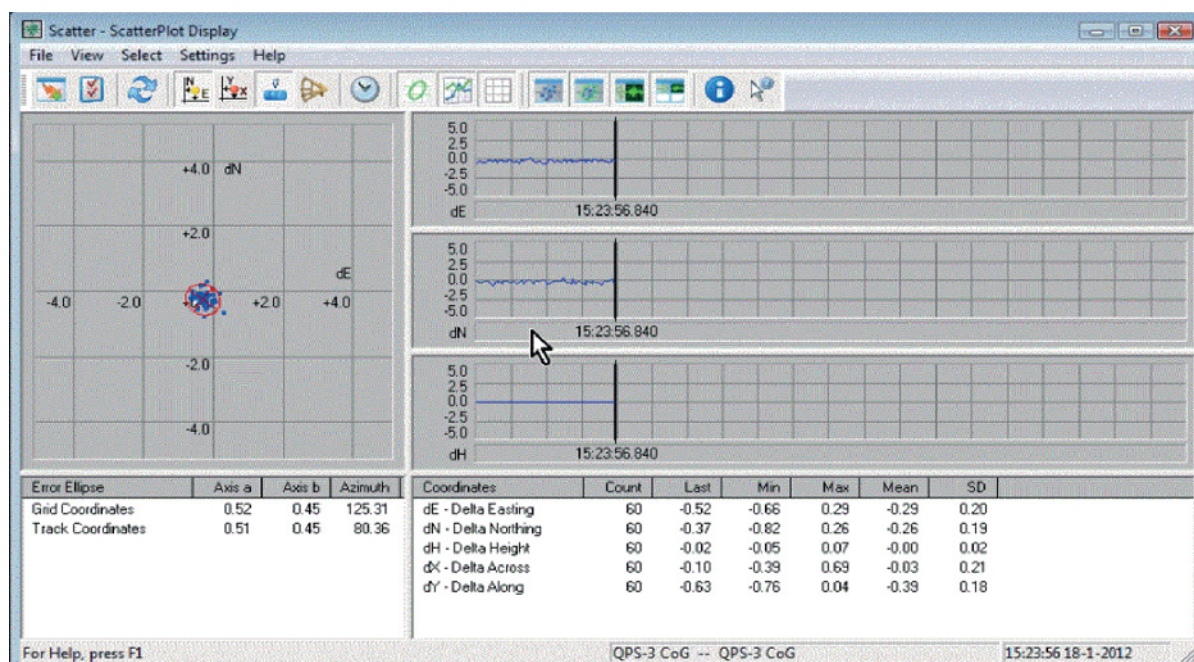


Рис. 1. Окно программного модуля Scatter Plot

Наиболее ответственным датчиком, обеспечивающим работу МЛЭ, является ДПС, к контролю качества которого предъявляются повышенные требования. Одним из методов, реализованных в ЭГИС QINSy, является визуальный контроль работы ДПС, осуществляемый с использованием окна TimePlot. В окна типа TimePlot может быть выведена самая различная информация. Наиболее актуальным является представление во времени данных крена (Roll), дифферента (Pitch), вертикального перемещения (Heave), поступающих от ДПС. На рис. 2 представлено окно TimePlot, позволяющее визуализировать указанные параметры. В случае использования для позиционирования режима RTK целесообразно также совместно контролировать величину вертикального перемещения от ДПС и геодезическую высоту антенны МЛЭ в другом окне TimePlot.

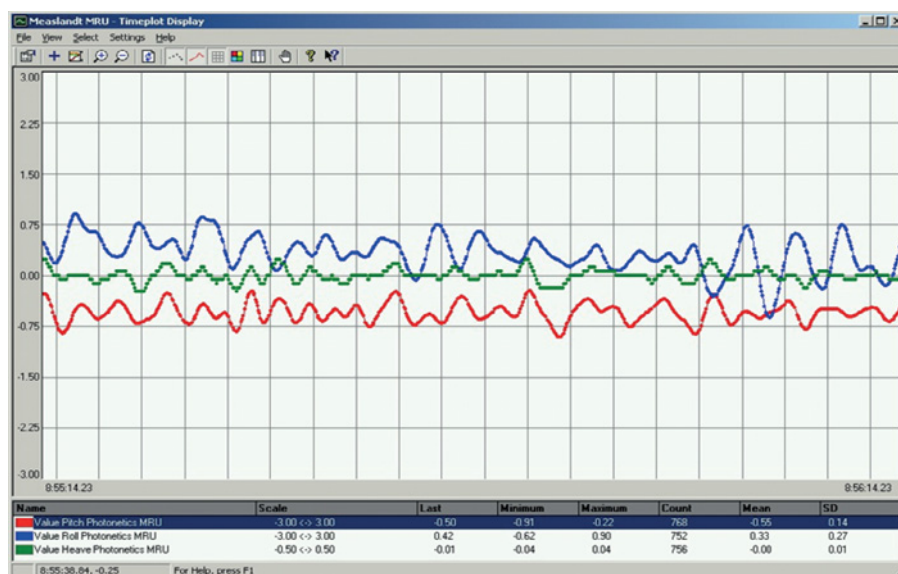


Рис. 2. Окно программного модуля TimePlot

На рис. 3 представлен экран монитора ЭГИС QINSy, осуществляющей управление работой батиметрического комплекса на базе МЛЭ EM-2040C (Dual) фирмы “Kongsberg”. На этом рисунке:

- окно 1 (Swath System) — показывает исправленный по данным ДПС поперечный профиль глубин по единичной посылке МЛЭ. Данные антенны левого борта отображаются желтым, а правого — красным цветом;
- окно 2 (Alert) — отображает выбранный набор параметров тревожных предупреждений; тревога индицируется красным цветом, а ее отсутствие — зеленым;
- окно 3 (Raw MB) — индицирует неисправленный поперечный профиль глубин отдельно по левой и правой антеннам МЛЭ (настроено для варианта отображения информации в водной толще);
- окно 4 (Navigation) — карта в варианте 2D, отображающая регулярную сетку глубин (грид) реального времени (батиметрическая модель).

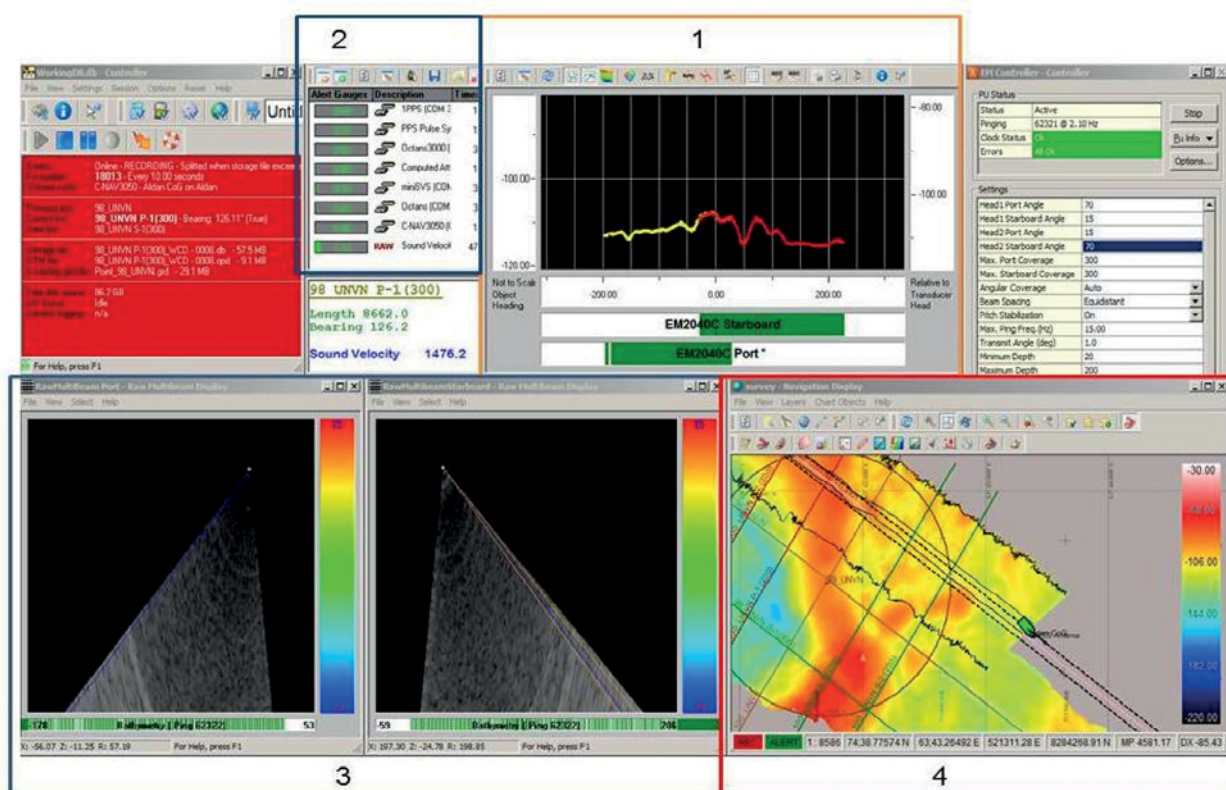


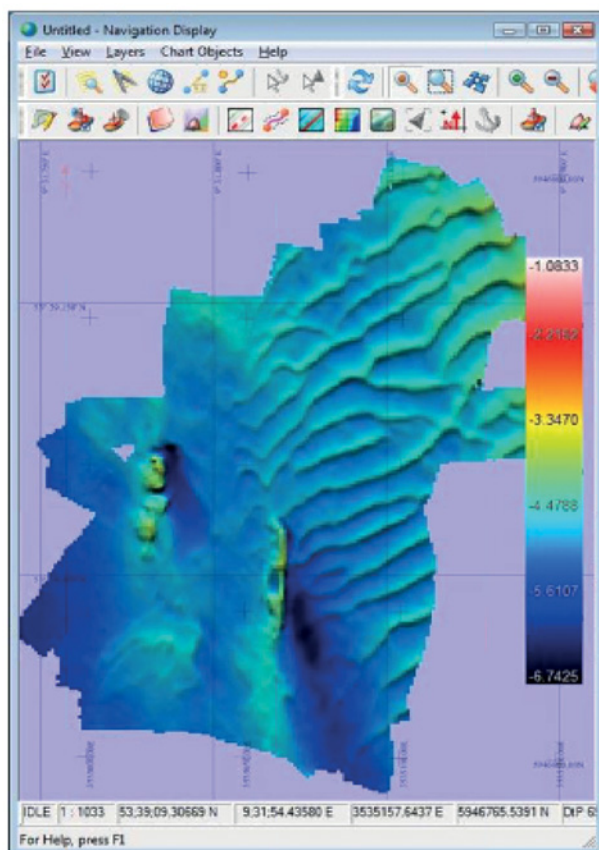
Рис. 3. Экран ЭГИС QINSy батиметрического комплекса на базе МЛЭ EM-2040C (Dual)

Отметим, что в окне 4, показанном на рис. 3, вместе с батиметрической моделью (поверхность дна) могут отображаться дополнительные статистические характеристики регулярной сетки глубин в виде:

- поверхности погрешностей глубин в ячейке грида;
- поверхности, показывающей количество отметок глубин в ячейке.

Каждая из «поверхностей» может отображаться в отдельном окне (Navigation). На рис. 4 представлены регулярные сетки результатов площадной съемки в виде поверхностей: цифровой модели рельефа (а) и погрешностей глубин с доверительной вероятностью 95 % (б) в соответствии с требованиями S-44 [8].

а



б

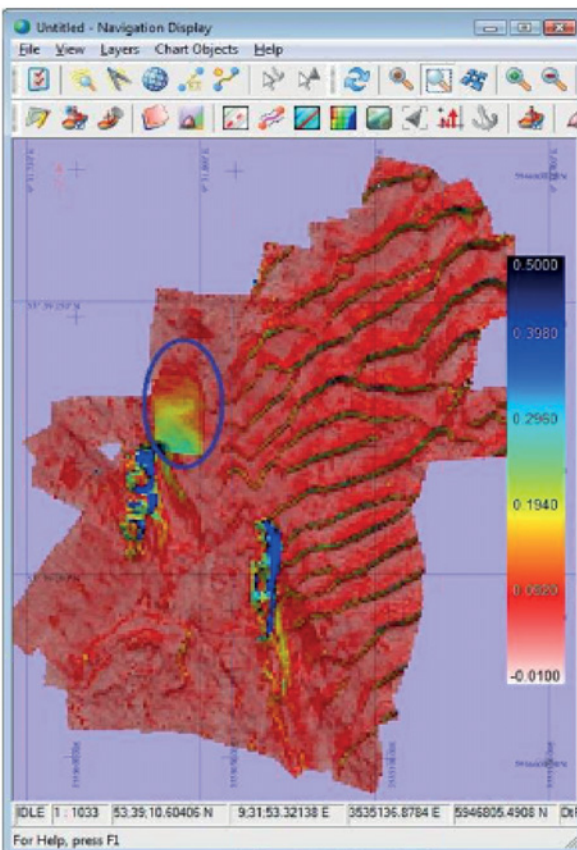


Рис. 4. Представление площадной съемки в реальном времени в виде: цифровая модель рельефа (а); поверхность погрешностей глубин (95 %) (б)

Визуализация статистических характеристик регулярной модели рельефа дна является полезным инструментом оперативного контроля качества работы комплекса МЛЭ. В дальнейшем эти данные могут использоваться при контроле качества на этапе пост-обработки данных площадной съемки.

В дальнейшем, на этапе пост-обработки данных площадной съемки, модель рельефа и дополнительные статистические характеристики регулярной сетки уточняются.

Методика пост-обработки площадной съемки.

Методика пост-обработки результатов площадной съемки включает следующие этапы.

1. Проверка информации, записанной в файлах первичных данных, и устранение грубых погрешностей (фильтрация):

- измерений сопряженных датчиков;
- батиметрических измерений (расчета глубин, их координат).

2. Исправление измеренных глубин необходимыми поправками: за уровень; за скорость звука в воде; за динамическое заглубление антенн МЛЭ.

3. Окончательная фильтрация каждой глубины, рассчитанной МЛЭ.

4. Формирование регулярной сетки глубин (грида) с обоснованной размерностью; технология формирования грида должна предусматривать наличие в узловой точке грида оценки точности глубины в качестве одного из атрибутов; целесообразной методикой формирования статистически обоснованного грида является технология CUBE (Combined Uncertainty and Bathymetry Estimation), которая основана на преобразовании априорных оценок отметок глубин и их планового положения в апостериорную оценку глубины и ее планового положения в ячейке грида; технология CUBE в русскоязычной литературе рассмотрена, например, в работе [5].

5. Расчет оценки качества съемки путем сравнения глубин по пересечениям основной и контрольной полос обзора МЛЭ.

6. Экспорт результатов съемки в ГИС-форматы, например: xyz, asc, .dwg, dxf, .gsf, bag.

7. Экспорт результатов оценки качества съемки в формат xyz (где Z — погрешность глубины в ячейке грида с доверительной вероятностью 95 %).

8. Создание файла промерного планшета (например, в формате .pdf или .dwg) для обеспечения последующей распечатки на плоттере/принтере.

Оценка качества площадной съемки основывается на двух различных подходах:

— расчет точности путем сравнения глубин грида основной полосы и отметок глубин контрольной полосы обзора МЛЭ;

— анализ величин апостериорных оценок глубины и ее планового положения в ячейках грида батиметрической модели.

Детальное обсуждение оценки качества на этапе пост-обработки выходит за рамки данной статьи.

Методика представления результатов площадной съемки.

Методика представления результатов площадной съемки зависит главным образом от ее целей, а также от используемого специализированного программного обеспечения. Форма представления результатов диктуется задачами съемки. Гидрографические работы, имеющие целью создание навигационных морских карт, представляют, как правило, в виде отчетных планшетов и/или файлов обменного формата S-57. Результаты инженерных батиметрических (топографических) работ обычно представляют в форматах Auto CAD (dwg, dxf). В то время как результаты батиметрических съемок, связанных с ресурсными исследованиями, часто экспортируют в форматы ГИС ArcGIS (ESRI) — asc, и bag.

Результаты оценки качества съемки могут быть представлены в виде растров с изолиниями погрешностей глубин в ячейках грида.

В настоящее время появилось инновационное программное обеспечение, позволяющее интегрировать цифровые модели рельефа, представленные в различных форматах, а также визуализировать результаты съемки в среде трехмерной графики, используя различные методы визуализации. При этом представляются возможности динамического интерактивного просмотра цифровой модели рельефа в формате 3/4D и создания трехмерных анимаций. Один из пакетов программ, позволяющих обеспечить визуализацию результатов площадной съемки рельефа в 3D изображении, рассмотрен в работе [7].

На основе рассмотренной методики контроля качества батиметрической съемки целесообразно разрабатывать «технологические карты» для выполнения настройки комплекса аппаратуры, а также его оптимальной и качественной эксплуатации применительно к типовым условиям съемки. Это позволит гидрографам-практикам единообразно применять программно-технические средства современной электронной гидрографии, а также правильно осуществлять контроль качества батиметрической съемки.

Список литературы

1. СП 11-114–2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтепромысловых сооружений. — М.: Изд-во ПНИИИС Госстроя России, 2004. — 88 с.
2. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. РД 31.74.04-2002. — Ростов н/Д: ОАО РЦПКБ «Стапель», 2004. — 134 с.

3. Фирсов Ю. Г. Анализ нормативных документов отечественной инженерной гидрографии / Ю. Г. Фирсов, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2012. — № 4.
4. Фирсов Ю. Г. Анализ методики использования глубоководного многолучевого эхолота ЕМ 122 при выполнении батиметрической съемки в Северном Ледовитом океане / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. ст. Гос. морской академии. — СПб.: ГМА, 2010. — № 4 (61).
5. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов; ГМА имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Нестор-ИСТОРИЯ, 2010.
6. www.qps.nl: интернет-сайт фирмы “QPS”.
7. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — Вып. 2.
8. IHO Standards for Hydrographic Surveys / International Hydrographic Organization. — 5th ed. — 2008. — Special Publication № 44.

УДК 910

Г. В. Лебедев,
науч. сотрудник, магистр географии,
ЦНИИ морского флота;

Г. Е. Румянцев,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКОЙ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

THE PROSPECTS OF ARCTIC MARINE TRANSPORTATION SYSTEM'S DEVELOPMENT

В статье отмечается значение Арктической зоны Российской Федерации как стратегического региона, богатого полезными ископаемыми, рассматриваются арктическая морская транспортная система и Северный морской путь, связывающий западные и восточные регионы России. Авторы уделяют внимание перспективным проектам ресурсодобывающих компаний в российской Арктике, научным исследованиям и экспедициям.

The article entitled “The prospects of arctic marine transportation system's development” shows importance of the Arctic zone of the Russian Federation as a strategic region, which is rich in minerals, views arctic marine transportation system and the Northern Sea Route, which connects the western and eastern regions of Russia. The authors pay attention to perspective projects of resource companies in the Russian Arctic, researches and expeditions.

Ключевые слова: арктическая морская транспортная система, Северный морской путь, Арктическая зона, транспортно-логистические узлы.

Key words: arctic marine transportation system, the Northern sea route, Arctic zone, transport-logistical centers.



АРКТИКА — важнейший стратегический регион, являющийся зоной интересов не только приарктических государств (России, США, Канады, Дании, Норвегии), но и Европейского Союза и других стран с развитой экономикой, таких как Китай, Южная Корея и Япония [1; 6; 7].

Две трети совокупных запасов полезных ископаемых Арктики добывается в России. Перспективные и прогнозные ресурсы природного газа в России оцениваются в 176 трлн м³ (более половины мировых), в том числе на арктический шельф приходится 62 трлн м³. Разведанные запасы свободного газа в России составляют 47,2 трлн м³, из них 7,7 трлн м³ на арктическом шельфе. Перспективные и прогнозные ресурсы нефти страны составляют 16 % от мировых. Более 4/5 всех прогнозных ресурсов нефти приходится на Сибирь.

Для эффективного хозяйствования в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) необходимо развитие арктической морской транспортной системы (АМТС). Эта система может обеспечить надежные транспортные связи, эффективное освоение месторождений полезных ископаемых, экспорт нефти и газа и вследствие этого — существенное улучшение условий жизнедеятельности в северных субъектах РФ.

Однако следует учитывать, что международный правовой статус Северного Ледовитого океана как основного элемента Арктики находится в стадии становления и базируется главным образом на актах прибрежных государств [7].

Стержнем арктической морской транспортной системы (АМТС) служит Северный морской путь (СМП) (рис. 1).

Российская Концепция развития судоходства по СМП представляет собой систему взглядов, принципов и приоритетов в области обеспечения надежного функционирования национальной арктической морской транспортной системы в условиях расширения использования ресурсного потенциала Арктики.

Долгосрочные задачи развития морской деятельности в Арктическом регионе на период до 2020 г. определяются Морской доктриной Российской Федерации и состоят в том числе в следующем [1; 2]:

- исследование и освоение Арктики с ориентацией на развитие экспортных отраслей хозяйства;
- обеспечение национальных интересов Российской Федерации в отношении СМП, централизованное государственное управление этой транспортной системой, ледокольное обслуживание и предоставление равного доступа заинтересованным перевозчикам, в том числе иностранным;
- сохранение мирового лидерства в строительстве и эксплуатации атомных ледоколов;
- обновление и безопасная эксплуатация атомного ледокольного флота;
- государственное финансирование затрат на содержание, строительство и эксплуатацию ледоколов и транспортных судов ледового класса, в первую очередь с атомными энергетическими установками, создание специализированной системы базирования;
- консолидация усилий и ресурсов федерального центра и субъектов Российской Федерации для развития арктического судоходства, морских и речных устьевых портов и осуществления «Северного завоза», а также информационных систем, обеспечивающих указанную деятельность.

В последнее время наблюдается оживление и повышение интереса в использовании СМП. Летом 2010 г. успешно выполнено 11 сквозных коммерческих рейсов в Арктике, в 2011 г. по СМП прошло более 40 судов, а в 2012 г. было совершено 36 транзитных рейсов. Объем транзитных перевозок по СМП в 2013 г. составил 1 млн 355 тыс. 897 т.

Развитие Арктической зоны Российской Федерации, имеющее геополитическое и экономическое значение, возможно путем создания обновленной инфраструктуры АМТС на основе главных ее элементов — флота и портов [3, с. 8–12; 4, с. 40–45; 5, с. 21–22]. Морская транспортно-технологическая система обеспечит не только освоение и разработку месторождений северных территорий и арктического шельфа, но и интенсификацию транзитных перевозок по СМП.

Исследованиями ЗАО «ЦНИИМФ» [3–6] выявлены следующие преимущества морской транспортировки углеводородов арктических месторождений по сравнению с трубопроводным транспортом:

- возможность выгодной диверсификации экспортных поставок;
- меньшие удельные затраты металла на единицу транспортируемых объемов и ненужность отчуждения земель под прокладку трубопроводов;
- растущий спрос на СПГ с расширением сферы его использования.

Если сегодня Россия занимает 13-е место по производству и продаже СПГ, то в ближайшее десятилетие она может войти в пятерку стран-лидеров.



Рис. 1. Евразийский транспортный коридор «Северный морской путь»

Подсчитано, что в соответствии со стратегическими госпрограммами освоения АЗРФ, Сибири и Дальнего Востока и проектами ресурсодобывающих компаний АМТС должна обеспечить общий годовой объем перевозок до 65 млн т к 2020 г. и до 100 млн т к 2030 г.

Для транспортного обеспечения обустройства и эксплуатации ряда арктических месторождений (рис. 2) разрабатываются обоснования и проекты новых морских транспортно-технологических систем с участием ЗАО «ЦНИИМФ». Для компании «НОВАТЭК» в целях реализации Постановления Правительства РФ от 11 октября 2010 г. институт разработал транспортно-технологическую систему вывоза СПГ и конденсата Южно-Тамбейского месторождения от терминала у порта «Сабетта» с определением основных технико-эксплуатационных характеристик судов и оценкой эксплуатационно-экономических показателей работы морского транспорта в западном и восточном направлениях.

Перспективы эффективного освоения ресурсов российской Арктики и использования СМП сегодня становятся реальностью. ГК «Норильский никель» начал транспортировку газового конденсата из Енисейского региона (до 200 тыс. т в год). С учетом этого ежегодный объем транспортировки грузов «Норильского никеля» стабилизируется в размере около 1,4 млн т. Компания «Пайяха» намеревается в 2016 г. начать транспортировку нефти (до 5 млн т в год) с Пайяхского месторождения от мыса Таналау. Подписано соглашение о стратегическом сотрудничестве между компаниями «Роснефть» и «Эксон-Мобил», в том числе о совместном освоении 12 месторождений российского арктического шельфа. Предусматривается создание совместного предприятия для разработки трех Восточно-Приновоземельских участков в Карском море.



Рис. 2. Российские нефтегазовые месторождения в Арктике

Реализация мегапроектов добычи природного газа потребует сооружения новых портов и терминалов для отгрузки сжиженного газа пропускной способностью 35–45 млн т в год (в губе Териберская, Чёшской губе, Сабетте и др.). Необходимый объем инвестиций в их создание, по предварительным оценкам, свыше 500 млрд руб.

Важным элементом инфраструктуры АМТС является ледокольный флот. В настоящее время в ведении ФГУП «Атомфлот» государственной корпорации «Росатом» находятся четыре действующих атомохода («Ямал», «50 лет Победы» (рис. 3), «Таймыр», «Вайгач») и атомный лихтеровоз «Севморпуть». На сегодняшний день российский атомный ледокольный флот успешно справляется с осуществлением ледовой проводки транспортных и научно-исследовательских судов на СМП, однако для обеспечения перспективного объема грузопотоков по СМП на запад и на восток для интенсификации проводки судов потребуются создание трех универсальных линейных атомных ледоколов с мощностью 60 МВт, заменяющих выводимые из эксплуатации существующие ледоколы двух типов (типа «Арктика» с большой осадкой и мелкосидящих типа «Вайгач») и четырех линейных дизельных ледоколов мощностью 16–25 МВт.



Рис. 3. Российский атомный ледокол «50 лет Победы»

В ноябре 2013 года на стапеле Балтийского завода заложен двухосадочный атомный ледокол нового поколения мощностью 60 МВт по проекту ЦКБ «Айсберг». Договор о строительстве подписан в августе 2012 г. руководством Росатомфлота и ООО «Балтийский завод — Судостроение» на сумму в 37 млрд руб., ледокол должен быть готов до конца 2017 г. Разрабатывается проект мелкосидящего атомного ледокола мощностью 40 МВт.

Вместе с тем пока еще отстает развитие и восстановление арктических портов, необходимых для экономического и социального прогресса северных субъектов РФ, а также для растущего арктического транзита, обеспечения безопасности мореплавания и экологии. В составе АМТС ЗАО «ЦНИИМФ» рекомендует создать следующие транспортно-логистические узлы: Кольский (Мурманск, Териберка), Урало-Западносибирский (Архангельск, порт «Индиго» в Чёшской губе), Ямальский нефтегазовый (Харасавэй, Сабетта, Новый порт), Нижне-Енисейский (Игарка, Дудинка, Диксон), Ленский (Якутск, Тикси), Чукотско-Камчатский (Певек, Провидения, Петропавловск-Камчатский). Базовыми портами-хабами АМТС послужат Мурманск и Петропавловск-Камчатский.

Расчеты ЗАО «ЦНИИМФ» дают основание для оптимистичного вывода о том, что перевозки контейнеров по СМП при прогнозируемом потеплении климата смогут достойно конкурировать с южным вариантом перевозок через Суэцкий канал, обеспечивая меньший среднегодовой уровень затрат. Экономия может составить более 250 долл. на каждом перевозимом контейнере.

Модернизация инфраструктуры АМТС и превращение СМП в евроазиатский транспортный коридор позволит обеспечить самоокупаемость арктической морской транспортной системы, способствуя эффективному освоению запасов Арктической зоны РФ и развитию экономики северных регионов.

Список литературы

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу: утв. Президентом РФ 18 сентября 2008 г. № Пр-1969.
2. Об Арктической зоне Российской Федерации: проект федерального закона.
3. *Иванов Ю. М.* Морские порты России — траектория развития / Ю. М. Иванов, А. А. Романенко, Г. В. Лебедев // Транспорт РФ. — 2013. — № 5 (48).
4. *Лебедев Г. В.* Модернизация инфраструктуры Арктической морской транспортной системы / Г. В. Лебедев // Морской сборник. — 2013. — № 10.
5. *Лебедев Г. В.* Развитие инфраструктуры Арктической морской транспортной системы / Г. В. Лебедев // Северный морской путь: материалы II Междунар. конф. — 2013.
6. Проблемы Северного морского пути / Совет по изучению производительных сил РАН; ЦНИИМФ. — М.: Наука, 2006. — 581 с.
7. *Гуреев С. А.* Международное морское право: учеб. пособие / С. А. Гуреев, И. В. Зенкин, Г. Г. Иванов; отв. ред. С. А. Гуреев. — 2-е изд. — М.: Норма: ИНФРА-М, 2011. — 432 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ю. Г. Ксенофонов, старший преподаватель,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
ksenofontov.ura@mail.ru

Т. Е. Маликова, кандидат технических наук, доцент,
ФБОУ ВПО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского»
tanmalik@mail.ru

А. А. Ильин, кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
rmf@yandex.ru

В. В. Каретников, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

А. П. Яснов, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
yasnovandrey@gmail.com

Р. В. Волков, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

А. А. Сикарев, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
sikarev@yandex.ru

С. Ф. Шахнов, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
sfshah@yandex.ru

М. Н. Покусаев, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»

М. К. Овсянников, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
kaf_tus@gumrf.ru

К. О. Сибряев, кандидат технических наук,
ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»

К. Е. Хмельницкий, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»

И. А. Боровикова, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

И. М. Данцевич, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
danzewitsch@rambler.ru

А. Б. Каракаев, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
a.karakaev@gma.ru

А. В. Луканин, кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
Andrey.lukanin@mail.ru

В. М. Приходько, кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

И. В. Приходько, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
prihodko-ira@yandex.ru

Н. Е. Жадобин, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

А. И. Лебедев, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

О. Г. Данилов, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
ogdanilov@list.ru

Ю. В. Галышев, доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
galyshev57@yandex.ru

А. Ю. Шабанов, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»,
Aush2003@mail.ru

А. В. Макарин, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»,
tem.makarin@gmail.com

В. В. Сахаров, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

А. А. Кузьмин, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
KuzminAA@gumrf.ru

А. А. Чертков, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
chertkov51@mail.ru

Б. Ф. Клочков, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
boris.klochkov@gmail.com

В. Е. Леонов, доктор технических наук, профессор,
Херсонская государственная морская академия (Украина)
Leonov_V_E@i.ua

И. И. Рублев, аспирант,
Херсонская государственная морская академия (Украина)

В. В. Вычужанин, доктор технических наук, профессор,
Одесский национальный морской университет (Украина)
vint532@yandex.ua

В. Д. Бойко, аспирант,
Одесский национальный морской университет (Украина)

Н. Д. Рудниченко, аспирант,
Одесский национальный морской университет (Украина)

В. Ю. Иванов, старший преподаватель,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
ivanov_seaport@mail.ru

Е. О. Ольховик, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

Ю. А. Резник, ведущий специалист,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

С. Г. Чулкин, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

В. М. Петров, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

А. А. Буцанец, ведущий специалист по НТП,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

М. А. Колосов, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

С. Ю. Ладенко, кандидат технических наук,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
ladenko@yandex.ru

И. М. Бойков, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
ivanbojjkov@rambler.ru

В. С. Синельников, кандидат технических наук,
ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
sinvs@mail.ru

И. Ю. Мартянов, кандидат физико-математических наук,
ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
imartyanov@mail.ru

Н. С. Корюкин, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
bad_boy_kolyan@mail.ru

С. Е. Иванова, кандидат экономических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
svetlana.ivanova39@mail.ru

Н. В. Митрофанова, кандидат экономических наук,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
vovnad7@mail.ru

Е. А. Басов, аспирант,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
thunder1950@yandex.ru

Ю. Г. Фирсов, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
gidrograph@mail.ru

Г. В. Лебедев, научный сотрудник,
ЗАО «ЦНИИМФ»
tts@cniimf.ru

Г. Е. Румянцев, кандидат технических наук,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Выпуск 3 (25)

2014 год

Выпускающий редактор *Е. А. Монахова*
Дизайнер *С. В. Курбатов*
Технический редактор *М. Н. Евсюткина*
Набор *О. Ю. Собянина*
Корректор *О. В. Миняева*

Подписано в печать с оригинал-макета 26.06.14. Формат 60х90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 11. Тираж 500 экз. Заказ № 56

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВПО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2