

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОРСКОГО БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

PROSPECTIVE WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF DIAGNOSIS RELIABILITY PARAMETERS OF OPERATION OF OFFSHORE DRILLING EQUIPMENT

В статье даны рекомендации по определению функции надёжности на основании базы данных, накапливаемых посредством автоматизированных информационно-измерительных систем непосредственно в ходе производственного процесса. Обоснована целесообразность кластеризации отказов и определения численного соотношения между отказами по кластерам. Показано, что повышение точности при определении плотности отказов возможно благодаря построению многопараметрических математических моделей оборудования и выполняемых им технологических процессов. Описаны методы идентификации информационной составляющей в трендах измерений и эффективных методов её анализа. Показаны пути не только оценки параметров надёжности эксплуатации оборудования, но и продления времени его безотказной работы за счёт реализации оптимального управления на основе статистических данных и уточнённых математических моделей оборудования и технологических процессов.

The article provides recommendations for the definition of reliability based on a database accumulated by means of automated information-measuring systems directly in the production process. Substantiated the clustering process failures and determining the ratios between failures by cluster. It has been shown increasing the accuracy in determining the density of possible failures due to the construction equipment multiparameter mathematical models and processes performed by them.

Methods are described for the identification of the information component in the measurement data and effective methods for its analysis. Are shown the way not only to assess the reliability of equipment operation parameter, but also extending the time of its trouble-free operation due to optimal control based on statistical data and the refined mathematical models of managed equipment and processes.

Ключевые слова: функция надёжности, идентификация, математическая модель, кластер, морское буровое оборудование.

Key words: reliability function, identification, mathematical model, cluster, offshore drilling equipment.

СОВРЕМЕННЫЙ уровень развития информационных технологий и рост использования их в нефтегазодобывающей отрасли потенциально позволяют совершить беспрецедентный качественный скачок в решении проблем надёжности, диагностирования и прогнозирования оборудования нефтегазодобычи. До сих пор малые объёмы и точность данных промышленной эксплуатации морских буровых установок являются основным фактором, существенно снижающим достоверность статистических оценок и точность моделей нефтегазовых технологических процессов. В то же время, автоматические компьютерные системы находят применение во все большем количестве нефтегазодобывающих установок, что теоретически позволяет реализовать накопление широчайших баз данных, куда могут вноситься данные по эксплуатационным параметрам и показателям оборудования, условиям добычи, потребления

энергоресурсов и т. д. Объем информации, накопленный за 20–25 лет, т. е. с начала применения в нефтедобывающей отрасли компьютерных систем до сегодняшнего времени, позволяет значительно повысить точность диагностирования и прогнозирования надежности эксплуатации оборудования на подобных объектах.

Известно, что классические исследования в области надежности оборудования опираются на постановку натуральных экспериментов, но нефтегазодобывающая отрасль, в сравнении с прочими отраслями промышленности, имеет свою специфику, исключая возможность такого подхода. Причина этого заключается в постоянно изменяющихся литологических условиях бурения, различных климатических условиях, географических масштабах и т. д., ввиду чего оценить рабочий ресурс, среднее время наработки и прочие показатели надежности оборудования становится возможным исключительно на основании данных, полученных непосредственно в процессе его эксплуатации. Перспективность эксплуатации морского бурового оборудования обусловлена в наше время открытием новых месторождений.

В развитии методов прогнозирования параметров надежности морского бурового оборудования в нефтегазодобывающей отрасли перспективным является использование моделирования. Для адекватного описания технической системы такого уровня сложности необходимо строить также модель, способную к сложному поведению (адаптации), в результате чего приходится отказываться от детерминированного подхода с его ограничениями в пользу стохастических моделей, моделей с элементами самоорганизации, обучаемости и т. п. Это объясняется трудностью построения адекватной детерминированной математической модели процесса бурения или добычи, обусловленной существенной ограниченностью классических методов диагностики, таких как построение трендов, слежение за нахождением параметров в допустимых пределах и т. д. Таким образом, с одной стороны, для эффективного статистического анализа надежности морского бурового оборудования (далее будем использовать термин «оборудование» как комплексную составляющую) необходимы производственные данные в течение периода наблюдений не менее десяти лет, с другой, прогнозирование аварий оборудования и методы, основанные на моделировании технологических процессов, требуют обновления данных несколько раз в сутки. Только при наличии этих массивов данных становится возможным идентификация динамических изменений процесса бурения и принятия решений по его оптимизации.

Отдельной нерешенной проблемой, существенно затрудняющей диагностирование параметров надежности эксплуатации оборудования, является проблема адекватной интерпретации данных диагностических измерений. Перспективными направлениями здесь являются использование нейронных сетей, нечеткой логики, теории детерминированного хаоса и т. д.

В наибольшей степени надежность и долговечность оборудования зависят от характеристик месторождения и параметров эксплуатации оборудования в данных условиях, т. е., очевидно, что одно и то же оборудование при различных литологических характеристиках скважин и одинаковых режимах эксплуатации будет иметь различный износ. Аналогичная картина наблюдается также в случае, если оборудование, работающее в идентичных скважинных условиях, будет иметь различные режимы эксплуатации.

Описание показателей надежности в количественной форме производят при помощи функции распределения вероятностей таких (случайных) величин, как время безотказной работы элемента оборудования, интервалы между отказами и т. д. Влияние условий эксплуатации (параметров и характеристик месторождения) и обязательность их учета приводят также к необходимости учета зависимостей параметров распределений от времени. Таким образом, для обеспечения повышения уровня надежности оборудования в нефтегазодобывающей отрасли и достоверности методов его технической диагностики необходимо подробно исследовать влияние условий эксплуатации и используемых в данных условиях режимов эксплуатации оборудования на его надежность и отказоустойчивость.

Определение функции надежности на основании эмпирических данных. Наиболее информативным показателем таких вероятностных величин, как, например, время наработки оборудо-

дования на отказ, является функция распределения. Параметры функции распределения и характер распределения обуславливаются множеством факторов: от характеристик оборудования, до многочисленного ряда параметров его эксплуатации. Причем параметры эти, будучи обусловлены характеристиками месторождения, постоянно изменяются во времени. В результате даже при наличии исчерпывающего количества и объема данных по отказам оборудования построение теоретических моделей связано с труднопреодолимыми сложностями. Поэтому до сих пор наиболее используемым методом определения функций распределения при исследованиях надежности в данной отрасли является построение эмпирических законов распределения. Это также объясняется тем, что благодаря использованию в настоящее время компьютерных систем сбора информации, их достоверность можно существенно повысить за счет увеличившихся объемов статистических данных. Большие объемы эмпирических данных в совокупности с уточненными функциями распределения позволяют находить корреляцию интенсивности отказов с характеристиками месторождения, функции распределения, зависимость интенсивности отказов от времени и характеристик места добычи, т. е. находить законы изменения показателей надежности в зависимости от условий эксплуатации оборудования.

Для максимальной эффективности использования накопленных баз данных, при эмпирическом определении параметров надежности эксплуатации оборудования, целесообразно руководствоваться следующими соображениями. Если структурировать информацию базы данных по дефектам оборудования на интервалах времени, где характеристики места добычи остаются неизменными в своих характерных параметрах, то становится возможным совмещать по временной шкале моменты начала эксплуатации всех единиц оборудования в одну точку, так как факторы их эксплуатации при этом будут идентичными. Конечно, одновременно на шкале времени будут смещены и точки возникновения дефектов, но время наработки при этом не изменится. Тогда, приняв, что первоначально число единиц оборудования, вводимое в работу на каком-либо месторождении, равно N_0 , t — период времени, на котором рассчитывается функция вероятности безотказной работы, а $N_f(t)$ — количество единиц оборудования, потерявшего работоспособность за период t , эмпирическое определение параметров надежности эксплуатации оборудования может быть выполнено с использованием функции безотказной работы:

$$R(t) = \frac{N_0 - N_f(t)}{N_0} = 1 - \frac{N_f(t)}{N_0}. \quad (1)$$

Предложенное условие (1) выделения промежутков времени сбора статистических данных по дефектам из условия сохранения постоянства факторов эксплуатации позволяет определить вероятность безотказной работы из соотношения числа единиц оборудования, вышедшего из строя, к общему их числу на момент ввода в эксплуатацию, вне зависимости от того, что, фактически, число единиц оборудования, находящегося в эксплуатации, не меняется благодаря его замене и ремонту в случае возникновения неисправностей.

Кроме того, в контексте задачи повышения эффективности использования накопленных баз данных, перспективной является кластеризация информации из каждой базы данных по характеру отказов. Подобная кластеризация возможна за счет объединения схожих отказов по групповым признакам. Например, отказы, создаваемые по электрическим причинам, механическим и т. д. (рис. 1). На основе такой кластеризации может быть реализован процесс идентификации наиболее распространенных причин возникновения неисправностей той или иной единицы оборудования и его элементов. При этом целесообразным становится включение и тех причин, которые не вызывают непосредственно поломки оборудования, но являются причиной остановки процесса разработки месторождения. Подобный анализ может производиться не только для полностью идентичных единиц оборудования, но и для различных его модификаций, что позволяет определять подверженность той или иной модификации возникновению определенных неисправностей по определенным причинам.

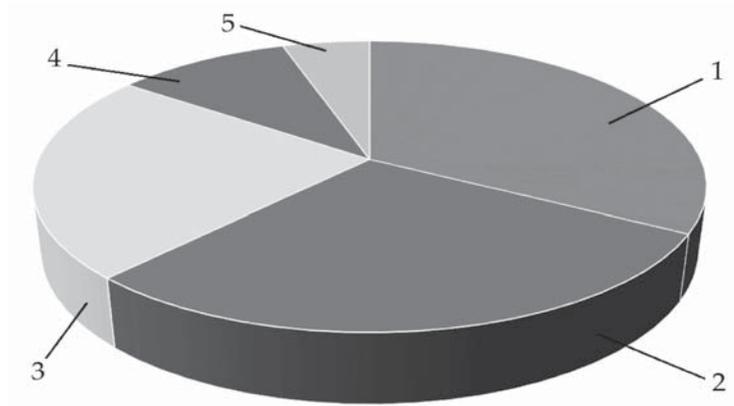


Рис. 1. Диаграмма кластеризации отказов по причинам:

- 1 — отказы по электрическим причинам: снижение сопротивления изоляции электромашин, пробой силового кабеля, дефект обмотки двигателя и т.п.;
- 2 — отказы по механическим причинам: обрывы крепежных элементов, заклинивание;
- 3 — отказы, связанные с непредусмотренным изменением хода технологического процесса;
- 4 — остановка процесса по причине выхода параметров технологического процесса за допустимые пределы: различные нарушения свойств технологических жидкостей, отклонение от траектории бурения и т.п.; 5 — другие причины

Как видно, базы данных, накапливаемые посредством автоматизированных информационно-измерительных систем, делают возможным определение статистических законов распределения параметров надежности эксплуатации бурового оборудования на основании результатов замеров, производимых непосредственно в ходе производственного процесса, а их избыточность делает возможной кластеризацию отказов и определение численного соотношения между отказами по кластерам.

Динамика изменения показателей надежности эксплуатации оборудования морских буровых установок. Как было показано, время безотказной работы оборудования зависит от условий и режимов его эксплуатации. Подавляющее большинство существующих статистических моделей, применяемых для описания вероятности отказа оборудования буровых установок, предполагает, что поток отказов стационарен. Однако, как отмечалось ранее, параметры функции распределения отказов изменяются в зависимости от времени и, очевидно, что по мере старения оборудования, интенсивность отказов будет возрастать.

На основании выражения (1) можно утверждать, что закон появления отказа за промежуток t будет определяться выражением

$$G(t) = 1 - R(t) = \frac{N_f(t)}{N_0}. \quad (2)$$

Зависимость плотности отказов от времени работы оборудования будет равна отношению дифференциала от $R(t)$ к $R(t)$:

$$\gamma(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (3)$$

Зависимость изменения плотности отказов от времени определяется как внутренними факторами оборудования, такими как качество изготовления конкретной его единицы, характер процесса старения его элементов и т.п., так и внешними факторами, такими как текущие скважинные характеристики, режимы работы, задаваемые буровым инженером или системами автоматики, и т.п. Если для простоты изложения принять, что все единицы оборудования выполнены с одинаковым качеством изготовления и процессы старения в них протекают идентично, то получим, что изменение плотности отказов со временем определяется исключительно внешними факторами,

воздействующими на оборудование буровой. Используя трехпараметрический закон распределения Гомперца, на основе его интегральной функции распределения и зависимости (3), получим выражение

$$G(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \gamma(t) dt\right). \quad (4)$$

Здесь $\int_0^t \gamma(t) dt = K_1 t + K_2 (e^{K_3 t} - 1)$, где K_1, K_2, K_3 – положительные константы, определяемые как параметры эмпирических зависимостей.

В то же время, учитывая выражения (2) и (3), получим

$$R(t) = \exp\left(-K_1 t - K_2 (e^{K_3 t} - 1)\right). \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) коэффициент K_1 отражает влияние внешних факторов эксплуатации, а K_2 и K_3 – характеризуют износ оборудования.

Исходя из (1) – (5), плотность отказов будет определяться выражением

$$\gamma(t) = K_1 + K_2 K_3 e^{K_3 t}.$$

Таким образом, плотность отказов будет возрастать со временем ввиду износа оборудования, а также будет зависеть от внешних факторов.

Практические исследования показывают, что применение трехпараметрической модели по сравнению с экспоненциальными одно- и двухпараметрическими позволяет повысить ее точность в 2–4 раза (рис. 2). Однако даже в этом случае улучшается лишь понимание зависимости отказов от износа, но при большом количестве внешних факторов отклонение модели от реальной системы существенно возрастает (рис. 3). Тем не менее, минимизация ошибки при определении плотности отказов, вызванных внутренними факторами, позволяет с большей точностью выделять отклонения модели, связанные с ошибками учета влияния внешних факторов.

Таким образом, исходя из ранее изложенного, можно сделать вывод о том, что повышения точности при определении плотности отказов можно достичь благодаря построению многопараметрических математических моделей оборудования и выполняемых при помощи него технологических процессов.

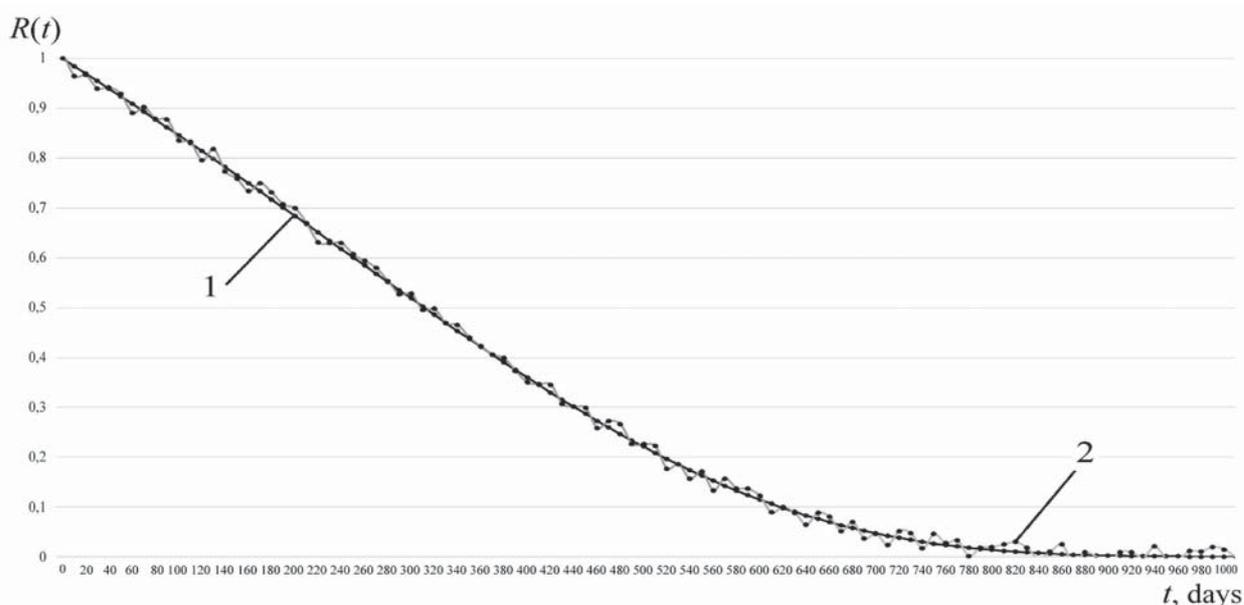


Рис. 2. Вид реальной 2 и полученной на основе трехпараметрической модели 1 функции безотказной работы единицы бурового оборудования при отсутствии существенных изменений скважинных характеристик

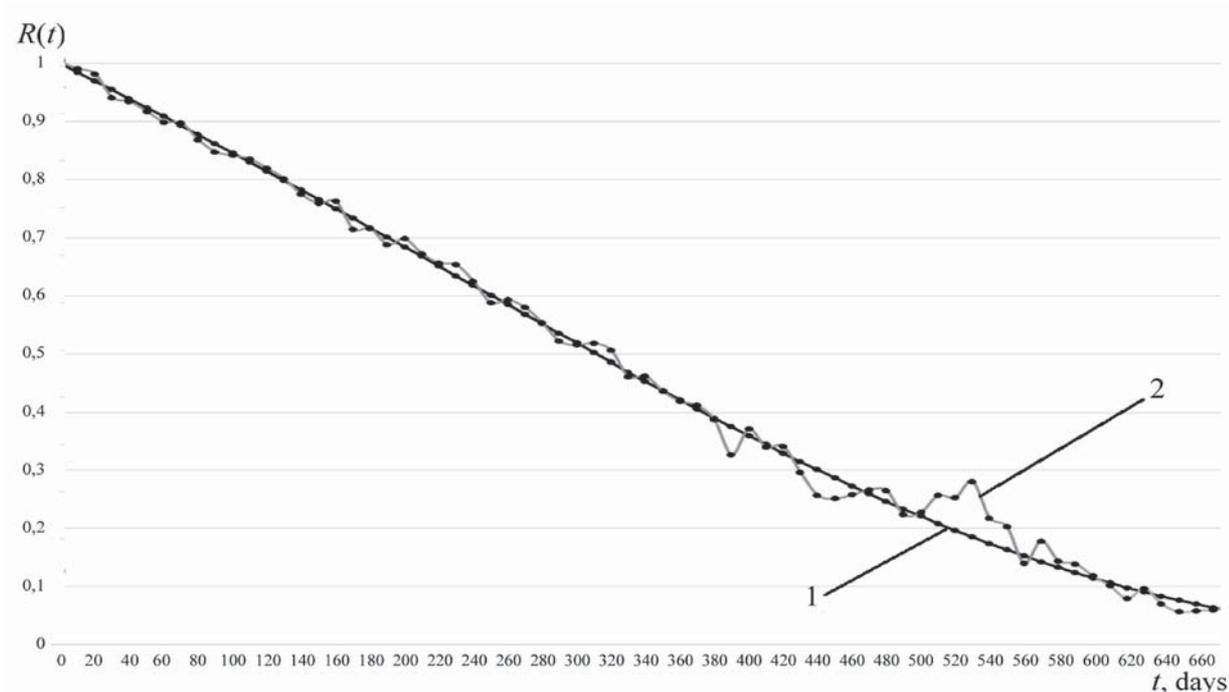


Рис. 3. Отклонение значений реальной 2 функции безотказной работы единицы бурового оборудования от полученных с помощью трехпараметрической модели 1 при непредвиденном изменении скважинных характеристик

Диагностирование технического состояния и надежности (морского) бурового оборудования на основании данных эксплуатации. Рассмотренные аспекты повышения точности определения параметров надежности бурового оборудования необходимо дополнить проблематикой методов контроля параметров надежности и диагностики, так как эти методы теоретически способны давать оценку технического состояния не только по глубокому ретроспективному анализу статистической информации, но и по текущему результату измерений, что позволит предотвратить ряд отказов, провоцируемых как внутренними, так и внешними факторами эксплуатации оборудования.

Одним из наиболее перспективных направлений в развитии диагностирования технического состояния оборудования является *метод вибродиагностики*. С одной стороны, развитие средств регистрации и обработки вибросигналов позволило заметно увеличить диагностические возможности данного метода, а с другой, эффективность данного метода, в не меньшей степени, зависит от методов анализа полученных данных. Теоретическая оценка достоверности вибродиагностических методов дает значения на уровне 90 %. Так, по данным, представленным в [1], достоверность диагностирования по среднеквадратичному значению виброскорости составляет 60–70 %, по спектрам вибросигналов — 80 %, по спектральным анализам с гомоморфной фильтрацией — 83 %. Однако на практике точность диагностирования катастрофически ниже и не превышает 30 %. В связи с этим особый интерес представляет разработка альтернативных методов вибродиагностики. Перспективным направлением решения данной проблемы является применение развивающейся теории модального анализа, которая позволяет сопоставлять измеряемые спектры реального оборудования со спектрами, получаемыми на математической модели данного оборудования, что значительно упрощает их анализ. Однако практическое применение данной теории пока затруднительно в связи с недостаточной ее проработанностью.

Одним из многообещающих способов повышения достоверности любого вибродиагностического метода на сегодняшний день является реализация учета шумовой составляющей измере-

ний, ее исследование и анализ при вибродиагностике. Дело в том, что информация о техническом состоянии единицы оборудования содержится в частотном диапазоне вибросигналов от 10 Гц до 1 кГц [1] – [4]. Однако при натуральных испытаниях было обнаружено, что у одной и той же единицы оборудования возможно изменение спектра вибросигналов в течение промежутков времени, измеряемых единицами минут [5] – [6].

В настоящее время используемые на практике системы имеют, как правило, схожую структуру, состоящую из фильтра, вычислителя среднеквадратичного значения и системы преобразования Фурье [7], [8]. Достоверность вибродиагностических методов теоретически можно улучшить благодаря использованию методов на основе применения математической статистики, теории нелинейных явлений и синергетики. Исследования на предмет влияния возможных дефектов или неконтролируемых изменений в режимах работы данного оборудования привели к выводу о том, что причина изменения спектра может заключаться в неучтенных низкочастотных составляющих сигналов. Причем возможно это лишь в случае нелинейного взаимодействия низкочастотных и высокочастотных колебаний, приводящего к модуляции полезного сигнала и генерирующего ряд комбинационных (суммарных и разностных) частот [9], [10]. Подобное взаимодействие препятствует адекватному анализу вибросигналов, что объясняет получаемую на практике низкую точность различных методов диагностирования.

Выводы. Изменения условий эксплуатации морского бурового оборудования вызывают изменение видов законов распределения и функции надежности оборудования, а также интенсивности отказов как функции времени и параметров бурения и добычи. В связи с этим при оценке показателей надежности необходимо учитывать влияние условий эксплуатации оборудования как в случае широкого ретроспективного анализа с учетом влияния внешних и внутренних параметров на надежность оборудования и кластеризации отказов по характерным причинам, так и в случае выполнения диагностики работающего оборудования в режиме реального времени по производимым в данный момент замерам.

Выделение информационной составляющей из данных измерений и применение к ней эффективных методов анализа, позволяющих повысить достоверность диагностики, позволит использовать полученные оценки для осуществления оптимального управления технологическими процессами буровых и нефтегазодобывающих комплексов, так как станет возможным в автономном режиме корректировать режимы работы оборудования в зависимости от действующих на него внешних параметров. Таким образом, решение указанных проблем поможет не только производить оценку параметров надежности эксплуатации оборудования, но и продлевать время его безотказной работы за счет оптимального управления на основе статистических данных и уточненных математических моделей управляемого (морского) оборудования и технологических процессов.

Список литературы

1. Рейнике М. Пути повышения экономической эффективности операций на старых нефтяных месторождениях / М. Рейнике, К. Тренел, Э. Хербст [и др.] // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1989. — № 7. — С. 21–26.
2. Микаэлян Э. А. Перспектива применения газотурбинных агрегатов в нефтегазовой промышленности / Э. А. Микаэлян, Р. Э. Микаэлян, В. П. Дорохин // Нефтяное хозяйство. — 1998. — № 6. — С. 49–52.
3. Мирзаджанзаде А. Х. Теория и практика применения неравновесных систем в нефтедобыче / А. Х. Мирзаджанзаде, Ф. Г. Максудов. — Баку: Элм, 1985. — 220 с.
4. Мирзаджанзаде А. Х. Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелинейность. Неравномерность. Неоднородность / А. Х. Мирзаджанзаде, М. М. Хасанов, Р. Н. Бахтизин. — Уфа: ГИЛЕМ. — 1999. — 462 с.

5. *Жиленков А. А.* Применение нейронечёткого моделирования для задач идентификации многокритериальности в транспортной отрасли / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Вестник Самарского государственного университета путей и сообщений. — 2014. — № 1 (23). — С. 104–110.

6. *Соколов С. С.* Построение информационного обеспечения безопасной эксплуатации судна при помощи автоматизации управления размещением груза и реагирования на внештатные ситуации / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 184–190.

7. *Чёрный С. Г.* Идентификация внешних параметров сигналов для экспертных подсистем в составе устройств судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Научно-технический вестник СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2014. — № 3 (198). — С. 28–36.

8. *Ильиных А.* В России есть возможности для изготовления бурового оборудования для континентального шельфа / А. Ильиных // Тезисы выступления главного конструктора ЗАО «Уралмаш — Буровое оборудование» года на заседании рабочей группы ТПП РФ по развитию производства отечественного оборудования для работы на шельфе (<http://www.derrick.ru/?f=z&id=8407>).

9. *Чёрный С. Г.* Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 68–75.

10. *Моцохейн Б. И.* Электропривод зарубежных установок для морского бурения: обзор зарубежной литературы / Б. И. Моцохейн. — М.: ВНИИОЭНГ, 1977. — 76 с.

УДК 62.2+ 67.05+67.02+629.5.03

С. Н. Безпальчук,
инж.;

А. А. Буцанец,
нач. отдела;

В. М. Петров,
д-р техн. наук, проф.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

GENERALIZED MODEL OF THE QUALITY STATUS OF SURFACE CRITICAL PARTS OF SHIP POWER PLANTS MADE OF COMPOSITE PLASTICS

Существенное влияние на работоспособность пар трения судовых энергетических установок, отдельные тедали которых выполнены их композиционных углепластиков, оказывают параметры качества и точности, которые обеспечиваются механической обработкой. На этапах проектирования и выполнения технологического процесса важно иметь критерии позволяющие управлять эксплуатационными параметрами трибосопряжения. В статье приведена обобщенная модель качества состояния поверхностного слоя деталей пар трения из композитов. Данная модель включает параметры: микрогеометрии поверхности, геометрической точности, технологических остаточных напряжений и упругопластической деформации. Для определения технологических остаточных напряжений предложен метод вдавливания алмазного индентора в поверхностный слой, где по диаграмме внедрения алмазного наконечника на различных участках определяют упругие и пластические составляющие. Микрогеометрия поверхности определяется методом сканирования алмазным индентором.

A significant impact on the performance of the friction pairs of ship power plants, separate tadali which is made of composite plastics, render settings quality of and accuracy, which are provided by machining. During the design and implementation process it is important to have criteria allows you to manage service-tion parameters of the friction