

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396

В. В. Сахаров,
д-р техн. наук, проф.;

А. А. Чертков,
канд. техн. наук, доц.;

С. В. Сабуров,
асп.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДСТВАМИ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

SIMULATION OF STATIONARY REGIMES IN ELECTRIC AND HYDRAULIC NETWORKS BY MEANS OF NONLINEAR PROGRAMMING

Современные электроэнергетические сети, открытые гидравлические и трубопроводные транспортные системы различного назначения характеризуются высокой размерностью, сложной зависимостью технологических параметров от режимов работы, внешних условий, что значительно усложняет разработку адекватных моделей и проведение машинных экспериментов для получения научно обоснованных конструктивных решений на стадии проектирования, модернизации и эксплуатации.

В основу разработки эффективных способов анализа и синтеза нелинейных сетей со сложной топологией положены технологии термодинамического моделирования, базирующиеся на топологической общности расчетных схем, а также на фундаментальном положении о движении транспортных сред по единым законам течения, сохранения массы и энергии.

Решение комплекса проблем потокораспределения в многоконтурных электрических и гидравлических сетях и системах составляет основу создания современных технологий моделирования гомогенных и гетерогенных сред в установившихся и переходных режимах, имеет широкий спектр приложений в различных сферах производства и, в первую очередь, на объектах водного транспорта различного назначения.

Рассматриваются модели и алгоритмы расчета стационарных режимов потокораспределения в многоконтурных гидравлических и электрических сетях на основе принципа наименьшего действия. Оптимизационные процедуры алгоритмизации вычислений реализуются с использованием инструментария Optimization Toolbox среды MatLAB. Приводятся примеры оценки вектора состояния стационарных режимов в электрических цепях с линейными и нелинейными емкостными элементами, а также потокораспределений в автономной гидравлической сети в классе экстремальных задач.

Modern electricity network, open hydraulic and pipeline transportation systems for various applications are characterized high dimensions, a complex technological parameters dependence connected with operating modes, external environment, that considerable complicates machine and experimental adequate models construction for science – based solutions in design, modernization and maintenance.

The basic for development nonlinear networks analysis and synthesis effective methods with complex topology founded on thermodynamic technology models with community design diagrams as well basic situation traffic environments with uniform mass and energy conservation laws.

Solutions to electrical and hydraulic flux – distribution networks problem is the basis for modeling electric and hydraulic networks modern technologies with homogenous and heterogeneous environments, steady – state and transient conditions and has a wide ranges applications in different production areas and water transport tools to various purposes.

Models and design algorithms for steady state hydraulic and electric networks regimes is considered based on the minimum energy principle. Optimization procedures for algorithmic solutions with using Optimization Toolbox realize in MatLAB. Examples for steady state vectors estimations in electrical and hydraulic networks that consists linear and nonlinear elements are considered. Stream distributing for autonomic hydraulic circuit as extreme solution is demonstrated.

Ключевые слова: модели, алгоритмы, гидравлические и электрические сети, принцип наименьшего действия, оптимизация.

Key words: models, algorithms, hydraulic and electrical networks, principle of least action, optimization.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ системы, открытые транспортные гидравлические системы, системы трубопроводного транспорта различного назначения, предназначенные для эффективной работы технологических объектов с различными принципами функционирования, нашли широкое применение на водном транспорте в качестве сетей, по которым производится тепло- и энергоснабжение, осуществляется подача воды, топлива, природного газа, различных технических жидкостей и смесей. Такие сети характеризуются, как правило, высокой размерностью, сложной зависимостью технологических параметров от режимов работы, внешних условий и требуют немалых усилий при построении моделей и проведении машинных экспериментов для получения научно обоснованных конструктивных решений на стадии проектирования, модернизации и эксплуатации. Для анализа и синтеза сетей, с учетом специфики их функционирования, созданы эффективные методы и алгоритмы, разработаны фундаментальные положения теории гидравлических цепей, опубликованные известными отечественными учеными (Меренковым А. П., Хасилевым В. Я. и др. [1], [2]) и получившие широкое признание как в нашей стране, так и за рубежом [9]. Логическим продолжением этих работ следует считать исследования, проводимые в настоящее время в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН и направленные на решение спектра проблем неравновесной термодинамики со структурами, содержащими не-newтоновские жидкости и сложные гетерогенные системы [3], [4], [7], [12]. Технологии термодинамического моделирования, базирующиеся на фундаментальных положениях второго закона термодинамики, определяющего универсальные принципы эволюции, равновесия и экстремальности, получили развитие и применяются для исследования свойств замкнутых и открытых систем, обратимых и необратимых процессов и явлений, связанных с переносом различных веществ, энергии и электрических зарядов в диссипативных макроскопических системах.

Важным направлением исследований является редукция сложных динамических процессов к состоянию равновесия, изучение принципов и явлений самоорганизации на основе общей технологии моделирования. Дальнейшее развитие технологии термодинамического моделирования должны получить в связи с широким спектром их практических приложений. К ним относятся трубопроводные и открытые гидравлические системы, сети и системы сетевой структуры, предназначенные для транспортируемых жидкостей, газов, различных энергоносителей и др. Такое разнообразие объясняется, прежде всего, топологической общностью расчетных схем, а также тем обстоятельством, что движение транспортируемых сред по элементам сетей подчиняется единым законам течения и сетевым законам сохранения энергии и массы.

К исключительно важным приложениям термодинамического моделирования на водном транспорте следует отнести комплекс проблем анализа стационарных и нестационарных потоко-распределений в многоконтурных гидравлических и гетерогенных системах с сосредоточенными и распределенными параметрами. Большой интерес представляют вопросы синтеза сетевых моделей стационарного изотермического потоко-распределения в приложении к открытым гидравлическим сетям, поскольку такие модели пригодны для поиска точек конечного равновесия, определяемых традиционными методами (невязок, путем решения нелинейных дифференциальных уравнений и др.) [9]. Сетевые термодинамические модели могут служить инструментом для исследования нестационарных технологических процессов речных землесосов при разработке перекаток и выполнении дноуглубительных работ на водных путях, поиска квазистационарных энергоэффективных режимов поддержания максимальной производительности по грунту при управлении грунтозабором и гидротранспортированием пульпы.

Технологии моделирования стационарных режимов в сетевых объектах и системах, базирующиеся на экстремальных принципах поиска равновесных состояний, позволяют существенно

дополнить количественное описание равновесных процессов, повысить эффективность и качество численных оценок рабочих параметров и расширить область приложений численных методов оптимизации к решению широкого класса практических задач с использованием компьютерных технологий.

Среди экстремальных принципов и технологий моделирования сетевых систем исключительно важным является принцип наименьшего действия, отражающий специфику поведения естественных сетей и позволяющий вести расчеты в сложных сетях с нелинейными характеристиками элементов (звеньев). Принцип основан на обобщении теоремы Д. К. Максвелла о наименьшем тепловом действии в электрических цепях на гидравлические сети. Обобщение позволило научно обосновать и расширить арсенал методов расчета потокораспределения в гидравлических сетях и системах, эффективно использовать для моделирования, наряду с традиционными принципами, методы анализа и синтеза нелинейных электрических цепей.

Остановимся кратко на моделировании стационарных режимов в электрических и гидравлических сетях с применением принципа наименьшего действия и компьютерных технологий.

Существующий арсенал корректных методов и моделей электрических цепей и динамических систем, приводящих к одним и тем же результатам, позволяет выбирать для расчета наиболее подходящий метод, с учетом топологии сети и эффективности применения стандартных функций вычислительных сред. В разветвленных сетях с большим числом ветвей и узлов система уравнений содержит множество неизвестных, и ее моделирование связано с выполнением значительного объема вычислительных операций и использованием обобщенных аналитических и топологических методов в различных вычислительных средах. Согласно теореме о принципе наименьшего действия, в любой системе проводников, где нет источников ЭДС, а токи отвечают закону Ома, тепло, генерируемое установившимся токораспределением, всегда меньше тепла, выделяемого токами, распределенными любыми другими способами, но согласующимися с условиями, определяемыми законами Кирхгофа. Важность этой теоремы исключительно велика в связи с тем, что она определяет взаимную связь задач математического программирования в электротехнике с аналогичными задачами потокораспределения в других средах, обладающих экстремальными свойствами расхода энергии на транспортирование.

Основанный на работах Максвелла и Кирхгофа экстремальный принцип потокораспределения в открытых гидравлических сетях может быть сформулирован в следующей форме: потоки в открытой гидравлической сети распределяются по ветвям (рукавам) таким образом, что этими потоками производится наименьшее количество теплоты. Энергия, затрачиваемая на транспортирование жидкости по сети из начальной в конечную точку, является величиной минимальной при соблюдении условия материального баланса во всех узлах сети (цепи). Очевидно, общность физических законов и методов динамических аналогий определяют практическое применение моделей сетей во многих физических системах и средах, а расчеты стационарных режимов, базирующиеся на минимизации энергии, позволяют получить высокую степень адекватности поведения модели и объекта. Согласно принципу минимизации энергии в аналитической механике, для всех возможных движений консервативной механической системы на любом временном интервале возникает такое движение, для которого функционал

$$J = \int_{t_a}^{t_b} L(t) dt, \quad (1)$$

называемый функционалом действия, принимает экстремальное (установившееся) значение. Функция $L(t)$ является функцией Лагранжа. Для линейной изолированной механической системы эта функция определяется соотношением

$$L = T_k - U_p, \quad (2)$$

где T_k — кинетическая энергия системы; U_p — потенциальная энергия, т.е. лагранжиан L является функцией положения системы и скорости.

В консервативной системе с голономными связями вектор переменных состояния $q(t)$ на временном интервале $[t_a, t_b]$ удовлетворяет принципу Гамильтона: $q(t)$ является экстремалью функционала J , если выполняется соотношение

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = 0.$$

Для электрических цепей это условие имеет ограниченное применение. Например, его можно использовать для расчета цепей, состоящих только из емкостей с идеальными кулон-вольтными характеристиками. В общем же электрические цепи и сети не являются консервативными, поскольку в них часть энергии необратимо преобразуется в тепло. Для моделирования неконсервативных систем необходимо применять уравнение

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}} = Q,$$

где Q — обобщенные силы (внешние силы в механике или источники энергии в электрических цепях); R — диссипативная функция Рэлея. Экспериментально доказано, что для линейных электрических цепей и систем оценку диссипативной функции с достаточной точностью можно выполнить с помощью следующего соотношения

$$R = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j (\dot{q}_j)^2,$$

где r_j — элемент параметра диссипации, т.е. резистор; $j = 1, \dots, m$.

Функция Рэлея для цепей, систем и сетей с нелинейными характеристиками диссипативных элементов является сложной и может оцениваться с помощью современных компьютерных средств аппроксимации (полиномов, степенных рядов, сплайнов, вейвлетов и др.).

Математическое моделирование, анализ алгоритмов и методов вычислений потокораспределения, выбор адекватных решаемым задачам вычислительных систем и компьютерных технологий с использованием принципа наименьшего действия составляют проблему редукции моделей движения транспортируемых сред к моделям покоя [6].

Если кинетическая и потенциальная энергии в уравнении (2), а также диссипативная функция моделируются квадратичными полиномами, то для расчетов минимизации энергии целесообразно использовать методы квадратичного программирования и соответствующие функции инструментария Optimization Toolbox среды MatLAB с соблюдением их синтаксиса [8]. Такими свойствами обладают линейные системы и цепи. Для расчета систем и электрических цепей, состоящих из нелинейных элементов, метод квадратичного программирования не применим, и требуется использовать другие альтернативные методы, адекватные анализируемым процессам с возможностями применения принципа наименьшего действия.

Рассмотрим электрическую цепь, представленную на рис. 1. Разветвленная цепь, подключенная к источнику постоянной ЭДС, состоит из пяти конденсаторов различной емкости [10].

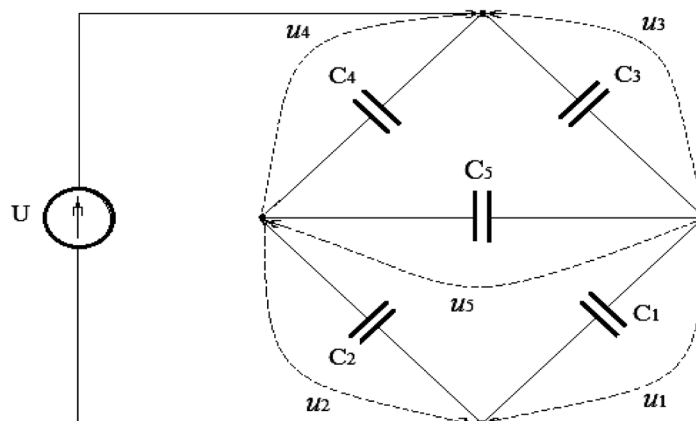


Рис. 1. Конденсаторная электрическая цепь

Согласно уравнению (2), стационарная точка для напряжений на емкостях цепи с линейными элементами может быть определена путем минимизации энергии электрического поля конденсаторов U_p при ограничениях, определяемых топологией цепи. Задача в терминах процедуры оптимизации формулируется следующим образом: оценить вектор состояния $U_C = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4 \ U_5]^T$, доставляющий минимум критерию качества

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 C_i U_i^2 \quad (3)$$

при ограничениях, составленных по законам Кирхгофа, с учетом принятых на рис. 1 обозначений напряжений на конденсаторах

$$A_{eq} \cdot U_C = b_{eq}, \quad (4)$$

где

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad b_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -U \end{bmatrix}.$$

Решение оптимизационной задачи выполнено при следующих значениях параметров цепи:

$$C_1 = 2 \text{ мкФ}; C_2 = 5 \text{ мкФ}; C_3 = 1 \text{ мкФ}; C_4 = 4 \text{ мкФ}; C_5 = 3 \text{ мкФ}.$$

Для расчетов по формулам (3) и (4) применена функция `fmincon` среды MatLAB. Результаты расчетов сведены в табл. 1, где в каждой строке представлены напряжения на ветвях цепи (рис. 1), соответствующие стационарным режимам при напряжениях U (В) источника ЭДС, приведенных в первом (левом) столбце. Минимальные значения критерия качества $J_{\min}$ для каждого режима — в правом столбце.

Таблица 1

Результаты расчетов напряжений на ветвях конденсаторной цепи

U	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$J_{\min}$
100	38,0952	42,8571	-61,9048	-57,1424	-4,7619	0,0290
200	76,1905	85,7142	-123,8095	-114,2895	-9,5238	0,1162
300	114,2858	128,5714	-185,7142	-171,4280	-14,2857	0,2614
400	152,3812	171,4285	-247,6188	-228,5715	-19,0474	0,4648
500	190,4762	214,2857	-309,5238	-285,7143	-23,8095	0,7262

Предположим, что вторая и пятая емкости (рис. 1) с кулон-вольтными характеристиками Q_{22} и Q_{52} заменены элементами с нелинейными характеристиками Q_{21} и Q_{51} , соответственно. Характеристики приведены на рис. 2.

Видно, что Q_{22} соответствует емкости $C_2 = 5 \text{ мкФ}$, а Q_{52} — емкости $C_5 = 3 \text{ мкФ}$. Для нелинейных элементов емкости изменяются в зависимости от напряжения и могут быть аппроксимированы следующими функциями:

— для Q_{21} $C_2(U) = (-6.1e - 06) \cdot u(2)^2 + 5 \cdot 1.0e - 06 \text{ (мкФ)}$;

— для Q_{51} $C_5(U) = (-2.5e - 06) \cdot u(5)^2 + 3 \cdot 1.0e - 06 \text{ (мкФ)}$.

Критерий качества (3), с учетом полученных зависимостей, будет иметь вид:

$$J_n = C_1 \cdot U_1^2 + C_2(U_2) \cdot U_2^2 + C_3 \cdot U_3^2 + C_4 \cdot U_4^2 + C_5(U_5) \cdot U_5^2. \quad (5)$$

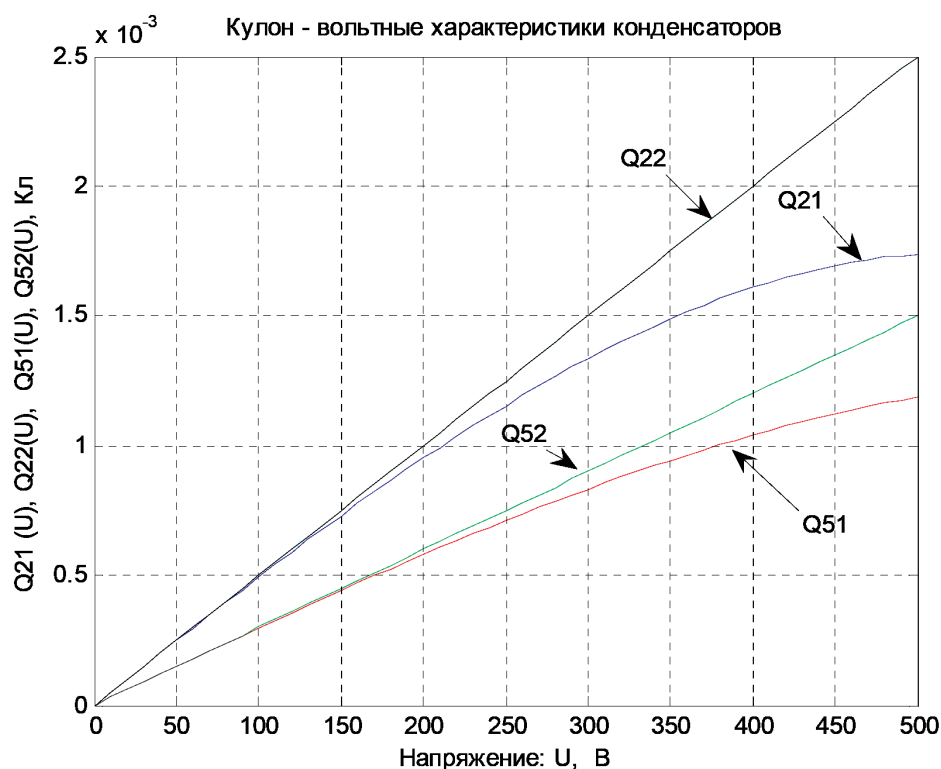


Рис. 2. Кулон-вольтовые характеристики емкостных элементов нелинейной цепи

Расчеты нелинейной цепи путем минимизации (5) при вариации U источника питания для пяти вариантов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения напряжений на элементах нелинейной цепи

U	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	J_n
100	38,0995	42,9802	-61,9005	-57,0198	-4,8807	0,0290
200	76,5355	86,4712	-123,4645	-113,5288	-9,9357	0,1159
300	115,5944	131,1925	-184,4056	-168,8075	-15,5982	0,2597
400	155,6466	177,9735	-244,3534	-222,0265	-22,3269	0,4591
500	197,3453	228,0697	-302,6547	-271,9303	-30,7245	0,7117

Из приведенных данных и рис. 2 видно, что с увеличением ЭДС источника влияние на равновесные режимы нелинейных элементов возрастает, а минимум J_n в сравнении с J линейной цепи уменьшается, что нетрудно определить по данным табл. 1 и 2.

Придавая большое значение вопросам применения принципа наименьшего действия для решения практически неограниченного спектра прикладных задач технико-экономического анализа и синтеза сетей различного назначения с использованием технологий термодинамического моделирования, кратко остановимся на методе расчета стационарного потокораспределения в гидравлических сетях и системах.

Рассмотрим простой пример расчета автономной гидравлической сети, представленной на рис. 3, и приведем вычислительный алгоритм, также базирующийся на функции `fmincon`. Для определенности технологические параметры (гидравлические сопротивления ветвей) примем равными значениям, приведенным в работе [5].

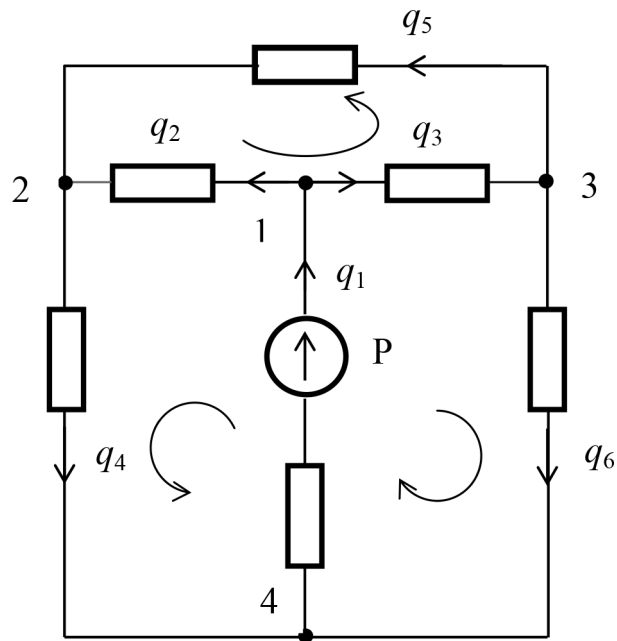


Рис. 3. Схема гидравлической сети с источником давления

Покажем, что вычислительный алгоритм для расчета нелинейной сети должен содержать нелинейные ограничения, способствующие повышению адекватности модели и конкретного технологического процесса.

Сеть содержит пять ветвей с указанными стрелками направлениями потоков. Нумерация узлов представлена числами 1, 2, 3 и 4. Введем нумерацию ветвей:

ветвь 1 расположена между узлами 1 и 2; 2 — между узлами 2 и 3; 3 — между узлами 2 и 4; 4 — между узлами 1 и 3; 5 — между узлами 3 и 4; 6 — соответственно, между узлами 1 и 4.

Расходы жидкости в ветвях обозначим вектором $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$.

Введем вектор сопротивлений ветвей

$$a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6] = [1.0e - 02 \ 1.56e - 03 \ 2.50e - 02 \ 1.25e - 02 \ 1.00e - 01 \ 4.22e - 01].$$

Для моделирования стационарных режимов потокораспределения примем степенную модель вида:

$$P_i = a_i \cdot q_i^{b_i}, \quad i = 1, \dots, 6, \quad (6)$$

где P_i — потери напора на i -ой ветви (аналог падения напряжения в электрической цепи).

Принято считать, что для ламинарных течений $b_i = 1$, а для турбулентных этот показатель степени в модели (6) равен 2. Чтобы расширить условия задачи, допустим, что существуют перекачиваемые жидкости, для которых b_i принимают значения $1 \leq b_i \leq 2$. Тогда можно ввести вектор b , элементами которого будут показатели степени модели (6) для всех ветвей:

$$b = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6] = [2 \ 1.7 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1.3].$$

С учетом (6), запишем критерий качества J_{TC} , отвечающий принципу наименьшего действия:

$$J_{TC} = a \cdot q^{[b+1]^T}. \quad (7)$$

Операцию минимизации (7) следует выполнять при соблюдении линейных и нелинейных ограничений. Линейные ограничения как уравнения неразрывности потоков запишем в следующем виде:

$$D_{eq} \cdot q = M_{eq},$$

где, исходя из топологии сети, согласно рис. 3, матрицы, входящие в уравнение (8), можно записать

$$D_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \quad M_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Нелинейные ограничения представим вектор-функцией, подлежащей «обнулению»:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cdot q_1^{b_1} + a_2 \cdot q_2^{b_2} + a_4 \cdot q_4^{b_4} - P \\ a_2 \cdot q_2^{b_2} + a_3 \cdot q_3^{b_3} + a_5 \cdot q_5^{b_5} \\ a_1 \cdot q_1^{b_1} + a_3 \cdot q_3^{b_3} + a_6 \cdot q_6^{b_6} - P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Расчеты, выполненные путем минимизации (7) при соблюдении ограничений (8) и (9), представлены в табл. 3 для различных напоров, создаваемых перекачивающим насосом. В первом столбце таблицы приведены давления насоса P (МПа). В каждой строке указаны расходы в ветвях гидравлической сети q_i (м³/с). В последнем (правом) столбце приведены минимальные значения критерия $J_{гс}$, определенные в результате решения оптимизационной задачи.

Таблица 3

Расчетные значения расходов в ветвях гидравлической сети

P	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	$J_{гс}$
1,0	7,1313	6,0086	1,1228	6,0567	0,0482	1,0746	7,1313
1,5	8,8138	7,2873	1,5265	7,3622	0,0749	1,4516	13,2206
2,0	10,2458	8,3495	1,8963	8,4508	0,1013	1,7950	20,4916
2,5	11,5168	9,2743	2,2425	9,4015	0,1272	2,1152	28,7919
3,0	12,6726	10,1020	2,5707	10,2547	0,1528	2,4179	38,0179

Повышение эффективности и качества моделирования стационарных процессов потоко-распределения в сетях и сетевых системах различного назначения экстремальными методами с использованием компьютерных технологий представляет собой самостоятельную научную проблему, получившую важные приложения на водном транспорте. Приведенные расчетные примеры, базирующиеся на принципе наименьшего действия, свидетельствуют о возможности его использования для оценки параметров стационарных режимов в нелинейных электрических цепях и гидравлических сетях. Следует отметить, что метод применим для расчетов потоко-распределений в неавтономных сетях, природных открытых гидравлических сетях, каковыми являются водные пути с разветвленными участками рек и др. Метод и численные алгоритмы оптимизации пригодны для расчетов стационарных режимов в сетях и гидравлических системах высокой размерности с использованием принципов декомпозиции в нелинейном программировании.

Список литературы

1. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. — М.: Наука, 1985. — 274 с.
2. Меренков А. П. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения / А. П. Меренков, Е. В. Сеннова, С. В. Сумароков [и др.]. — Новосибирск: Наука, 1992. — 405 с.
3. Каганович Б. М. Термодинамика теории цепей и их совместные приложения в энергетических исследованиях / Б. М. Каганович, Н. И. Воропай, В. А. Стенников [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2014. — № 5. — С. 3–15.

4. *Kaganovich B. M.* On the area of equilibrium thermodynamics application / B. M. Kaganovich, A. V. Kelko, V. A. Shamansky, I. A. Shirkalin // Proc. of ASME 2044 International Mech. Eng. Congress. November, 13 – 19. — Anaheim, California, USA — 2004. — С. 197–203.
5. *Сахаров В. В.* Балансовые модели и их применение в автоматизированных системах управления производством / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 46–53.
6. *Иванов Е. Н.* Способ расчета электрических цепей на основе квадратичного программирования / Е. Н. Иванов, А. В. Черничкова, М. Б. Шамсиева // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 67–71.
7. *Каганович Б. М.* Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя / Б. М. Каганович, А. В. Кейко, В. А. Шаманский [и др.]. — Новосибирск: Наука, 2010. — 236 с.
8. *Пригожин И. Р.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Р. Пригожин, Д. Кондепуди. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
9. *Ottinger H. C.* Beyond Equilibrium Thermodynamics / H. S. Ottinger. — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. — 635 p.
10. *Дьяконов В. П.* Математические пакеты расширения MatLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.
11. *Ахметзянов А. В.* Структурные модели стационарных процессов в нелинейных сетях / А. В. Ахметзянов, Л. И. Григорьев, С. В. Спиридонов // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2007. — № 3. — С. 37–48.
12. *Левин А. А.* Расчет потокораспределения в системе пылеприготовления ТЭС / А. А. Левин, Э. А. Таиров, В. Ф. Чистяков // Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: сб. науч. тр. / Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. — М., 2010. — С. 114–122.

УДК 629.123:621.31

А. В. Григорьев,
канд. техн. наук, доц.;

Р. Р. Зайнуллин,
соиск.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ВАЛОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ И СИНХРОННЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

ANALYSIS OF OPERATION MODES OF SHIP SHAFT GENERATOR PLANTS WITH FREQUENCY CONVERTERS AND SYNCHRONOUS COMPENSATORS

На современных транспортных судах широкое распространение получили валогенераторные установки. Применение полупроводниковых преобразователей частоты позволяет расширить их функциональные возможности и реализовать следующие режимы эксплуатации: автономный генераторный, генераторный параллельно с вспомогательными дизель-генераторами, автономный двигательный, двигательный совместно с главным двигателем. В состав традиционной схемы установки входят синхронный валогенератор, полупроводниковый преобразователь частоты и синхронный компенсатор. Анализ режимов ее эксплуатации проведен с использованием методов теории электрического поля и теории электрических цепей, в том числе метода баланса мощностей. В целях повышения технико-экономических показателей и надежности установок с полупроводниковыми преобразователями частоты в различных режимах эксплуатации разработаны требования к виду функции мощности от частоты вращения валогенератора, к рас-