

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 621.311

А.И. Стасюк, Л.Л. Гончарова

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Введение

Решение комплексной проблемы оптимизации электропотребления на тягу железнодорожному транспорту, минимизации общесистемных затрат электроэнергии, формирования энергосберегающих информационных технологий и, соответственно, улучшение безопасности перевозок, при незначительных инвестиционных составляющих, возможно путем интеллектуализации технологических процессов электроснабжения на основе создания современных сетевых технологий, математических моделей и методов оперативного управления. Компьютерные сети и системы, ориентированные на управление электроснабжением, открыли новый этап в сфере интеллектуализации процедур управления быстропротекающими электроэнергетическими процессами, создали почву для формирования новых знаний, на базе которых появились современные информационные технологии энергосбережения и безопасности, в первую очередь скоростных перевозок [1, 2]. Поэтому в условиях функционирования рынка электроэнергии доминирующее направление научных исследований связано с организацией интеллектуальных систем электроснабжения на основе новых концептуальных подходов, принципов организации и методов синтеза компьютерных сетевых архитектур, что адекватно отражают топологию энергосистемы. Широкий диапазон применения компьютерных средств всережимного управления электроснабжением на тягу поставил проблему синтеза математических моделей и методов проведения анализа и дополнительных исследований определения совокупности характеристик компьютерных архитектур, ориентированных на проведения непрерывного мониторинга комплекса параметров режимов энергосистем, оптимизации процедур потребления электроэнергии и соблюдения условий надежности и качества электроснабжения.

Анализ новых исследований и публикаций

Комплексные исследования, проведенные в связи с формированием энергосберегающих технологий и оптимизацией электроснабжения, а также новые научные результаты показали, что перспективным является направление, связанное с интегральной интеллектуализацией комплекса процедур оперативного и стратегического управления быстропротекающими технологическими процессами энергоснабжения и электропотребления [3, 4]. Это подтверждается широким применением в современной электроэнергетике перспективных SMART Grid-технологий, которые базируются на модели интеллектуальных электрических сетей [1, 3]. В основе синтеза моделей находится ряд принципов, таких как саморегуляция, самовосстановле-

© А.И. СТАСЮК, Л.Л. ГОНЧАРОВА, 2017

ние, единое информационное пространство первичных данных, сформированных с общесистемных позиций, что в совокупности и представляет анализирующую, самоконтролируемую и отчетную технологию в условиях рынка. Создание интеллектуальных сетей электроснабжения железных дорог предусматривает, в первую очередь, проведение широкого спектра научных исследований и поиск новых путей синтеза математических моделей, которые адекватно отражают топологию энергосистемы и архитектуру компьютерной сети управления электроснабжением, методов и компьютерно-ориентированных алгоритмов управления энергосистемами, а также перспективных решений в области организации современных компьютерных архитектур оперативного и стратегического управления на основе сетевых и информационных технологий. Доминирующей функцией организованных подобным образом сетей электроснабжения является накопление новых знаний о штатных, нормальных и аварийных режимах функционирования, что открывает широкий спектр возможностей для резкого повышения эффективности электросетей с точки зрения энергосбережения, надежности, качества поставки электроэнергии, а также реализации интегральной коммерческой тарификации, включая минимизацию общесистемных затрат.

Рассмотрим нерешенные ранее аспекты общей проблемы. Благодаря стремительному развитию интегральных технологий изготовления сверхбольших интегральных схем, микропроцессоров и компьютерных контроллеров проблеме организации интеллектуальных систем снабжения электроэнергией железнодорожного транспорта в научной и технической литературе уделяется достаточно много внимания. Заметим, что достижение максимального уровня интеллектуализации тяговых электрических сетей возможно только благодаря организации глубокой взаимной интеграции топологии электросетевой инфраструктуры и архитектуры компьютерной среды управления поставкой электроэнергии [5, 6]. Следовательно, комплекс срочных задач требует разработки методов синтеза нового класса математических моделей, адекватных топологическим особенностям электрической инфраструктуры. Воспользовавшись сформированными математическими моделями для синтеза интеллектуальных систем электроснабжения на тягу, получим качественно новое взаимодействие топологии и архитектуры электросети и компьютерной среды соответственно. Организованная таким образом архитектура распределенной компьютерной сети адекватно отражает структурные особенности системы электроснабжения. Можно предположить, что высокой эффективности функционирования интеллектуальных электрических сетей можно достичь в том случае, когда характеристики компьютерной среды будут соответствовать требованиям соответствующих критериев в процессе оперативного управления электроснабжением. В то же время можно акцентировать внимание на том, что в нерешенной части проблемы инновационного преобразования тяговых электрических сетей железнодорожного транспорта недостаточно внимания уделено созданию математических моделей и методов анализа и оценки параметров распределенной компьютерной среды оперативного управления быстропротекающими технологическими процессами электроснабжения.

Цель публикации — с помощью теории дифференциальных преобразований разработать методы синтеза математических моделей распределенных компьютерных архитектур всережимной системы управления электроснабжением на уровне тяговых подстанций для анализа режимов функционирования вычислительных сетей и определение совокупности их характеристик.

Распределенные электрические сети железнодорожного транспорта, в отличие от общих систем электроснабжения, имеют ряд особенностей, в первую очередь значительные «подвижные» нагрузки при организации перевозочного процесса. Режимы питания тяговых электросетей, в связи с их спецификой, устанавливаются только между фазами $U_a(t) - U_c(t)$ или $U_b(t) - U_c(t)$, что вызывает существен-

ную несимметрию напряжения и ее несинусоидальность. Совокупность подобных факторов негативно влияет на функционирование систем железнодорожной автоматики, защиту и уровень безопасности пассажирских и грузовых перевозок. Базовым уровнем распределенной иерархической системы электроснабжения железных дорог является уровень тяговых подстанций как основы проведения оптимизации процедур электропотребления, минимизации общесистемных затрат и надежности электроснабжения. Проведение подобного комплекса работ требует системных исследований для создания новой модели управления на основе организации распределенной архитектуры компьютерной среды, что адекватно отражает топологию тяговой подстанции, ориентированной на всережимное управление электроэнергетическими процессами.

На рис. 1 приведена схема реализации локальной вычислительной сети управления быстропротекающими технологическими процессами электроснабжения на уровне тяговых подстанций как основа создания современных информационных, сетевых и энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте. В то же время, как показывают результаты исследований, для эффективного проведения общесистемного мониторинга параметров режимов тяговых систем очень важно определить способности компьютерных архитектур управления электрическими сетями тяговых подстанций в реальном времени. Дополнительные исследования требуют разработки новых математических моделей и методов. Для организации методов и соответствующих критериев представим локальную вычислительную сеть управления электропотреблением на уровне тяговой подстанции (рис. 1) в виде графа приведенного на рис. 2, топология которого адекватно отражает архитектуру вычислительной локальной сети.

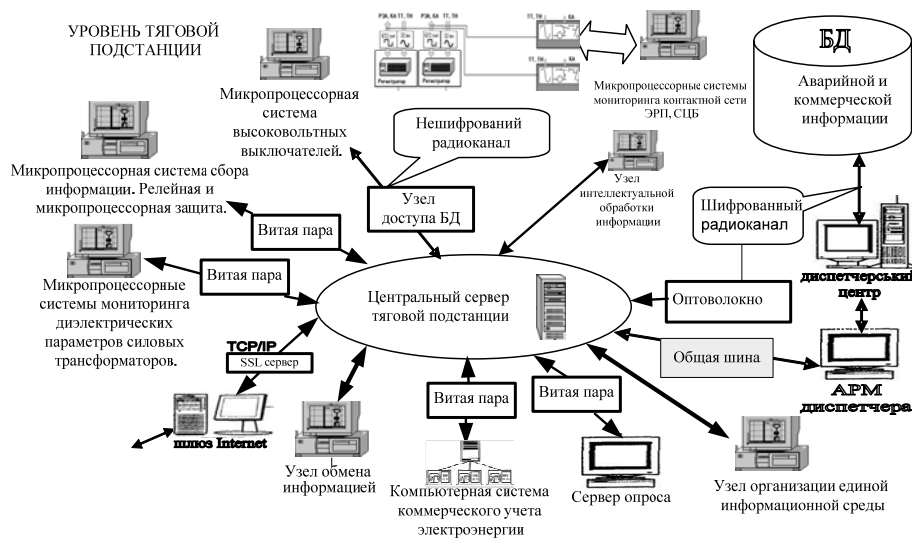


Рис. 1

Граф логической архитектуры локальной компьютерной сети включает два типа топологий: звезда и круг. Фрагмент топологии типа звезда включает совокупность узлов, таких как узел $\varphi_0(t)$, что представляет собой центральный сервер компьютерной сети тяговой подстанции; узел $\varphi_1(t)$ — организация единой информационной среды первичной информации и ведение базы данных; узел $\varphi_2(t)$ — обмен информацией в рамках корпоративной компьютерной сети управления электроснабжением железной дороги; узел $\varphi_3(t)$ — обмен информацией по системе Internet; узел $\varphi_4(t)$ представляет собой сервер оперативного управления и ведения комплекса автоматизированных рабочих мест управления электроснабжением,

мониторинг тяговых трансформаторов, высоковольтных выключателей и силового оборудования, узел $\varphi_5(t)$ — организация в процессе работы микропроцессорной и релейной защиты тяговой электросети. Сегмент топологии графа типа круг включает ряд вышерассмотренных общих узлов: $\varphi_0(t)$ $\varphi_1(t)$ $\varphi_2(t)$ $\varphi_3(t)$ $\varphi_4(t)$ $\varphi_5(t)$, а также узел $\varphi_6(t)$ — организация коммерческого учета электроэнергии по коммерческим тарифам дифференцированным по зонам суток, $\varphi_7(t)$ — мониторинг параметров режимов тяговых сетей электроснабжения, $\varphi_8(t)$ — интеллектуальная обработка коммерческой и технологической информации. Кроме того, в рассматриваемую топологию входит узел $\varphi_9(t)$ — распределение локальной сети управления электропотреблением дистанции электроснабжения железной дороги и узел $\varphi_{10}(t)$ — обмен информацией по Internet с корпоративными компьютерными сетями высшего уровня.

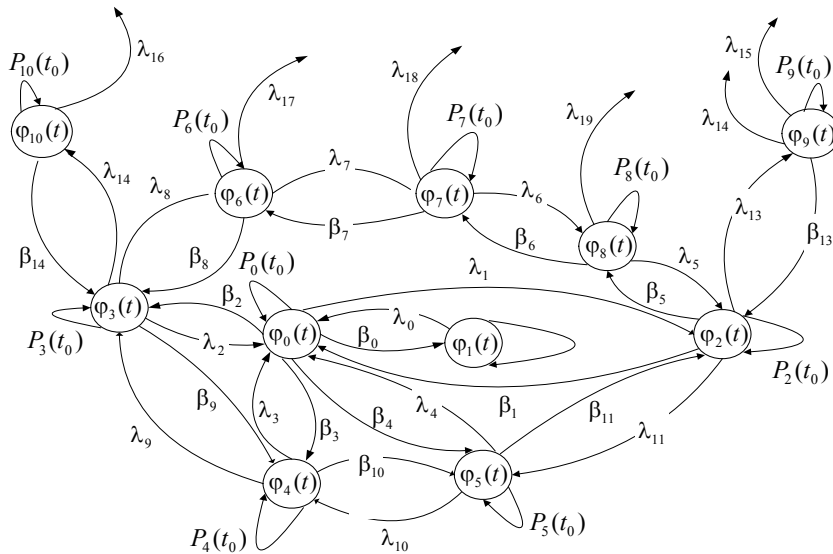


Рис. 2

Интенсивность потока заявок в рассматриваемом графе (см. рис. 2) для обмена информацией между компьютерными компонентами локальной вычислительной сети тяговой подстанции представим величиной $\lambda_i(t)$, а интенсивность потока обслуживания заявок $\lambda_i(t)$ — величиной $\beta_i(t)$. Модель локальной вычислительной сети, представленной в виде графа, будем анализировать на основе теории массового обслуживания как систему с ожиданием и ограниченной очередью, а совокупность потоков $\lambda_i(t)$, $\beta_i(t)$, которые протекают в ней, согласно [7], отнесем к классу Пуассоновских. Для синтеза математической модели определения вероятностей $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$, $P_6(t)$, $P_7(t)$, $P_8(t)$, $P_9(t)$, $P_{10}(t)$ и исследования, а также проведения анализа компьютерной архитектуры локальной сети всережимной системы управления на уровне тяговой подстанции представим граф (см. рис. 2) в виде системы дифференциальных уравнений Колмогорова с соответствующими начальными условиями. Используя необходимую совокупность правил и формул согласно [7, 8], математическую модель для анализа сетевой архитектуры запишем в следующем виде:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = \lambda_0 P_1(t) + \beta_1 P_2(t) + \lambda_2 P_3(t) + \lambda_3 P_4(t) + \lambda_4 P_5(t) - (\beta_0 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \lambda_1) P_0(t),$$

$$\begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= \beta_0 P_0(t) + \lambda_0 P_1(t), \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_1 P_0(t) + \lambda_5 P_8(t) - (\beta_1 + \beta_5 + \lambda_{11} + \lambda_{13}) P_2(t) + \beta_{11} P_5(t) + \beta_{13} P_9(t), \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_9 P_4(t) - (\lambda_2 + \lambda_8 + \lambda_{14} + \beta_9) P_3(t) + \beta_2 P_0(t) + \beta_8 P_6(t) + \beta_{14} P_{10}(t), \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{10} P_5(t) + \beta_3 P_0(t) + \beta_9 P_3(t) - (\lambda_3 + \lambda_9 + \beta_{10}) P_4(t), \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{11} P_2(t) + \beta_4 P_0(t) + \beta_{10} P_4(t) - (\lambda_4 + \lambda_{10} + \beta_{11}) P_5(t), \\
\frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_8 P_3(t) + \beta_7 P_7(t) - (\lambda_7 + \beta_8) P_6(t), \\
\frac{dP_7(t)}{dt} &= \lambda_7 P_6(t) + \beta_6 P_8(t) - (\lambda_6 + \beta_7) P_7(t), \\
\frac{dP_8(t)}{dt} &= \lambda_6 P_7(t) + \beta_5 P_2(t) - (\lambda_5 + \beta_6) P_8(t), \\
\frac{dP_9(t)}{dt} &= \lambda_{13} P_2(t) - \beta_{13} P_9(t), \\
\frac{dP_{10}(t)}{dt} &= \lambda_{14} P_3(t) - \beta_{14} P_{10}(t)
\end{aligned} \tag{1}$$

с соответствующими начальными условиями: $P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_9(t) + P_{10}(t) = 1$ при $t = 0$, $P_0(t) = 1$, $P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_9(t) + P_{10}(t) = 0$.

На основе системы дифференциальных уравнений (1) синтезируем дифференциальную математическую модель для вычисления, в первую очередь, значений вероятностей $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$, $P_6(t)$, $P_7(t)$, $P_8(t)$, $P_9(t)$, $P_{10}(t)$, используя основы теории дифференциальных преобразований Пухова [8], фундаментальные понятия которой представлены парой математических зависимостей:

$$P_i(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k P_i(t)}{dt^k} \right]_{t=0} \quad \equiv \quad P_i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k P_i(k). \tag{2}$$

Здесь $P_i(t)$ — первоначальная функция аргумента t , которую можно n раз дифференцировать и которая имеет ряд соответствующих ограничений, включая свои производные; $P_i(k)$ — дифференциальное T -изображение первоначальной функции $P_i(t)$; H — масштабный коэффициент, размерность которого совпадает с размерностью аргумента t , как правило, выбирается из условия $0 \leq t \leq H$ на всем диапазоне функции-оригинала, $P_i(t)$, \equiv — символ соответствия между функцией-оригиналом $P_i(t)$ и его дифференциальным T -изображением $P_i(k)$. Благодаря прямому дифференциальному преобразованию, что находится слева от символа, формируется дифференцированное T -изображение функции-оригинала $P_i(t)$ в виде

дискретной функции $P_i(t)$ целочисленного аргумента ($k=0, 1, 2, \dots$). На основе совокупности значений T -дискрет функции целочисленного аргумента $P_i(k)$, $k=0, 1, 2, \dots$, используя обратное дифференциальное преобразование, что находится справа от символа $\bar{\quad}$, можно получить функцию-оригинал $P_i(t)$. Заметим, что при $k=0$ согласно (2) для любого мгновенного значения t каждого i -го параметра $P_i(t)$ выполняется соответствующее равенство $P_i(t) = P_i(k)$. Используя прямое дифференциальное преобразование $P_i(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k P_i(t)}{dt^k} \right]_{t=0}$, синтезируем

дифференциальную математическую модель, ориентированную на исследование параметров сетевой вычислительной архитектуры, что можно записать так:

$$P_0(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_0 P_1(k) + \beta_1 P_2(k) + \lambda_2 P_3(k) + \lambda_3 P_4(k) + \lambda_4 P_5(k) - \gamma_1 P_0(k)],$$

$$P_1(k+1) = \frac{H}{k+1} [\beta_0 P_0(k) - \lambda_0 P_1(k)],$$

$$P_2(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_1 P_0(k) + \lambda_5 P_8(k) - \gamma_2 P_2(k) + \beta_{11} P_5(k) + \beta_{13} P_9(k)],$$

$$P_3(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_9 P_4(k) - \gamma_3 P_3(k) + \beta_2 P_0(k) + \beta_8 P_6(k) + \beta_{14} P_{10}(k)],$$

$$P_4(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_{10} P_5(k) + \beta_3 P_0(k) + \beta_9 P_3(k) - \gamma_4 P_4(k)],$$

$$P_5(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_{11} P_2(k) + \beta_4 P_0(k) + \beta_{10} P_4(k) - \gamma_5 P_5(k)],$$

$$P_6(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_8 P_3(k) + \beta_7 P_7(k) - \gamma_6 P_6(k)],$$

$$P_7(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_7 P_6(k) + \beta_6 P_8(k) - \gamma_7 P_7(k)],$$

$$P_8(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_6 P_7(k) + \beta_5 P_2(k) - \gamma_8 P_8(k)],$$

$$P_9(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_{13} P_2(k) - \beta_{13} P_9(k)],$$

$$P_{10}(k+1) = \frac{H}{k+1} [\lambda_{14} P_3(k) - \beta_{14} P_{10}(k)],$$

где $\gamma_1 = (\beta_0 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \lambda_1)$; $\gamma_2 = (\beta_1 + \beta_5 + \lambda_{11} + \lambda_{13})$; $\gamma_3 = (\lambda_2 + \lambda_8 + \lambda_{14} + \beta_9)$; $\gamma_4 = (\lambda_3 + \lambda_9 + \beta_{10})$; $\gamma_5 = (\lambda_4 + \lambda_{10} + \beta_{11})$; $\gamma_6 = \lambda_7 + \beta_8$; $\gamma_7 = (\lambda_6 + \beta_7)$; $\gamma_8 = (\lambda_5 + \beta_6)$.

Начальные условия при $t=0$, $k=0$ представляем соответственно $P_0(t=0) = P_0(0) = 1$, $P_i(t=0) = P_i(0) = 0$.

Математическая модель (3) базовая для формирования в аналитическом виде значений вероятностей $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$, $P_6(t)$, $P_7(t)$, $P_8(t)$, $P_9(t)$, $P_{10}(t)$ состояния узлов компьютерной сети тяговой подстанции. Реали-

зуюем подстановку начальных условий $P_0(t=0) = P_0(0) = 1$, $P_i(t=0) = P_i(0) = 0$, $t=0$, $k=0$, $i=1, 2, \dots, 10$, в дифференциальную математическую модель (3) и при $k=0$ получим спектр дискрет: в виде $P_0(1) = -\gamma_1 H$; $P_1(1) = \beta_0 H$; $P_2(1) = \lambda_1 H$; $P_3(1) = \beta_2 H$; $P_4(1) = \beta_3 H$; $P_5(1) = \beta_4 H$; $P_6(1) = 0$; $P_7(1) = 0$; $P_8(1) = 0$; $P_9(1) = 0$; $P_{10}(1) = 0$. Далее, реализовав подстановку полученных значений T -дискрет $P_0(1) = -\gamma_1 H$, ... $P_{10}(1) = 0$ в модель (3), при $k=1$, получим следующую совокупность дискрет: $P_0(2) = \frac{H^2}{2}(\lambda_0 \beta_0 + \lambda_1 \beta_1 + \lambda_2 \beta_2 + \lambda_3 \beta_3 + \lambda_4 \beta_4 + \gamma_1^2)$,

$$P_1(2) = -\frac{H^2 \beta_0}{2}(\gamma_1 + \lambda_0), \quad P_2(2) = \frac{H^2}{2}[\beta_4 \beta_{11} - \lambda_1(\gamma_1 + \gamma_2)],$$

$$P_3(2) = \frac{H^2}{2}[\lambda_9 \beta_3 - \beta_2(\gamma_1 + \gamma_3)], \quad P_4(2) = \frac{H^2}{2}[\lambda_{10} \beta_4 - \beta_3(\gamma_1 + \gamma_4) + \beta_2 \beta_9],$$

$$P_5(2) = \frac{H^2}{2}[\lambda_1 \lambda_{11} - \beta_4(\gamma_1 + \gamma_5) + \beta_3 \beta_{10}], \quad P_6(2) = \frac{H^2}{2} \lambda_8 \beta_2, \quad P_7(2) = 0,$$

$$P_8(2) = \frac{H^2}{2} \lambda_1 \beta_5, \quad P_9(2) = \frac{H^2}{2} \lambda_1 \lambda_{13}, \quad P_{10}(2) = \frac{H^2}{2} \lambda_{14} \beta_2.$$

Подставив полученную совокупность дискрет $P_i(0)$, $P_i(1)$, $P_i(1)$, $i=1, 2, \dots, 10$, в обратное дифференциальное преобразование $P_i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k P_i(k)$ математической зависимости (2), получим значения вероятностей $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$, $P_6(t)$, $P_7(t)$, $P_8(t)$, $P_9(t)$, $P_{10}(t)$ в аналитическом виде:

$$P_0(t) = 1 - \gamma_1 t + (\lambda_0 \beta_0 + \lambda_1 \beta_1 + \lambda_2 \beta_2 + \lambda_3 \beta_3 + \lambda_4 \beta_4 + \gamma_1^2) \frac{t^2}{2},$$

$$P_1(t) = \beta_0 t - \beta_0(\gamma_1 + \lambda_0) \frac{t^2}{2}, \quad P_2(t) = \lambda_1 t + [\beta_4 \beta_{11} - \lambda_1(\gamma_1 + \gamma_2)] \frac{t^2}{2},$$

$$P_3(t) = \beta_2 t + [\lambda_9 \beta_3 - \beta_2(\gamma_1 + \gamma_3)] \frac{t^2}{2}, \quad P_4(t) = \beta_3 t + [\lambda_{10} \beta_4 - \beta_3(\gamma_1 + \gamma_4) + \beta_2 \beta_9] \frac{t^2}{2},$$

$$P_5(t) = \beta_4 t + [\lambda_1 \lambda_{11} - \beta_4(\gamma_1 + \gamma_6) + \beta_3 \beta_{10}] \frac{t^2}{2}, \quad P_6(t) = \lambda_8 \beta_2 \frac{t^2}{2},$$

$$P_7(t) = (\lambda_7 \lambda_8 \beta_2 + \beta_6 \lambda_1 \beta_5) \frac{t^3}{3!}, \quad P_8(t) = \lambda_1 \beta_5 \frac{t^2}{2}, \quad P_9(t) = \lambda_1 \lambda_{13} \frac{t^2}{2}, \quad P_{10}(t) = \lambda_{14} \beta_2 \frac{t^2}{2}.$$

В выражении (4), для формирования аналитической зависимости $P_7(t)$ используем дополнительно дискрету $P_7(3) = \frac{H^3}{3!}(\lambda_7 \lambda_8 \beta_2 + \beta_6 \beta_1 \beta_5)$, вычисленную при $k=2$.

С помощью полученной совокупности значений вероятностей $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$, $P_6(t)$, $P_7(t)$, $P_8(t)$, $P_9(t)$, $P_{10}(t)$ узлов графа (см. рис. 2), представленных в аналитическом виде согласно (4), сформируем математические модели определения набора показателей, характеризующих компьютерную сеть

управления электроснабжением на уровне тяговой подстанции. Будем считать, что с вероятностью $P_0(t)$ принят и соответственно обслужен поток заявок $\lambda_0(t)$, $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, $\lambda_3(t)$, $\lambda_4(t)$ центральным сервером $\varphi_0(t)$ компьютерной сети тяговой подстанции. Если одна или несколько заявок потока $\lambda_0(t)$, $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, $\lambda_3(t)$, $\lambda_4(t)$, поступающих на центральный сервер $\varphi_0(t)$, получают отказ, то вероятность отказа $Q_0(t)$ будет представлять собой дополнение $P_0(t)$ к единице т.е.

$$Q_0(t) = 1 - P_0(t) = -\gamma_1 t + (\lambda_0 \beta_0 + \lambda_1 \beta_1 + \lambda_3 \beta_2 + \lambda_4 \beta_3 + \lambda_4 \beta_4 + \gamma_1^2) \frac{t^2}{2}.$$

Пропускные возможности $G_0(t)$ центрального процессора $\varphi_0(t)$ запишем в виде аналитического выражения

$$G_0(t) = \lambda_m(t)(1 - Q_0(t)) = \lambda_m(t) \times \\ \times [1 + \gamma_1(t) - (\lambda_0 \beta_0 + \lambda_1 \beta_1 + \lambda_3 \beta_2 + \lambda_4 \beta_3 + \lambda_4 \beta_4 + \gamma_1^2)] \frac{t^2}{2}, \\ \lambda_m(t) = \max_i \{\lambda_i(t)\}, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4.$$

Среднее число заявок $R_0(t)$, которые обрабатываются в локальной компьютерной сети, представлено в следующем виде:

$$R_0(t) = \frac{G_0(t)}{\beta_m(t)} = \frac{\lambda_m(t)[1 + \gamma_1 t - (\lambda_0 \beta_0 + \lambda_1 \beta_1 + \lambda_3 \beta_2 + \lambda_4 \beta_3 + \lambda_4 \beta_4 + \gamma_1^2)] \frac{t^2}{2}}{\beta_m(t)}, \\ \beta_m(t) = \max_i \{\beta_i(t)\}, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4.$$

В процессе управления электроснабжением, включая процедуры обмена данными, очень важно определить возможности узла $\varphi_2(t)$, ориентированного на выполнение функций обмена информацией в рамках корпоративной компьютерной сети управления электроснабжением железной дороги. Вероятность обслуживания заявок $\lambda_1(t)$, $\lambda_5(t)$, $\lambda_{11}(t)$, $\lambda_{15}(t)$ в соответствии с (4) представим в аналитическом виде как $P_2(t) = \lambda_1 t + [\beta_4 \beta_{11} - \lambda_1(\gamma_1 + \gamma_2)] \frac{t^2}{2}$, а вероятность $Q_2(t)$ отказа обслуживания запишем

$$Q_2(t) = 1 - P_2(t) = 1 - \lambda_1 t + [\beta_4 \beta_{11} - \lambda_1(\gamma_1 + \gamma_2)] \frac{t^2}{2}.$$

Пропускную способность $G_2(t)$ и среднее число заявок $R_2(t)$ запишем

$$G_2(t) = \lambda_m(t)[1 - Q_2(t)] = \lambda_m(t)[\lambda_1 t + (\beta_4 \beta_{11} - \lambda_1(\gamma_1 + \gamma_2))] \frac{t^2}{2}, \\ \lambda_m(t) = \max_i \{\lambda_i(t)\}, \\ R_2(t) = \frac{G_2(t)}{\beta_m(t)} = \frac{\lambda_m(t)[\lambda_1(t) + (\beta_4 \beta_{11} - \lambda_1(\gamma_1 + \gamma_2))] \frac{t^2}{2}}{\beta_m(t)}, \\ \beta_m(t) = \max_i \{\beta_i(t)\}, \quad i = 1, 5, 11, 15.$$

Аналогично можно определить набор характеристик для каждого из узлов $\varphi_1(t)$, $\varphi_3(t)$, $\varphi_4(t)$, $\varphi_5(t)$, $\varphi_6(t)$, $\varphi_7(t)$, $\varphi_8(t)$, $\varphi_9(t)$, $\varphi_{10}(t)$ локальной компьютерной сети управления электроснабжением, а также для сети в целом.

Заключение

Результаты анализа функционирования электросетей железнодорожного транспорта показали, что решение комплексной проблемы оптимизации электропотребления, формирования современных энергосберегающих технологий и улучшение безопасности движения при минимальных инвестиционных составляющих возможно за счет интеллектуализации быстропротекающих технологических процессов электроснабжения. Для научного поиска необходимо создавать математические модели и компьютерно-ориентированные методы управления электроснабжением и на их основе современные сетевые и энергосберегающие технологии. Такой подход требует комплексных дополнительных исследований в области моделирования, синтеза современных компьютерных архитектур управления электроснабжением и математических моделей и критериев их оценки.

С помощью современных концептуальных подходов организации интеллектуальных систем электроснабжения на тягу и новых принципов организации вычислительных архитектур разработана компьютерная сеть управления электроснабжением на уровне тяговых подстанций железных дорог, которая адекватно отображает ее топологию и граф вычислительной сети для синтеза математических моделей и методов исследования характеристик, а также глубины взаимной интеграции, электросетевой инфраструктуры и компьютерной архитектуры тяговой подстанции.

На основе теории дифференциальных преобразований предложена математическая модель компьютерной архитектуры управления электроснабжением на уровне тяговых подстанций и методы определения в аналитическом виде, совокупности значений вероятностей состояний узлов графа компьютерной сети. На их базе приведен ряд критериев определения показателей возможности компьютерной сети управления таких как пропускная способность узлов, среднее число заявок, обрабатываемых в сети, количество отказов заявок на обслуживание и др.

О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗАЛІЗНИЦЬ

Аналіз еволюції електромереж залізниць показав, що розв'язання комплексної проблеми оптимізації електропостачання і покращення безпеки руху можливо шляхом інтелектуалізації процесів електропостачання. Запропоновано обчислювальну мережу керування електропостачання на рівні тягових підстанцій, яка адекватно відображає її топологію і граф мережі. На основі диференціальних перетворень розроблено математичну модель комп'ютерної архітектури керування електропостачанням тягових підстанцій, а також методи визначення в аналітичному вигляді сукупності значень ймовірностей станів вузлів графа комп'ютерної мережі і критерії обчислення таких показників: пропускна можливість вузлів, середнє число заявок, що обробляються, та кількість відмов заявок на обслуговування.

**MATHEMATICAL MODELS AND METHODS
OF THE ANALYSIS OF COMPUTER
NETWORKS CONTROL OF POWER SUPPLY
OF RAILWAYS TRACTION SUBSTATIONS**

The analysis of the evolution of power supply networks of railways showed that the solution of complex optimization problems of power consumption and improvement of railway traffic safety is possible due to intellectualization of electric power supply processes. The computer network of power supply control at the level of traction substations, which adequately displays its topology and the graph of network are offered. On the basis of differential transformations a mathematical model of computer architecture control of traction substations power supply is developed as well as the methods of determining in analytical form the set of probability values of the state of the graph nodes of computer network and criteria for calculating such indicators: throughput of the nodes, the average number of applications that are processed, and the number of failures of service calls.

1. *Стасюк А.И., Гончарова Л.Л., Максимчук В.Ф.* Методы организации интеллектуальных электрических сетей железных дорог на основе концепции SMART Grid // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. — 2014. — № 2. — С. 29–37.
2. *Стасюк А.И., Гончарова Л.Л.* Математические модели и методы организации интеллектуальных сетей поставки электроэнергии на тягу железнодорожного транспорта // Там же. — 2015. — № 3. — С. 25–31.
3. *Стасюк А.И., Гончарова Л.Л.* Математические модели компьютерной интеллектуализации технологий синхронных векторных измерений параметров электрических сетей // Кибернетика и системный анализ. — 2016. — № 3. — С. 43–49.
4. *Буткевич А.Ф., Левконюк А.В., Стасюк А.И.* Повышение надежности мониторинга допустимости загрузки контролируемых сечений энергосистем // Техническая электродинамика. — 2014. — № 2. — С. 56–67.
5. *Carter A. M, et. al.* The application of wide area monitoring to the GB transmission system to facilitate large-scale integration of renewable generation, Cigre C2-112, Paris 2010.
6. *Arango O. J. et. al.* Low frequency oscillations in the colombian power system — Identification and Remedial Actions, Cigre C2-105, Paris 2010.
7. *Венцель Е.С.* Исследование операций. — М. : Сов. радио, 1972. — 551 с.
8. *Пухов Г.Е.* Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике. — Киев : Наук. думка, 1978. — 259 с.

Получено 06.06.2016