

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 621.311

А.И. Стасюк, Л.Л. Гончарова

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПЬЮТЕРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

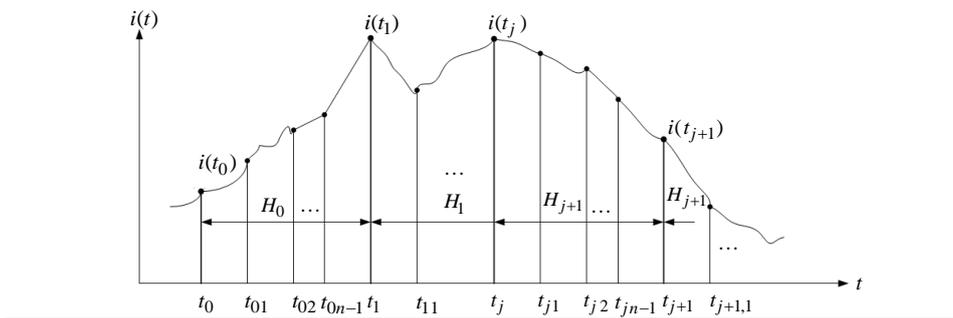
Введение

Ключевое направление инновационного преобразования систем электроснабжения железных дорог — развитие технологий интеллектуализации процедур управления быстропротекающими технологическими процессами электропотребления [1–3]. Концепция интеллектуальной энергетики базируются на современной технологии распределенных векторных измерениях Wide Area Measurement System (WAMS), в которой благодаря использованию функционально ориентированных микропроцессорных устройств Measurement Unit и широкому применению систем спутниковой навигации GPS открылись огромные возможности проведения синхронных измерений параметров режимов в различных точках и сегментах распределенной энергосистемы [1, 4]. Современные системы непрерывного компьютерного мониторинга параметров, отображающие штатные, аномальные и переходные режимы, позволяют реализовать прямое наблюдение динамических характеристик энергосистемы. Непосредственное измерение частоты, амплитуд, фаз напряжений и токов, а также других параметров в различных точках сети с жесткой привязкой к астрономическому времени и точностью в несколько сотен наносекунд позволяет определять в реальном времени коэффициент низкочастотных колебаний энергосистемы и уровень риска неустойчивости. Полученные таким образом первичные данные используются для исследования процессов, протекающих в энергосистеме, определения ее свойств и динамических характеристик на качественно новом уровне, а также для формирования новых знаний в сфере железнодорожной энергетики [2, 5, 6]. Применение более совершенных интеллектуальных средств компьютерного анализа и визуального представления обработанной и первичной информации открывает возможность выявления источников низкочастотных колебаний, их типов, особенностей, форм, мест возникновения и характеристик аномальных режимов, а также границ текущей устойчивости [5–8]. Открывается возможность решить проблему регистрации сложных видов возмущений и благодаря этому проводить декомпозицию энергосистемы на несинхронно работающие части, а также демпфирование низкочастотных колебаний, раскачивающих систему и уменьшающих перетоки мощности. Технология современных синхронных векторных измерений способствовала появлению концепции «интеллектуальной энергетики» как основы инновационного преобразования тяговых электросетей и создания интеллектуальных систем электроснабжения нового поколения, ориентированных на

формирование и накопление новых знаний в области железнодорожной энергетики для создания современных энергосберегающих технологий, оптимизации электроснабжения и улучшения качества функционирования [3, 4, 9]. Это подтверждается, в первую очередь, тем, что синхронные измерения всей совокупности параметров энергосистемы, зарегистрированные в процессе проведения скользящего компьютерного мониторинга, открыли возможность существенно улучшить информативность первичных данных, отображающих аномальные или переходные режимы. Анализ научных исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными, показал, что в научных публикациях недостаточно внимания уделено созданию математических моделей и методов определения степени глубины информативности, зарегистрированной на основе синхронных векторных измерений, многоаспектной первичной информации для проведения исследований динамики аномальных и переходных процессов энергосистем и накопления новых знаний [3, 4, 6]. Цель публикации — содействовать разработке математических моделей и методов компьютерного исследования динамики аномальных и переходных режимов сетей электроснабжения для определения информативности первичных данных как основы организации интеллектуальных электросетей, накопления новых знаний и создания энергосберегающих технологий.

Дифференциальные математические модели

Решение проблемы оптимизации быстропротекающих процессов электроснабжения на тягу жестко связано с необходимостью решения комплекса задач для формирования новых знаний о физической природе процессов, протекающих в энергосистемах или сложных энергетических объектах, которые во многих случаях невозможно определить существующими методами. Создание принципиально новых критериев оптимизации процессов электроснабжения и современных энергосберегающих технологий возможно при исчерпывающей информативности первичной информации, полученной в результате синхронной регистрации переходных, аварийных и динамических режимов, протекающих в системах электроснабжения. Формирование новых знаний в процессе исследования динамики аномальных и переходных режимов представляется возможным благодаря созданию новых математических моделей повышенной информационной сложности и размерности как теоретической основы организации интеллектуальных сетей электроснабжения. С этой целью рассмотрим приведенную на рисунке динамику функционирования энергосистемы на примере исследования особенностей аварийного режима напряжения или тока, потребляемого на тягу.



На каждом интервале H_j ($j = 0, 1, 2, \dots, m$) исследуемого аномального или аварийного режима зарегистрированные в виде совокупности мгновенных значений $i(t_j)$, $i(t_{j1})$, $i(t_{j2})$, $i(t_{jn-1})$ токов первичные данные формируются в виде единого информационного пространства и используются для создания математи-

ческих моделей определения исчерпывающей информативности. Для синтеза математических моделей применим основные положения теории дифференциальных преобразований [7], фундаментальные положения которой представлены соответствующей парой математических зависимостей:

$$I_j(k) = \frac{H_j^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right] t_j \quad \overline{\equiv} \quad i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H_j} \right)^k I_j(k). \quad (1)$$

Здесь $i(t)$ — первичная функция аргумента t , которую можно f раз дифференцировать и которая имеет ряд ограничений, включая свои производные; $I_j(k)$ — дифференциальное T -изображение первичной функции $i(t)$; H_j — масштабный коэффициент, размерность которого совпадает с размерностью аргумента t и выбирается, как правило, из условий $0 \leq t \leq H_j$ на всем диапазоне функции-оригинала $i(t)$; $\overline{\equiv}$ — символ соответствия между функцией-оригиналом $i(t)$ и его дифференциальным T -изображением $I_j(k)$. Благодаря прямому дифференциальному преобразованию $I_j(k) = \frac{H_j^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right] t_j$ формируется дифференциальное T -изображение функции-оригинала $i(t)$ в виде дискретной функции $I_j(k)$ целочисленного аргумента $k = 0, 1, 2, \dots$. На основе набора T -дискрет функции целочисленного аргумента $I_j(k)$, применив обратное дифференциальное преобразование $i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H_j} \right)^k I_j(k)$, получим функцию-оригинал $i(t)$. Отметим, что при $k = 0$ согласно (1) для любого t_j ($j = 0, 1, 2, \dots, m$) выполняются равенства

$$I_0(0) = i(t_0), \quad I_1(0) = i(t_1), \quad I_2(0) = i(t_2), \quad I_j(0) = i(t_j), \quad I_m(0) = i(t_m). \quad (2)$$

Для удобства анализа согласно рисунку введем обозначение $t'_{jl} = t_{jl} - t_j$. Тогда обратное дифференциальное преобразование $i(t_j) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t'_{jl}}{H_j} \right)^k I_j(k)$, $j = 0, 1, 2, \dots, m$,

$l = 1, 2, \dots, n$, для каждой j -й точки аномального режима, представленного на рисунке, может быть изображено в развернутом виде [2, 3, 7]:

$$\begin{aligned} \frac{t'_{j1}}{H_j} I_j(1) + \left(\frac{t'_{j1}}{H_j} \right)^2 I_j(2) + \dots + \left(\frac{t'_{j1}}{H_j} \right)^n I_j(n) &= i(t_{j1}) - I_j(0), \\ \frac{t'_{j2}}{H_j} I_j(1) + \left(\frac{t'_{j2}}{H_j} \right)^2 I_j(2) + \dots + \left(\frac{t'_{j2}}{H_j} \right)^n I_j(n) &= i(t_{j2}) - I_j(0), \\ \frac{t'_{jn-1}}{H_j} I_j(1) + \left(\frac{t'_{jn-1}}{H_j} \right)^2 I_j(2) + \dots + \left(\frac{t'_{jn-1}}{H_j} \right)^n I_j(n) &= i(t_{jn-1}) - I_j(0), \\ I_j(1) + I_j(2) + \dots + I_j(n) &= i(t_{jn}) - I_j(0). \end{aligned} \quad (3)$$

Полученную систему уравнений (3) запишем в векторно-матричной форме:

$$A_j I^j(k) = F(t_j), \quad (4)$$

где $I^j(k) = I_j(1), I_j(2), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)^t$, — вектор неизвестных, компоненты которого принимают значения $I_j(k)$ в соответствующих точках t_0, t_1, t_2, \dots , каждого j интервала; $F(t_j) = i(t_{j1}) - I_j(0), i(t_{j2}) - I_j(0), \dots, i(t_{jn}) - I_j(0)^t$, — век-

тор известных правых частей;
$$A_j = \begin{matrix} \frac{t'_{j1}}{H_j} \left(\frac{t'_{j1}}{H_j} \right)^2 \dots \left(\frac{t'_{j1}}{H_j} \right)^n \\ \frac{t'_{j2}}{H_j} \left(\frac{t'_{j2}}{H_j} \right)^2 \dots \left(\frac{t'_{j2}}{H_j} \right)^n \\ \dots \dots \dots \dots \\ 1 \quad 1 \quad \dots \quad 1 \end{matrix} \quad \text{— матрица коэф-}$$

фициентов, формируемых известным образом.

Реализовав решение системы уравнений $A_j I^j(k) = F(t_j)$ для каждой j точки, т.е. t_0, t_1, t_2, \dots стохастического аварийного процесса, приведенного на рисунке, получим дифференциальное изображение функции $i(t)$ в этих же точках t_0, t_1, t_2, \dots , в следующем виде:

$$\begin{aligned} i(t_0) &\equiv I_0(0), I_0(1), \dots, I_0(k), \dots, I_0(n)^t, \\ i(t_1) &\equiv I_1(0), I_1(1), \dots, I_1(k), \dots, I_1(n)^t, \\ i(t_j) &\equiv I_j(0), I_j(1), \dots, 0, \dots, I_j(n)^t, \\ i(t_m) &\equiv I_m(0), I_m(1), \dots, I_m(k), \dots, I_m(n)^t. \end{aligned} \quad (5)$$

Из анализа выражения (5) следует, что аварийный режим $i(1)$ (см. рисунок) в каждой точке $t_j (j = 0, 1, 2, \dots, m)$ представляется не только его мгновенным значением $i(t_j) = I_j(0)$, а также набором T -дискрет $I_j(1), I_j(2), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$, каждая k из которых эквивалентна k производной $i(t)$ в точке j . Вычисленные таким образом дискреты $I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$ с помощью решения в каждой j точке аварийного процесса уравнений $A_j I^j(k) = F(t_j)$ — основа организации новых методов и подходов определения совокупности характеристик аномального режима при одновременной обработке, как мгновенных значений $i(t_j) = I_j(0)$ аварийного режима, так и его T -дискрет $I_j(1), I_j(2), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$.

Такой подход организации вычислительных процессов, анализа аномальных режимов открывает дополнительные возможности получения всей глубины информативности зарегистрированной многоаспектной первичной информации и на ее базе способствует формированию и накапливанию новых знаний в сфере железнодорожной энергетики, организации совместной обработки мгновенных значений $i(t_j) = I_j(0)$ и дискрет $I_j(1), I_j(2), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$, открывается также возможность организации контроля вычислительного процесса в каждой точке t_0, t_1, t_2, \dots с заданной точностью ε . Действительно, при условии, что $H_j = H$

($j = 0, 1, 2, \dots, m$) и $t'_{jn} = H_j = H$, реализовав подстановку значения $t'_{jn} = -H$ в обратные дифференциальные преобразования $i(t_j) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t'_{jl}}{H_j} \right)^k I_j(k)$, получим

выражение

$$\left| i(t_{j-1}) - (-1)^k I_j(k) \right| \leq \varepsilon. \quad (6)$$

Оно открывает дополнительную возможность контролировать вычислительный процесс в сфере дифференциальных изображений с точностью до ε . Реализовав процедуру приписывания T -спектров, отображающих аварийный процесс в каждой j точке (см. рисунок), можно записать

$$i(t) = \sum_{j=0}^{j=m} \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t'_{jl}}{H_j} \right)^k I_j(k). \quad (7)$$

Исследование аномальных режимов

Исследования аномальных и аварийных режимов, протекающих в системах электроснабжения железных дорог, показали, что большое влияние на надежность работы компьютерных систем управления электроснабжением и железнодорожной автоматики оказывают помехи, вызванные отдельными гармоническими составляющими аварийного процесса. В этой связи воспользуемся результатами представления первичной информации в области дифференциальных изображений в виде $I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$ и реализуем вычисление отдельных гармонических составляющих аварийного режима в каждой j точке аварийного процесса.

Прямое преобразование Фурье на конечном промежутке $(0, T)$ представляется как

$$\dot{I}_\gamma = \frac{j^2 T}{T} \int_0^T e^{-j\gamma\omega t} i(t) dt, \quad (8)$$

где \dot{I}_γ — комплексная амплитуда γ гармоники тока; $\omega = 2\pi/T$ — частоты основной гармоники; $j^2 = -1$.

Воспользуемся согласно (1) обратным дифференциальным преобразованием

$i(t_j) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H_j} \right)^k I_j(k)$ и запишем

$$\dot{I}_\gamma = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{I_j(k)}{H_j^k} \left(\frac{j^2 T}{T} \int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt \right). \quad (9)$$

Значение интеграла в выражении (9) может быть представлено следующей зависимостью [10]:

$$\int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt = \frac{k!(-1)^k}{(-j\gamma\omega)^{k+1}} \left(1 - \sum_{m=0}^{m=k} \frac{(-j\gamma\omega T)^m}{m!} \right). \quad (10)$$

Реализовав подстановку выражения (10) в (9) и выполнив соответствующие преобразования, получим математическую модель определения необходимого набора комплексных амплитуд \dot{I}_γ γ гармоник

$$\dot{I}_\gamma = \frac{1}{\pi\gamma} \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{k!}{(j\gamma\omega H_j)^k} \left[\sum_{m=0}^{m=k} \left(\frac{T}{H_j} \right)^m \frac{(-j\gamma\omega T)^m}{m!} - 1 \right] I_l(k). \quad (11)$$

Математическая модель (11) основополагающая в процессе исследования аномальных режимов, поскольку благодаря ее применению открывается возможность использовать исчерпывающую информативность первичных данных, представленных в T -области выражением (5), для формирования новых знаний о нештатных режимах систем электроснабжения железных дорог.

В тех случаях, когда в процессе исследования спектральных характеристик аномальных режимов энергосистем необходимо применить преобразование Фурье с бесконечными пределами и ограничениями $i(t) = 0$ при $t < 0$, что может быть записано в виде [9, 10]

$$I(j\omega) = \int_0^{\infty} e^{-j\omega t} i(t) dt, \quad i(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} e^{j\omega t} I(j\omega) d\omega, \quad (12)$$

реализовав соответствующие математические преобразования аналогично вышеописанному, синтезируем математическую модель определения спектральной плотности путем обработки первичной информации $I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$, представленной в T -области выражением (5):

$$I(j\omega) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{k!}{(j\omega H_l)^k} \frac{I_l(k)}{j\omega}, \quad I_j(k) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \frac{(j\omega H_l)^k}{k!} I(j\omega) d\omega. \quad (13)$$

Математическое выражение (13) позволяет вычислять значение спектральной плотности аварийного режима, используя для этого первичную информацию $I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$, которая отображает в T -области аномальные процессы, протекающие в энергосистеме, для глубокого исследования и формирования новых знаний.

Рассмотрим вопросы применения первичной информации $I_j(0), I_j(1), \dots, \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$, представленной в T -области выражением (5), для проведения корреляционного анализа аномальных процессов. Вычисление взаимной корреляционной функции $R(i_s(t_l) i_f(t_{l+r}))$ двух переменных $i_s(t_l), i_f(t_{l+r})$ можно записать в виде

$$R(i_s(t_\xi) i_f(t_{3+r})) = \frac{1}{N} \sum_{e=1}^N i_s(t_\xi) i_f(t_{\xi+r}), \quad (14)$$

$$s = 1, 2, \dots, n, \quad f = 1, 2, \dots, N, \quad \xi = 1, 2, \dots, P, \quad r = 1, 2, \dots, m.$$

Воспользовавшись дифференциальными преобразованиями (1), запишем выражение (14) в области изображений как

$$R_{Sf}(k) = \frac{1}{N} \sum_{\xi=1}^N \sum_{e=0}^{e=k} I_S^\xi(l) I_f^{\xi+r}(k-l) \quad (15)$$

и, применив дифференциальное представление первичной информации $I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$, организуем вычислительный процесс согласно (15) следующим образом. При $k = 0$

$$R_{Sf}(0) = \frac{1}{N} \sum_{\xi=1}^N I_S^\xi(0) I_f^{\xi+r}(0).$$

Соответственно при $k = 1$ получим дискрету $R_{Sf}(1)$:

$$R_{Sf}(1) = \frac{1}{N} \sum_{3=1}^N (I_S^3(0) I_f^{3+r}(1) + I_S^3(1) I_f^{3+r}(0)).$$

Аналогично при $k = 2$ получим $R_{Sf}(2)$

$$R_{Sf}(2) = \frac{1}{N} \sum_{\xi=1}^N (I_S^\xi(0)I_f^{\xi+r}(2) + I_S^\xi(1)I_f^{\xi+r}(1) + I_S^\xi(2)I_f^{\xi+r}(0)).$$

Вычислив соответствующее количество дискрет $R_{Sf}(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и применив обратное дифференциальное преобразование (1), запишем $R(i_s(t_\xi)i_f(t_{\xi+r}))$ в следующем виде:

$$R(i_s(t_\xi)i_f(t_{\xi+r})) = R_{Sf}(0) + R_{Sf}(1)\frac{t}{H} + R_{Sf}(2)\frac{t^2}{H^2} + \dots$$

Применяя известные положения теории дифференциальных преобразований, для представления зарегистрированной первичной информации в области изображений в каждой j точке, в виде набора дискрет $I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k), \dots, I_j(n)$ исследуемого аварийного процесса, можно существенно расширить современные технологии синхронных векторных измерений с точки зрения определения исчерпывающей информативности полученных первичных данных. Кроме того, на основе представления первичной информации в области изображений, как показано в выражении (5), открывается возможность формировать новые компьютерно-ориентированные методы анализа режимов функционирования энергосистем, направленные на формирование и накопление новых знаний в этой области.

Заключение

Исследования проблемы инновационного преобразования систем электроснабжения на тягу показали, что ключевым направлением в сфере увеличения эффективности их функционирования является разработка математических моделей и методов компьютерного исследования исчерпывающей динамики аномальных и переходных режимов сетей электроснабжения и развитие новых технологий интеллектуализации процедур управления быстропротекающими технологическими процессами электроснабжения.

На основе фундаментальных положений теории дифференциальных преобразований предложены математические модели определения исчерпывающей информативности зарегистрированной многоаспектной первичной информации как основы формирования новых знаний о физической природе процессов, протекающих в энергосистемах, при исследовании динамики аномальных и переходных режимов. Рассмотрены вопросы создания принципиально новых критериев оптимизации процедур электроснабжения и организации энергосберегающих технологий.

Предложен набор дифференциальных математических моделей и компьютерно-ориентированных методов исследования аномальных и аварийных режимов систем электроснабжения. Изложены методы, открывающие возможность определять в области дифференциальных изображений гармонические составляющие динамических процессов, проводить спектральный и корреляционный анализ аномальных и аварийных режимов энергосистем, накапливать новые знания об особенностях режимов функционирования энергосистем.

О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова

ДИФЕРЕНЦІЙНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ АНОМАЛЬНИХ І ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

Показано, що ключовим напрямком в сфері збільшення ефективності функціонування мереж електропостачання є розробка методів комп'ютерного дослід-

ження вичерпної динаміки аномальних і перехідних режимів. Запропоновано диференційні математичні моделі дослідження аномальних та аварійних режимів систем електропостачання. Розглянуто методи, що дозволяють проводити в сфері диференційних зображень спектральний аналіз аномальних і аварійних режимів енергосистем. Наведено способи аналізу окремих гармонічних складових динамічних процесів, обчислення спектральної щільності та кореляційних функцій.

A.I. Stasiuk, L.L. Goncharova

DIFFERENTIAL MATHEMATICAL MODELS OF COMPUTER RESEARCH OF THE ABNORMAL AND TRANSIENT MODES OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF RAILWAYS

It is shown that a key direction in the field of increasing the efficiency of electricity networks is development of methods for computer investigation of dynamics of transients and abnormal modes of power systems. Applied theory of differential transformations to create the mathematical models determining the total information content of multidimensional initial information as the basis of formation of new knowledge. The proposed differential mathematical model studies the abnormal and emergency modes of power systems. The discussed methods allow, in the field of differential images to perform the spectral analysis of the abnormal and emergency modes of power systems. The methods of forming from the image area separate harmonic components of dynamic processes, allow to compute the spectral density and to realize a correlation analysis.

1. *Стасюк О.І., Гончарова Л.Л., Максимчук В. Ф.* Методи організації інтелектуальних електричних мереж залізниць на основі концепції SMART Grid // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2014. — № 2. — С. 29–37.
2. *Stasuk O.I. and Goncharova L.L.* Differential mathematical models to investigate the computer network architecture of an all-mode system of control over a distance of railways // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2017. — **53**, N 1. — P. 157–164.
3. *Stasuk O.I. and Goncharova L.L.*, Mathematical models of computer intellectualization of technologies for synchronous phasor measurements of parameters of electric networks // *Ibid.* — 2016. — **52**, N 5. — P. 825–830.
4. *Стасюк О.І., Гончарова Л.Л.* Математична модель кібербезпеки мереж керування електропостачанням тягових підстанцій // *Кибернетика и системный анализ*. — 2017. — **53**, № 3. — С. 170–179.
5. *Стасюк А.И., Гончарова Л.Л.* Математические модели и методы анализа компьютерных сетей управления электроснабжением тяговых подстанций железных дорог // *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. — 2017. — № 1. — С. 34–43.
6. *Буткевич О.Ф., Левконюк А.В., Стасюк О.І.* Підвищення надійності моніторингу допустимості завантажень контрольованих перетинів енергосистем // *Технічна електродинаміка*. — 2014. — № 2. — С. 56–67.
7. *Пухов Г.Е.* Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике. — Київ : Наук. думка, 1978. — 259 с.
8. *Orpanasenko V.N., Kryvyi S.L.* Partitioning the full range of boolean functions based on the threshold and threshold relation // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2012. — **48**, N 3. — P. 459–468.
9. *Orpanasenko V.N., Kryvyi S.L.* Synthesis of Adaptive Logical Networks on the Basis of Zhegalkin Polynomials // *Ibid.* — 2015. — **51**, N 6. — P. 969–977.
10. *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)DC, USA* Apr 23, 2017 — Apr 26, 2017. — <http://www.scgsc.net/1>.
11. *European Technology Platform- Smart Grids*. April 2011: Strategic Depoliment document for European Commission, 2014. — Mode of access: <http://www.smartgrids.eu/>.

Получено 14.06.2017