

УДК 62-932

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ НАГРУЗКИ ПРОВОДНИКА
ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА**

***Д.Ж. Байбагысова¹, А.К. Кадиева¹, Ч.А. Кадыров², З.А. Узагалиев³
*baibagysova_d@iuca.kg**

¹Филиал имени академика Х.А. Рахматулина в городе Токмок Кыргызского
государственного технического университета имени И. Раззакова
г. Токмок, Кыргызская республика

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
г. Бишкек, Кыргызская республика

³Открытое акционерное общество «Северэлектро»
г. Бишкек, Кыргызская республика

***Резюме:** В данной работе предлагается автоматизированный лабораторный стенд для оценки расчетного тока и исследования адекватности рассматриваемой математической модели перегрева провода относительно температуры окружающей среды. Рассматривается разработанная структурная схема модели, описывающая перегрев проводника относительно температуры окружающей среды. Модель состоит из шести блоков, в которых в процессе моделирования реализуются операции: имитация тока нагрузки, изменяющегося по стохастическому закону; интегрирование соответствующих дифференциальных уравнений; определение расчетных токов и вывод результатов моделирования. При разработке компьютерной модели нагрева проводника была принята схема тепловых процессов в проводнике, описанная в научных публикациях. Моделирование производилось в среде Simulink.*

***Ключевые слова:** автоматизированный лабораторный стенд, расчетная нагрузка, моделирование, нагрев проводника, стохастический характер изменения тока, Simulink.*

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-72-81

**COMPUTER SIMULATION OF THE HEATING PROCESS AND THE
DETERMINATION OF THE CALCULATED LOAD OF THE CONDUCTOR UNDER
STOCHASTIC CHARACTER OF CURRENT CHANGE**

D.J. Baibagysova¹, A.K. Kadieva¹, Ch.A. Kadyrov², Z.A. Uzagaliev³

¹The branch named after academician H. A. Rakhmatulina in Tokmok of the Kyrgyz state
technical University named after I. Razzakov,
Tokmok, Kyrgyz Republic

²The Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov,
Bishkek, Kyrgyz Republic

³Open joint-stock company "Severelektro", Bishkek, Kyrgyz Republic

***Abstract:** In this article we propose an automated laboratory bench for the evaluation of the current and the study of the adequacy of this mathematical model overheating of the wire relative to the environment. Is developed the structural diagram of model describing the overheating of the conductor relative to the environment. The model consists of six blocks in which modeling operations are implemented: the simulation of the load current, is given by the stochastic law; the*

integration of the corresponding differential equations; the definition of the calculated currents and the output of simulation results. In developing a computer model of heating of the conductor adopted a scheme of thermal processes in the conductor, described in scientific publications. The simulation was performed in Simulink.

Keywords: *automated laboratory bench, the calculated load, the simulation, heating conductor, the stochastic character of current change, Simulink.*

Введение

Эффективное исследование случайных процессов изменения различных физических величин в электроэнергетических системах и системах электроснабжения возможно с применением методов теории моделирования [1]. Такой подход при решении одних задач позволяет существенно снизить трудозатраты и время получения нужных результатов, а при решении других задач оказывается единственным. Актуальным в этой области является решение проблемы расчета электрических нагрузок (РЭН) с привлечением физических моделей электроприемников (ЭП), которые бы управлялись компьютером в реальном масштабе времени (а также ускоренно) в соответствии с моделированными графиками нагрузок. При этом возможен анализ температуры нагрева изоляции токопроводящих элементов сети для определения расчетной нагрузки.

Важность более точного определения расчетной нагрузки объясняется тем, что занижение расчетных нагрузок приводит к перегревам элементов систем электроснабжения и ускоренному их износу, завышение расчетных нагрузок – к излишним капиталовложениям и затратам на системы электроснабжения. Из сказанного ясна необходимость разработки и внедрения в практику проектирования систем электроснабжения научно обоснованных инструментариев для исследования адекватности различных методов оценки электрических нагрузок при стохастическом характере изменения тока нагрузки.

Методы

Ввиду многообразия электрических нагрузок существует большое число различных методов РЭН (эмпирические, аналитические) [2–4], применяемых в тех или иных случаях. Но сказать о том, что задача РЭН решена, нельзя, так как большинство существующих методов расчёта не могут дать требуемой точности [3].

Основой аналитических методов РЭН являются математические модели электрических нагрузок [5–7] и тепловые модели проводников [8–10].

Известно, что расчетная нагрузка реализуется в период наиболее загруженной смены. При этом, исключая начало и конец смены, а также обеденный перерыв, получают установившийся однородный процесс, который можно классифицировать как стационарный эргодический. Однако процесс изменения нагрузки во времени математически наиболее полно отражается в понятии нестационарного случайного процесса. Нагрузка в каждый момент времени является случайной величиной, закон распределения которой может изменяться со временем.

В данной работе предлагается автоматизированный лабораторный стенд [11] для оценки расчетного тока и исследования адекватности рассматриваемой математической модели перегрева провода относительно температуры окружающей среды. Кроме этого, рассмотрено моделирование процесса нагрева проводника в среде *Simulink* и оценка расчетной нагрузки при стохастическом характере изменения тока.

При разработке компьютерной модели нагрева проводника со стохастическим характером изменения протекающего по нему тока, была принята схема тепловых процессов в проводнике, изложенная в работе [12], согласно которой подобная схема допустима для проводников заводских сетей.

Условие теплового баланса для трехжильного кабеля, открыто проложенного внутри помещения, при токе нагрузки $I(t)$ в амперах имеет вид [12]:

$$3I^2 R_0(1 + \alpha)dt = Cd\vartheta + A\vartheta dt, \quad (1)$$

где R_0 – активное сопротивление жилы проводника при температуре 20°C , Ом; α – температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; C – теплоемкость проводника или кабеля, Дж/ $^\circ\text{C}$; A – коэффициент теплоотдачи, учитывающий суммарную отдачу тепла в окружающую среду за счет теплопроводности, конвекции и лучеиспускания, Вт/ $^\circ\text{C}$.

Из формулы (1) следует уравнение, описывающее перегрев проводника относительно температуры окружающей среды:

$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \left(1 - 3I^2 \frac{\alpha R_0}{A}\right) \vartheta = 3I^2(t) \frac{R_0}{A}. \quad (2)$$

Согласно [12], рост значения коэффициента теплоотдачи практически компенсирует одновременное возрастание сопротивления $R = R_0(1 + \alpha\vartheta)$; поэтому в этой работе рассмотрено два предельных допущения:

1) $\alpha = 0.0039$; $A \approx \text{const} = A_1$;

2) $\alpha \approx 0$; $A \approx \text{const} = A_0$.

Тогда уравнение (2) примет, соответственно, следующий вид:

$$\frac{C}{A_1} \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + \left(1 - 3I^2(t) \frac{\alpha R_0}{A_1}\right) \vartheta_1 = 3I^2(t) \frac{R_0}{A_1}; \quad (3,a)$$

$$\frac{C}{A_0} \cdot \frac{d\vartheta_0}{dt} + \vartheta_0 = 3I^2(t) \frac{R_0}{A_0}. \quad (3,b)$$

Интегралы $\vartheta_1(t)$ и $\vartheta_0(t)$ являются приближениями к действительному перегреву $\vartheta(t)$. При этом $\vartheta_1(t)$ будет давать несколько повышенные значения наибольшего перегрева ϑ_M [12].

Положив в уравнениях (3) $I = \text{const} = I_N \sum$; $\vartheta = \text{const} = \vartheta_N$, найдено значение

постоянных $A_1 = \frac{3I_N^2}{J_N} R_0(1 + \alpha\vartheta_N)$; $A_0 = \frac{3I_N^2}{\vartheta_N} R_0$; подставив их в уравнения (3), получено [12]:

$$\lambda_1 T_0 \frac{d\vartheta_1}{dt} + \vartheta_1 = \lambda_1 \vartheta_N \left(\frac{I(t)}{I_N}\right)^2; \quad (4,a)$$

$$T_0 \frac{d\vartheta_0}{dt} + \vartheta_0 = \vartheta_N \left(\frac{I(t)}{I_N}\right)^2, \quad (4,b)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1}{1 + \alpha \vartheta_N \left[1 - \left(\frac{I(t)}{I_N} \right)^2 \right]} \\ T_0 &= \frac{C}{A_0} = \frac{C \vartheta_N}{3 I_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

T_0 – постоянная времени нагрева проводника; I_N – длительно допустимая нагрузка; ϑ_N – длительно допустимая температура перегрева в нормальном режиме. Связь между T_0 и I_N показана на рис. 1 [12].

Для удобства выполнения расчета I_p по заданному графику $I(t)$ [12], значения перегрева ϑ_1, ϑ_0 заменено в выражениях (4,а) и (4,б) прямо пропорциональными им вспомогательными переменными z_1, z_0 согласно формулам:

$$\vartheta_1 = z_1 \frac{\vartheta_N}{I_N^2}, \quad \vartheta_0 = z_0 \frac{\vartheta_N}{I_N^2}. \quad (6)$$

Следовательно, уравнение (4) перейдет в следующие выражения [12]:

$$\lambda_1 T_0 \frac{dz_1}{dt} + z_1 = \lambda_1 I^2(t), \quad (7,а)$$

$$T_0 \frac{dz_0}{dt} + z_0 = I^2(t). \quad (7,б)$$

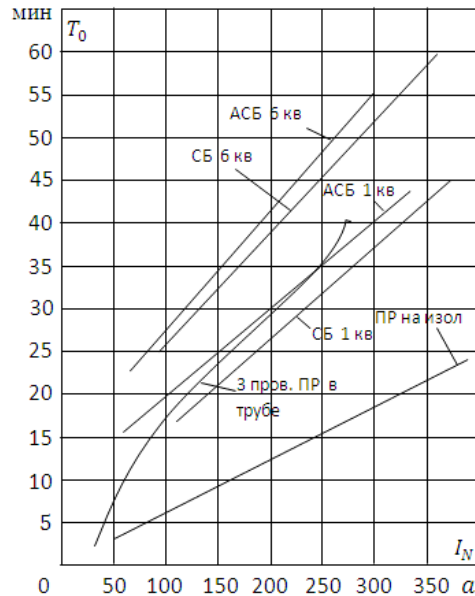


Рис. 1. Связь между постоянной времени нагрева T_0 проводов и кабелей и длительно допустимой нагрузкой I_N

Для вычисления по графику нагрузки расчетного тока $I(t)$ по пику температуры можно воспользоваться формулами [12]:

$$I_{pl}^{(0)} = \sqrt{\frac{z_{0M}}{\beta_1}}, \quad (8)$$

$$I_{pl}^{(1)} = \sqrt{\frac{(1 + \beta_1 \alpha \vartheta_N) z_{1M}}{\beta_1 \left(1 + \alpha \vartheta_N \frac{z_{1M}}{I_N^2} \right)}}, \quad (9)$$

где β_1 – допустимая кратность перегрева жилы проводника; z_{1M} , z_{0M} , – соответственно наибольшие ординаты функций $z_{1(t)}$, $z_{0(t)}$. Они являются интегралами дифференциальных уравнений (7,а), (7,б).

Результаты

Предложенная в работе [13] структурная схема модели, описывающая перегрев проводника относительно температуры окружающей среды, показана на рис.2. В процессе моделирования, в соответствующих блоках *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, реализуются следующие операции: *a* – моделирование тока нагрузки $I(t)$, изменяющегося по стохастическому закону; *b*, *c* – интегрирование дифференциальных уравнений, соответственно, (7,а) и (7,б), результаты которых представлены на рисунках 2,б и 2с; *d*, *e* – определение расчетных токов по формулам (9) и (8) с использованием наибольших значений z_{1M} , z_{0M} , функций $z_{1(t)}$ и $z_{0(t)}$; *f* – выводятся результаты моделирования.

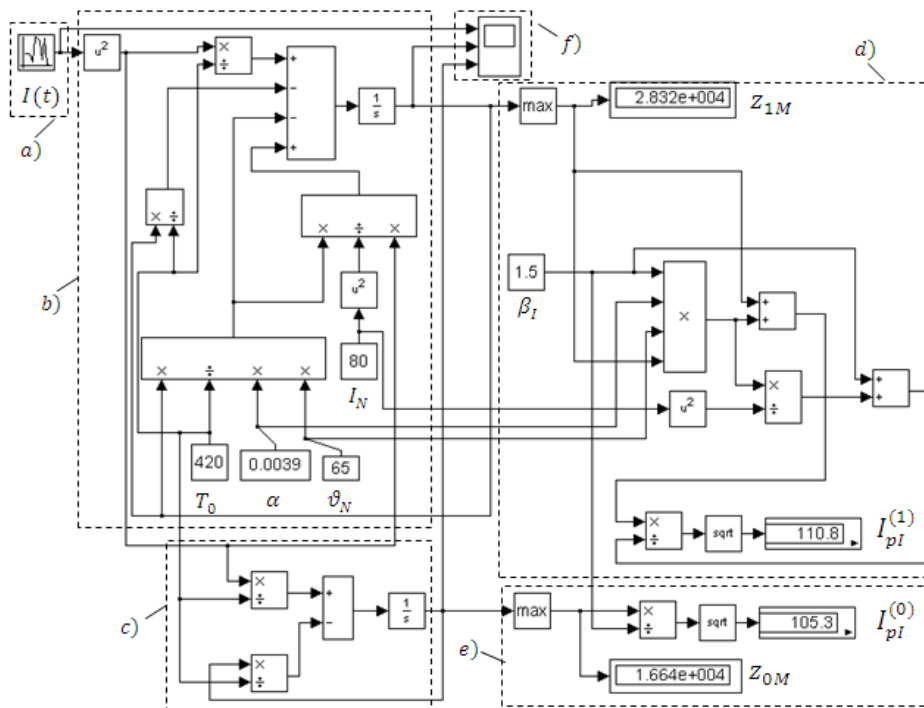


Рис. 2. Структурная схема модели, описывающей перегрев проводника относительно температуры окружающей среды

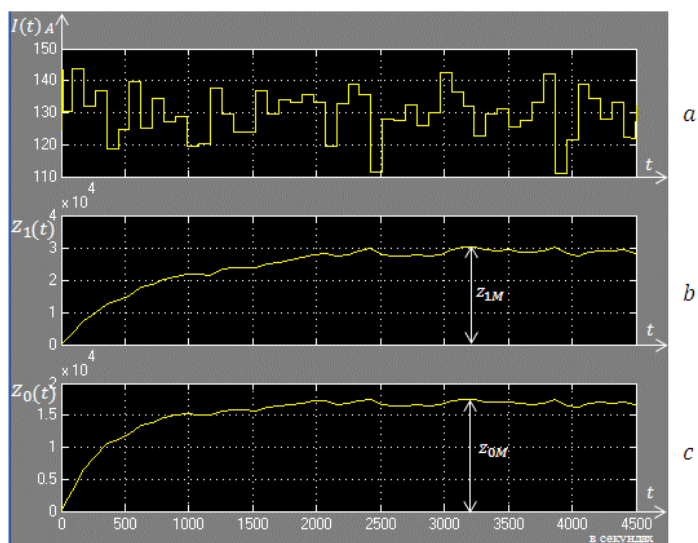


Рис. 3. Графики изменения во времени функций: $I(t)$ – тока нагрузки; $z_{1(t)}$ – интеграла дифференциального уравнения (7,а); $z_{0(t)}$ – интеграла дифференциального уравнения (7,б)

В качестве иллюстрации (рис. 3) показаны две интегральные кривые (рис. 3б, с) уравнений нагрева (7,а) и (7,б) для открыто проложенных проводов, полученные с использованием компьютерной модели (рис. 2), описывающей перегрев проводника относительно температуры окружающей среды, для показанного на том же рисунке смоделированного графика нагрузки $I(t)$.

Найденные в процессе моделирования значения $z_{0M} = 1,664 \cdot 10^4$ и $z_{1M} = 2,832 \cdot 10^4$ (рис. 3 б, с), привели к следующим значениям: $I_{pl}^{(0)} = 105,3 \text{ а}$; $I_{pl}^{(1)} = 110,8 \text{ а}$; при $\alpha = 0,0039$ и $\vartheta_N = 65$ для $\beta_1 = 1,5$.

Для оценки точности результатов моделирования по определению расчетных токов I_p с использованием выше описанной модели перегрева проводника относительно температуры окружающей среды, воспользуемся автоматизированным лабораторным стендом [11], схема которого показана на рис. 4, где Гр – градусник; Т1, Т2, Т3 – термопары; Пр1 и Пр2 – проводники; МП – магнитный пускатель; ЭП – электроприемник; РН – регулируемая нагрузка; ШД – шаговый двигатель.

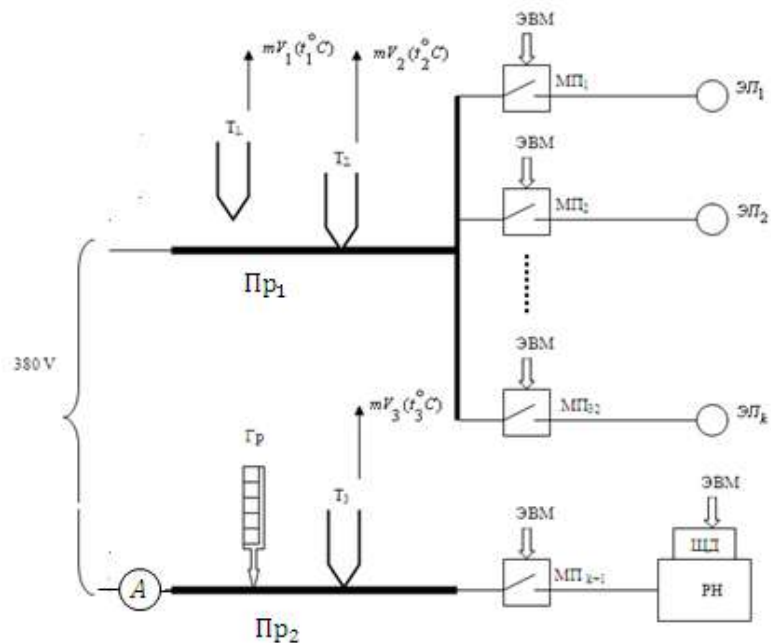


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для определения расчетного тока и исследования степени влияния изменяющегося во времени закона распределения нагрузки на значение расчетного тока

Подготовка экспериментальной установки к работе заключается в следующем: выбираем два провода Пр1, Пр2 одинаковой марки с равными сечениями, проложенных в одинаковых условиях. Сечения этих проводников выбираем в соответствии с значением расчетного тока I_p .

От первого провода получают питание N электроприемников с мощностями p_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Ко второму проводу подключена нагрузка с регулируемой мощностью (рис. 4).

После запуска управляющей компьютерной программы алгоритм работы автоматизированного лабораторного стенда по определению расчетного тока состоит в следующем:

- 1) оператор вводит вероятностные законы функционирования каждого ЭП;
- 2) моделируется график работы каждого ЭП в соответствии с принятыми законами их работы;
- 3) управляющая компьютерная программа включает или отключает соответствующие ЭП в соответствии со смоделированным графиком. В результате, по проводу Пр1 протекает ток нагрузки со стохастическим характером изменения его значения;
- 4) через определенные интервалы времени измеряются и запоминаются в массиве $T(t)$ текущие значения температуры изоляции провода Пр2;

5) когда продолжительность работы электроприемников достигнет значения, равного трех или четырех кратного постоянного времени провода, в массиве $T(t)$ определяется максимальное значение температуры $t_{\max} 0С$ изоляции провода Пр1. Если значение $(t_{\max} - t_0) 0С$ равно значению длительно допустимой температуре ϑ_N перегрева провода в нормальном режиме, то путем пошагового увеличения нагрузки провода Пр2, доводим

значение перегрева провода Пр2 до значения, равного $(t_{\max} - t_0)$ ОС. Тогда по показанию амперметра определяем расчетный ток;

б) сопоставляя значения расчетных токов, полученные путем моделирования и эксперимента, делаем заключение о точности модели перегрева провода.

В заключение отметим: найденные в процессе моделирования значения $I_{pl}^{(0)} = 105,3\alpha$; $I_{pl}^{(1)} = 110,8\alpha$; при $\alpha = 0,0039$ и $\vartheta_N = 65$ для $\beta_1 = 1,5$, показали, что действительное значение расчетного тока $I_{рд}$ находится в пределах $105,3\alpha \leq I_{рд} \leq 110,8\alpha$. Этот факт подтвержден при оценке точности результатов моделирования по определению расчетных токов I_p с использованием автоматизированного лабораторного стенда.

Литература

1. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А. Актуальные вопросы моделирования развития электроэнергетических систем // Бюллетень центра фрактального моделирования // Научно-теоретический и прикладной журнал, 2011. С. 35–38.
2. Агеев С.П. Расчёт выбросов графиков нагрузки электрических сетей лесопильного цеха // Известия вузов, Электромеханика. 2013. № 5.
3. Кудрин Б.И. Расчёт электрических нагрузок потребителей: история, состояние, комплексный метод // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 14–22.
4. Надтока И.И., Павлов А.В. Современное состояние и проблемы расчёта электрических нагрузок // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими. Материалы XII Международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 24 июня 2013 г. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 3–10
5. Павлов А.В. Ортогональное разложение графика электрической нагрузки на основе К-функций. // Моделирование. Теория, методы и средства. Материалы XIII Международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 27 февраля 2013 г. 2013. С. 106–110.
6. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. К.: Наукова думка, 1984. 271 с.
7. D.P. Chassin, J.M. Malard, C. Posse, A. Gangopadhyaya, N. Lu, S. Katipamula, J.V. Mallow. "Modeling Power Systems as Complex Adaptive Systems". Loyola University, Chicago, IL., December 2004 151 p.
8. Ермаков В.Ф., Балыкин Е.С., Гудзовская В.А., Еволенко Н.А., Коваленко А.Н. Математическая модель процесса изменения температуры силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 43–45.
9. Ермаков В.Ф., Гудзовская В.А., Балыкин Е.С., Зайцева И.В. Математическая модель процесса изменения температуры нагрева проводника // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 42–43.
10. Надтока И.И., Павлов А.В. Анализ характеристик графиков электрических нагрузок многоквартирных жилых домов // IV международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи», г. Новочеркасск, 14–18 октября 2013 г. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 186–190.
11. Арфан А.Х., Сатаркулов К.А. Компьютерное управление экспериментом в системах электроснабжения промышленных предприятий // Наука, новые технологии и инновации. 2006. № 1. С. 50–54.
12. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн, Б.С. Мешель. Л.: Энергия, 1971. 264 с.
13. Яблочников А.М., Байбагысова Д.Ж., Кадиева А.К., Сатаркулов К.А. Моделирование процесса нагрева и определение расчетной нагрузки проводника в среде simrowersystems и simulink // Известия КГТУ им. И. Раззакова. № 1 (41), часть I. Токмок: Изд. центр «Текник», 2017. 230 с.

Авторы публикации

Байбагысова Динара Жанузаковна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика» филиала имени академика Х.А. Рахматулина в городе Токмок Кыргызского государственного технического университета имени И. Разакова, г. Токмок, Кыргызская республика.

Кадиева Аида Кайыпбергеновна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика» филиала имени академика Х.А. Рахматулина в городе Токмок Кыргызского государственного технического университета имени И. Разакова, г. Токмок, Кыргызская республика.

Кадыров Чолпонбек Аманович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и общей электротехники» Кыргызского государственного технического университета имени И. Разакова, г. Бишкек, Кыргызская республика.

Узагалиев Замирбек Асранкулович – начальник расчетного сектора РЗА ОАО «Северэлектро», г. Бишкек, Кыргызская республика.

References

1. Kochergin S.V., Kobelev A.V., Khrebtov N.A. Aktual'nye voprosy modelirovaniya razvitiya elektroenergeticheskikh sistem // Byulleten' tsentra fraktal'nogo modelirovaniya // Nauchno-teoreticheskii i prikladnoi zhurnal, 2011, S. 35–38.
2. Ageev S.P. Raschet vybrosov grafikov nagruzki elektricheskikh setei lesopil'nogo tsekha // Izv. vuzov, Elektromekhanika. 2013. № 5.
3. Kudrin B.I. Raschet elektricheskikh nagruzok potrebiteli: istoriya, sostoyanie, kompleksnyi metod // Promyshlennaya energetika. 2015. № 5. S. 14–22.
4. Nadtoka I.I., Pavlov A.V. Sovremennoe sostoyanie i problemy rascheta elektricheskikh nagruzok // Sovremennye energeticheskie sistemy i komplekсы i upravlenie imi. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Novochoerkassk, 24 iyunya 2013 g. / Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t (NPI). Novochoerkassk: YuRGTU (NPI), 2013, S. 3–10
5. Pavlov A.V. Ortogonal'noe razlozhenie grafika elektricheskoi nagruzki na osnove K-funktsii. // Modelirovanie. Teoriya, metody i sredstva. Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Novochoerkassk, 27 fevralya 2013 g. / Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t (NPI). Novochoerkassk: YuRGTU (NPI). 2013. S. 106–110.
6. Shidlovskii A.K., Kurennyi E.G. Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku sistem elektrosnabzheniya. K.: Naukova dumka. 1984. 271 s.
7. D.P. Chassin, J.M. Malard, C. Posse, A. Gangopadhyaya, N. Lu, S. Katipamula, J.V. Mallow. “Modeling Power Systems as Complex Adaptive Systems”. Loyola University, Chicago, IL, December 2004 151 p.
8. Ermakov V.F., Balykin E.S., Gudzovskaya V.A., Evolenko N.A., Kovalenko A.N. Matematicheskaya model' protsessa izmeneniya temperatury silovogo transformatora // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. 2012. № 2. S. 43–45.
9. Ermakov V.F., Gudzovskaya V.A., Balykin E.S., Zaitseva I.V. Matematicheskaya model' protsessa izmeneniya temperatury nagreva provodnika // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. 2012. № 2. S. 42–43.
10. Nadtoka I.I., Pavlov A.V. Analiz kharakteristik grafikov elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov // IV mezhdunarodnuyu nauchno-tekhnicheskuyu konferentsiyu «Elektroenergetika glazami molodezhi», g. Novochoerkassk, 14–18 oktyabrya 2013 g. / Yuzh.-Ros. gos. politekhn. un-t (NPI). Novochoerkassk: YuRGTU (NPI), 2013, S. 186–190.
11. Arfan A.Kh., Satarkulov K.A. Komp'yuternoe upravlenie eksperimentom v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii / Nauka, novye tekhnologii i innovatsii. 2006. № 1. S. 50–54.

12. Elektrieskie nagruzki promyshlennykh predpriyatii / S.D. Volobrinskii, G.M. Kayalov, P.N. Klein, B.S. Meshel'. L.: Energiya, 1971. 264 s.

13. Yablochnikov A.M., Baibagysova D.Zh., Kadieva A.K., Satarkulov K.A. Modelirovanie protsessa nagreva i opredelenie raschetnoi nagruzki provodnika v srede simrowersystems i simulink // Izvestiya KG TU im. I. Razzakova № 1 (41) chast' I. Tokmok: Izd. tsentr «Teknik». 2017. 230 s.

Authors of the publication

Dinara J. Baibagysova - senior lecture, Department “Electroenergetics”, The branch named after academician H. A. Rakhmatulina in Tokmok of the Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov.

Aida K. Kadieva - senior lecture, Department “Electroenergetics”, The branch named after academician H. A. Rakhmatulina in Tokmok of the Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov.

Cholponbek A. Kadyrov – cand. sci. (techn.), assistant professor, Department “Theoretical foundations of electrical engineering and general electrical engineering”, the Kyrgyz state technical University named after I. Razzakov.

Zamirbek A. Uzagaliev – head of the estimated sector of relay protection and automation of Open joint-stock company "Severelektro".

Поступила в редакцию

14 июня 2017 года.