

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

DOI:10.17213/0136-3360-2020-2-3-94-99

МЕТОД ОДНОЗНАЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПО НАГРЕВУ

Э.Г. Куренный, А.А. Булгаков

Донецкий национальный технический университет. Украина, 83000, г. Донецк, ул. Артема, 58.

Рассмотрена задача проверки проводников по нагреву в системах электроснабжения при случайной электрической нагрузке. Используется вероятностная модель изменения тока, который рассматривается как случайный процесс с нормальным законом распределения. Показано, что существующая практика определения расчетной нагрузки по одной десятиминутной постоянной времени нагрева не обеспечивает достоверность решения. Предложено использовать кривую зависимости эффективного инерционного тока от постоянной времени нагрева. Отмечены способы получения этой зависимости при случайной электрической нагрузке. Точное решение найдено по точке пересечения этой кривой с кривой зависимости длительно допустимой нагрузки проводника от постоянной времени нагрева. В расчетах учтено, что шкала стандартных сечений проводников является дискретной. На примере случайного процесса изменения электрической нагрузки с экспоненциальной корреляционной функцией оценены погрешности существующего метода. Показано, что погрешности определения расчетной электрической нагрузки и погрешность при выборе сечения различны.

Ключевые слова: электрическая сеть, нагрев проводников, допустимый ток, расчетная нагрузка, погрешности.

Для цитирования: Куренный Э.Г., Булгаков А.А. Метод однозначного определения расчетной электрической нагрузки по нагреву // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 2-3. С. 94-99. DOI:10.17213/0136-3360-2020-2-3-94-99.

Постановка задачи

В эксплуатации при проверке проводников на нагрев постоянная времени T проводника известна, поэтому существующие методы расчёта [1 – 3] дают одно значение расчётной нагрузки, адекватно определяющее расчётную максимальную температуру перегрева. Для краткости это значение назовём «однозначным». В проектировании же применение этих методов затруднено тем, что проводник ещё не выбран. Поэтому в расчётах принимается постоянная $\hat{T}=10$ мин [1, 4], которая соответствует принятому в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) тридцатиминутному интервалу усреднения. Однако отнесение расчетной нагрузки к одному значению \hat{T} приводит к противоречию: выбранный проводник имеет иную постоянную времени T . Если она больше (меньше) 10 мин, то это может привести к необоснованному завышению (занижению) капитальных затрат на сеть электроснабжения.

В статье предлагается метод выбора сечения проводника без привязки к величине \hat{T} , изложенный на примере случайной нагрузки с

нормальным распределением ординат и экспоненциальной корреляционной функцией (КФ) [1, п. 9-1; 5].

Расчетные максимумы

Процессы изменения тока I и температуры перегрева ϑ проводника связаны между собой приближенным дифференциальным уравнением (при допущении $T = \text{const}$ [1, (2-7б)]):

$$T\vartheta' + \vartheta = c_{\vartheta} I^2. \quad (1)$$

Здесь коэффициент пропорциональности c_{ϑ} определяется отношением длительно допустимой температуры к квадрату длительно допустимого тока \hat{I} проводника. Уравнение (1) удобно записывать в виде

$$\vartheta(t) = L_T \{c_{\vartheta} I^2(t)\},$$

где L_T – линейный оператор инерционного сглаживания.

Разделив обе части (1) на c_{ϑ} , получим

$$w_T(t) = L_T \{I^2(t)\}$$

для квадратичного инерционного процесса $w_T(t)$, A^2 . Ординаты эффективного инерционного процесса¹ (ЭИП)

$$I_{\text{ЭИП}}(t) = \sqrt{w_T(t)} = \sqrt{\vartheta(t)/c_9}$$

выражаются в амперах.

В соответствии с принципом практической уверенности [5, 6] расчетные максимумы² (индекс М) определяются с заданной интегральной вероятностью $E_{\text{и}}$. Они могут превышать с пренебрежимо малой граничной вероятностью $E_x = 1 - E_{\text{и}}$.

Граничная вероятность представляет собой относительную суммарную длительность выбросов за уровень $I_{\text{ЭИП}}$, который подпадает под определение расчетной нагрузки как неизменного графика тока. Поэтому величину $I_{\text{ЭИП}}$ следует сравнивать с длительно допустимым током. В технических приложениях теории вероятностей интегральная вероятность обычно выбирается равной 0,95, когда $E_x = 0,05$ [6].

Исходные характеристики

Для получения однозначного решения необходимо иметь две зависимости от постоянной времени нагрева: $I_{\text{ЭИП}}(T)$ и $\hat{I}(T)$, которые назовем ЭИТ- и СТ-характеристиками.

Первая характеристика может быть определена, во-первых, методом имитации случайных процессов – путем аппроксимации данных из [3, табл. 3] и выражением для квантилей гамма-распределения с погрешностью не более 1,4 % [2]. Во-вторых, ЭИТ-характеристику можно приближенно рассчитать по инерционным максимумам $I_{\text{ТМ}}$ ИТ-процесса $I_T(t) = L_T \{I(t)\}$. В отличие от ЭИТ-процесса инерционный процесс первого порядка имеет нормальное распределение со средним значением, равным среднему I_c графика тока и дисперсией [7, (II.53)]

$$D_{IT} = \frac{\sigma_I^2}{1 + \alpha T}$$

Здесь σ_I – среднеквадратическое отклонение тока; α – параметр экспоненциальной КФ.

Для такого процесса существует аналитическое решение, которое обычно представляют в виде [8]

$$I_{\text{ТМ}}(T) = I_c + \beta \sqrt{D_{IT}} = I_c + \beta \sigma_I / \sqrt{1 + \alpha T}, \quad (2)$$

где статистический коэффициент β однозначно связан с интегральной вероятностью. Для нормального закона распределения при $E_{\text{и}} = 0,95$ коэффициент $\beta = 1,645$.

Большинство приближенных методов³ (например, [1, п.10-1], [8, п.4.6]) используют два свойства ИТ- и ЭИТ-характеристик: при $T=0$ и $I \geq 0$ они начинаются из одной точки⁴ с ординатой $I_{0\text{М}} = I_c + \beta \sigma_I$; при $T \rightarrow \infty$ ИТ-максимум стремится к среднему I_c , а ЭИТ-максимум к эффективному

$$I_{\text{Э}} = \sqrt{I_c^2 + \sigma_I^2} \quad (3)$$

значениям тока.

Методы отличаются различными допущениями. В методе «коэффициента разностей» считается, что коэффициент

$$k_{\text{рМ}} = \frac{I_{0\text{М}} - I_{\text{Э}}}{I_{0\text{М}} - I_c} \quad (4)$$

не зависит от T . В этом случае

$$\begin{aligned} I_{\text{ЭИП}}(T) &\approx (1 - k_{\text{рМ}}) I_{0\text{М}} + k_{\text{рМ}} I_{\text{ТМ}} = \\ &= I_c + \beta \sigma_I \left(1 - k_{\text{рМ}} + k_{\text{рМ}} / \sqrt{1 + \alpha T} \right). \end{aligned}$$

Подставив сюда выражение (4) и учитывая, что в нем знаменатель равен $\beta \sigma_I$, получим

$$I_{\text{ЭИП}}(T) \approx I_{\text{Э}} + (I_{0\text{М}} - I_{\text{Э}}) / \sqrt{1 + \alpha T}. \quad (5)$$

Величины I_c и σ_I входят сюда неявно – через $I_{\text{Э}}$ и $I_{0\text{М}}$, а β – через $I_{0\text{М}}$.

Вторая характеристика строится по зависимостям от сечения S проводника длительно допустимого тока из ПУЭ и постоянной времени [4]. В силу дискретности шкалы сечений СТ-характеристика является кусочно-линейной: на каждом участке между стандартными сечениями

$$\hat{I}(T) = AT + B, \quad (6)$$

где A и B – параметры прямой.

¹ Инерционные процессы являются функциями двух аргументов: времени t и постоянной инерции T , которая для краткости записи вынесена в индекс, например, $I_{\text{ЭИП}}(t) = I_{\text{ЭИП}}(t, T)$. Их характеристики в общем случае также являются функциями постоянной времени T .

² В теории вероятностей расчетный максимум именуется квантилем распределения порядка $E_{\text{и}} \cdot 100$ %.

³ Использование приближенной формулы из [1, (9) – (15)] затруднено вследствие того, что входящий в нее статистический коэффициент β_1 , зависящий от T , теоретически не поддается определению.

⁴ Можно показать, что для нормального распределения, имеющего отрицательные ординаты, это допущение с погрешностью менее 1 % выполняется при $I_c / \sigma_I \geq 0,6$.

Метод расчета

Метод состоит в том, что искомая расчетная нагрузка I_p и соответствующая постоянная нагрева T_p определяются по точке пересечения ЭИТ- и СТ-характеристик. Здесь возможны три случая: в первом $T_p > \hat{T}$ (рис. 1), когда точка a располагается ниже точки b пересечения горизонтали $I_{\text{э10М}}$ с ЭИТ-характеристикой. Во втором случае (рис. 2) при $T_p < \hat{T}$ точка a находится выше точки b . В третьем случае горизонтали $I_{\text{э10М}}$ и I_p находятся внутри одной прямой СТ-характеристики: между точками c_1 и c_2 или c_2 и c_3 .

Приравняв $I_{\text{эТМ}}(T)$ и $\hat{I}(T)$ к I_p , а также T к T_p , получим систему уравнений

$$\begin{cases} I_p = I_{\text{эТМ}}(T_p); \\ I_p = \hat{I}(T_p) \end{cases}$$

для определения координат точки a пересечения характеристик.

При решении удобнее найти вначале постоянную нагрева из уравнения

$$I_{\text{эТМ}}(T_p) = \hat{I}(T_p), \tag{7}$$

а затем по формуле (6) рассчитать $I_p = AT_p + B$. Если используется выражение (5), то получается легко решаемое алгебраическое уравнение

$$(1 + \alpha T_p)(AT_p + B - I_{\text{э}})^2 = (I_{0\text{М}} - I_{\text{э}})^2 \tag{8}$$

третьего порядка.

Примем следующие условные наименования методов: МП – предлагаемый метод «пересечения» и МДМ – метод «десятиминутного максимума», снабжая обозначения относящихся к ним величинам индексами p и 10 .

Для компактности иллюстраций по расчётной нагрузке будем выбирать ближайшее⁵ стандартное сечение.

Погрешности МДМ по сравнению с МП приведены формулами:

– определения расчетной нагрузки

$$\delta_1 = (I_{\text{э10М}}/I_p - 1)100 \% ; \tag{9}$$

⁵ В действительности сечение выбирается с принятым коэффициентом запаса k_3 по величине $k_3 I_p$. В этом случае на рисунках пришлось бы добавлять кривую зависимости $k_3 I_p(T)$ и минимум еще один отрезок прямой СТ-характеристики, что существенно снижает наглядность иллюстрации идеи МП и увеличивает размер рисунков по вертикали.

– выбора сечения

$$\delta_2 = (C_{10}/C_p - 1)100 \% . \tag{10}$$

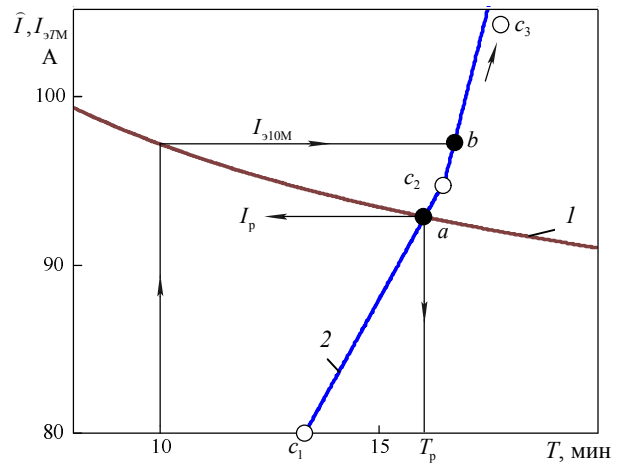


Рис. 1. Зависимости от постоянной нагрева T при $T_p > \hat{T}$:
1 – ЭИТ-максимумов; 2 – длительно допустимых токов
($I_c = 62$ А, $\sigma_I = 38$ А, $\alpha = 0,35$ мин⁻¹)

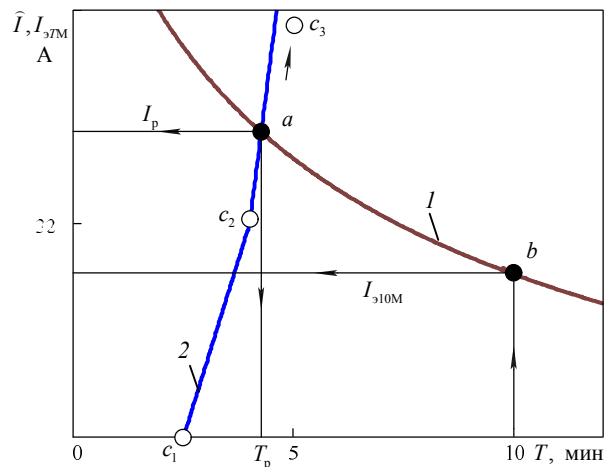


Рис. 2. Зависимости от постоянной нагрева T при $T_p < \hat{T}$:
1 – ЭИТ-максимумов; 2 – длительно допустимых токов
($I_c = 20$ А, $\sigma_I = 12$ А, $\alpha = 0,35$ мин⁻¹)

В первом случае (см. рис. 1) МДМ завышает нагрузку в $I_{\text{э10М}}/I_p$ раз с погрешностью $\delta_1 > 0$ (точка a располагается ниже точки b). По МП будет выбрано ближайшее стандартное сечение C_p (точка c_2), в то время как МДМ даст большее сечение C_{10} (точка c_3) – за пределами рисунка. Это приводит к необоснованному завышению сечения в C_p/C_{10} раз с погрешностью $\delta_2 > 0$.

Во втором случае (см. рис. 2), наоборот, когда $I_{\text{э10М}} < I_p$, МДМ занижает нагрузку: точка a находится выше b . В результате по МДМ сечение было бы выбрано меньшим (точка c_2), чем

требуется по МП (точка c_3). Однако при этом нарушается техническое требование: расчетная нагрузка не может быть больше длительно допустимой – иначе проводник в нормальном режиме будет недопустимо перегреваться.

Наконец, если обе точки a и b располагаются на одной прямой СТ-характеристики, то сечения будут одинаковыми ($\delta_2=0$), но тепловой износ изоляции будет оценен неверно: в первом случае оценка завышается, а во втором занижается.

В [4] расчётная нагрузка определяется для десятиминутной постоянной времени, а учёт фактической постоянной времени T_ϕ выбранного кабеля производится только при реконструкции действующей сети электроснабжения. Существующие методы пересчёта (например, [9, п.4.4] и [4, табл. 9.3-9.6]), в отличие от МП, в принципе не могут давать точное значение расчётной нагрузки. Как видно из рис. 1, 2, абсцисса точки c_3 всегда превышает абсциссу T_p , поэтому подстановка в (5) значения T_ϕ даёт максимум $I_{T_\phi} < I_p$. Особенно наглядно это проявляется для третьего случая пересечения характеристик, когда точка с координатами (T_ϕ, I_{T_ϕ}) может попасть на нижний отрезок прямой СТ-характеристики. Если принять I_{T_ϕ} за расчётную нагрузку, то после пересчёта вероятно следует принимать меньшее сечение. Предложенный же метод всегда даёт значение I_p , а поэтому такая парадоксальная ситуация невозможна.

В заключение отметим, что МП очевидным образом распространяется на КФ другого вида. Например, для экспоненциально-косинусоидальной КФ инерционная дисперсия даётся формулой из [7, (II.58)], а квадратичная ЭИТ-характеристика приведена в [10].

Пример

Выбрать сечение прокладываемых в трубе проводников для двух вариантов исходного задания с одинаковыми $\alpha=0,35 \text{ мин}^{-1}$, но разными средними значениями и стандартами: 1 – $I_c=62 \text{ А}$, $\sigma_I=38 \text{ А}$; 2 – $I_c=20 \text{ А}$, $\sigma_I=12 \text{ А}$.

В первом варианте эффективная нагрузка (3):

$$I_3 = \sqrt{62^2 + 38^2} = 72,72 \text{ А.}$$

Подстановка в (2) значения $T=0$ даёт

$$I_{0M} = 62 + 1,645 \cdot 38 = 124,51 \text{ А.}$$

ЭИТ-характеристика (см. рис. 1, кривая 1) рассчитывается по формуле (5):

$$I_{3TM}(T) \approx 72,72 + (124,51 - 72,72) / \sqrt{1 + 0,35T} = \\ = 72,72 + 51,79 / \sqrt{1 + 0,35T}, \text{ А.}$$

При $\hat{T}=10$ мин расчетный максимум $I_{310M} = 97,13 \text{ А}$.

Для построения СТ-характеристики из [4, табл. 9.2] для сечений 25, 35 и 50 мм² найдем постоянные нагрева 13,3; 16,5 и 19,9 мин, а из [1, табл. 1.3.5] – длительно допустимые токи 80, 95 и 130 А. Граничные точки имеют координаты: $c_1 - (13,3; 80)$, $c_2 - (16,5; 95)$, $c_3 - (19,9; 130)$. По этим значениям выполним линейно-кусочную аппроксимацию (см. рис. 1, кривая 2):

$$\hat{I}(T) = \begin{cases} 4,6875T + 17,656 & \text{при } 13,3 \leq T \leq 16,5 \text{ мин;} \\ 10,294T - 74,85 & \text{при } 16,5 \leq T \leq 19,9 \text{ мин.} \end{cases}$$

В верхнем выражении $A=4,6875 \text{ А} \cdot \text{мин}^{-1}$ и $B=17,656 \text{ А}$. Решение уравнения (8)

$$(1 + 0,35T_p)(4,6875T_p + 17,656 - 72,72)^2 = \\ = (124,51 - 72,72)^2 = 2736 \text{ А}^2$$

даёт значение $T_p=16,04$ мин, по которому вычислим расчетную нагрузку $I_p=4,6875 \cdot 16,04 + 17,656 = 92,9 \text{ А}$. Для нижнего выражения действительных корней уравнения нет, так как в области $T > 16,5$ мин характеристики не пересекаются.

По расчетной нагрузке выбираем ближайшее стандартное сечение $C_p=35 \text{ мм}^2$. В то же время по МДМ пришлось бы принять сечение $C_{10}=50 \text{ мм}^2$. По формулам (9) и (10) найдем

$$\delta_1 = (97,13/92,9 - 1)100 = 4,6 \%$$

и

$$\delta_2 = (50/35 - 1)100 = 42,9 \%$$

Из-за дискретности шкалы сечений погрешность выбора сечения намного превосходит погрешность завышения нагрузки.

Проверим корректность пересчёта максимума по формуле из [9], которая в принятых здесь обозначениях имеет вид

$$I_{MT} = I_c + \frac{I_{310M} - I_c}{\sqrt{2T_{C10}/10}},$$

где T_{C10} – постоянная выбранного МДМ сечения по десятиминутному максимуму. В рассматриваемом варианте $T_{C10}=19,9$ мин для сечения 50 мм². Подстановка в формулу остальных численных значений даёт пересчитанный максимум $I_{MT}=79,6 \text{ А}$, который на 14,3 % меньше точного значения 92,9 А. Если принять его за расчётную нагрузку, то пришлось бы выбрать сечение, меньше 25 мм², хотя по МП требуется 35 мм². Этот результат показывает неприменимость пересчёта максимумов в проектировании.

Перейдем ко второму варианту задания, для которого аналогичным образом получим: $I_3 = 23,32 \text{ А}$, $I_{0M} = 39,74 \text{ А}$, $I_{97M} \approx 23,32 + 16,42/\sqrt{1+0,35T} \text{ А}$, $I_{910M} = 31,06 \text{ А}$, $\hat{I} = 21,3333 + 2,6667T$ при $2,5 \leq T \leq 4$ мин и $\hat{I} = 5,9132 + 6,5217T$ при $4 \text{ мин} \leq T$. Координаты точек: $c_1 - (2,5; 28)$, $c_2 - (4; 32)$, $c_3 - (6,3; 47)$. ЭИТ- и СТ-характеристики представлены на рис. 2 кривыми 1 и 2. Точка a их пересечения имеет координаты: $T_p = 4,26$ мин и $I_p = 33,70 \text{ А}$.

По МП выбираем сечение 10 мм^2 с длительно допустимым током 47 А , превышающим $33,70 \text{ А}$. По МДМ якобы достаточно 6 мм^2 , но в этом случае $\hat{I} = 32 \text{ А}$ меньше I_p , что является некорректным результатом.

ВЫВОД

Расчетную электрическую нагрузку по нагреву целесообразно выбирать по пересечению ЭИТ- и СТ-характеристик, что позволяет избежать необоснованного завышения или занижения сечений проводников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн, Б.С. Мешель Л.: Энергия, 1971. 264 с.

Куренный Эдуард Григорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» Донецкого национального технического университета.

Булгаков Александр Александрович – ст. преподаватель кафедры «Электрические системы» Донецкого национального технического университета. E-mail: bulgakov-work@mail.ru

Поступила в редакцию

16 марта 2020 г.

*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika
(Russian Electromechanics)
2020, vol. 63, no. 2-3, pp. 94-99*

THE METHOD OF UNAMBIGUOUS DETERMINATION OF THE DESIGN ELECTRICAL LOAD ACCORDING TO THE HEATING CONDITION

E.G. Kourennyi, Donetsk National Technical University. Ukraine, 83000, Donetsk, St. Artema, 58.

A.A. Bulgakov, Donetsk National Technical University. Ukraine, 83000, Donetsk, St. Artema, 58.

A problem of checking conductors for heating condition in power supply systems in case of random electrical load is considered. A probabilistic model of current is used. The current is considered as a random process with a normal distribution law. It is shown that the existing practice of determining the design load from a ten-minute heating time constant does not provide a reliable solution. It is proposed to use the curve of the effective inertial current versus the heating time constant. Methods to obtain this dependence with a random electrical load are identified. The exact solution is found at the intersection of this curve with the curve of the long-term permissible conductor load versus the heating time constant. The calculations took into account that the scale of standard cross-sections of conductors is discrete. Errors of existing method are evaluated

with example of random electrical load with exponential correlation function. It is shown that the error in determining the design electric load and the error in selecting the cross-section of the conductors are different.

Key words: electrical network, heating of conductors, permissible current, design load, errors.

For citation: Kourennyi E.G., Bulgakov A.A. [The Method of Unambiguous Determination of the Design Electrical Load According to the Heating Condition]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2020, vol. 63, no. 2-3, pp. 94-99. (In Russ.) DOI:10.17213/0136-3360-2020-2-3-94-99.

R E F E R E N C E S

1. Volobrinskii S.D., Kayalov G.M., Klein P.N., Meshel' B.S. *Elektricheskie nagruzki promyshlennykh predpriyatii* [Electrical Loads of Industrial Enterprises]. Leningrad: Energiya, 1971, 264 p.
2. Kurenniy E.G., Bulgakov A.A. Metody rascheta effektivnykh maksimumov parametrov rezhima sistem elektrosnabzheniya [Calculation methods for square inertia maximums of the power-supply systems mode parameters]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2016, no. 5, pp. 75-81. (In Russ.)
3. Kurenniy E.G., Dmitrieva E.N., Bulgakov A.A. Statisticheskoe reshenie zadachi o kvadratichtnom inertionnom sglazhivanii sluchainykh elektroenergeticheskikh protsessov [The statistical solution of the problem of the square inertia smoothing of stochastic electrical processes]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2016, no. 4, pp. 109-122. (In Russ.)
4. *Posobie k "Ukazaniyam po raschetu elektricheskikh nagruzok" (RTM 36.18.32.4-92)* [Guide to the "Instructions for calculating electrical loads" (GTM 36.18.32.4-92)]. VNIPI Tyazhpromelektroproekt, 1993. 73 p.
5. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 1969, 576 p.
6. Dmitrieva E.N. Printsip prakticheskoi uverenosti v zadachakh elektroenergetiki [The principle of practical confidence in the problems of the electric power industry]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 8, pp. 15-21. (In Russ.)
7. Shidlovskii A.K., Kurenniy E.G. Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku sistem elektrosnabzheniya [Introduction to the statistical dynamics of power supply systems]. Kiev: Naukova dumka, 1984, 273 p.
8. Shidlovskii A.K., Vagin G.Ya., Kurenniy E.G. *Raschety elektricheskikh nagruzok sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* [Electrical load calculations of industrial enterprises power supply systems]. M: Energoatomizdat, 1998, 224 p.
9. Ermilov A.A. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* [Fundamentals of power supply for industrial enterprises]. Moscow: Energiya, 1976, 208 p.
10. Nadtoka I.I., Kurenniy E.G., Bulgakov A.A. [The simulation solution to a problem of quadratic inertial smoothing of stochastic electric-power processes with an exponential-cosine autocorrelation function]. *Sovremennye energeticheskie sistemy i komplekxy i upravlenie imi: Materialy 14-oi Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern energy systems and complexes and their management: Materials of the 14th international conference. science.- practice. conf.]. Novocheerkassk, 2017, pp. 12-18.

Information about the authors:

Eduard G. Kourennyi, Doctor of Technical Sciences, Professor.

Alexander A. Bulgakov, Senior Lecturer. E-mail: bulgakov-work@mail.ru

Received March 16, 2020