

УДК 621.311

РАСЧЕТ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ДОЗЫ ФЛИКЕРА, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Черепанов В.В., Калинина Е.А.

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», Киров, e-mail: kaf_eps@vyatsu.ru

Актуальность исследуемой проблемы обусловлена отсутствием методик, позволяющих рассчитывать дозу фликера, возникающую в электрических сетях, питающих асинхронные электродвигатели с резкопеременным характером работы. В связи с этим данная статья направлена на создание нового универсального метода, который можно использовать для определения величины дозы фликера при стохастическом характере изменения электрических нагрузок. При исследовании данной проблемы использовались следующие методы и теории: методы математической статистики, теории вероятностей, теории случайных импульсов, с применением теоретических основ электропривода и электроснабжения. В ходе выполнения работы авторы расчетным путем получили математические модели групповых графиков электрических нагрузок для фанерного производства. Было установлено, что нагрузка изменяется во времени случайным образом. Учитывая эти особенности, предложена методика определения величины дозы фликера при стохастическом характере изменения электрических нагрузок. Полученная авторами методика может применяться в проектных организациях, при разработке новых объектов, потребители которых являются источниками резкопеременной нагрузки. Также, используя описанную методику, можно давать рекомендации при оценке возможности подключения к уже существующим электрическим сетям новых электроустановок.

Ключевые слова: кратковременная доза фликера, колебания напряжения, электроприемник, резкопеременная нагрузка, математическое ожидание, дисперсия, сплайн-функция, полигон, стохастический характер работы

CALCULATION SHORT-TERM FLICKER INDICATOR IN THE STOCHASTIC NATURE OF THE CHANGE OF ELECTRICAL LOADS

Cherepanov V.V., Kalinina E.A.

Federal State budgetary educational institution of Higher Education «Vyatka State University»,
Kirov, e-mail: kaf_eps@vyatsu.ru

The urgency of the problem is determined by the lack of techniques that allow to calculate the flicker indicator occurring in the electrical network powering asynchronous motors with abruptly variable load. Therefore, this article is aimed at creating a new universal method that can be used to determine the dose of flicker for stochastic changes in the electrical load. The following methods were used to study this problem: mathematical statistics, probability theory, the theory of random processes, theoretical foundations of electric drive and power supply. In the course of the work, the authors calculated the mathematical model of resulting curve of electric loads for veneer production. It has been found that the load varies randomly with time. With regard to these features, a technique for determining the amount of flicker doses for stochastic changes in the electrical load has been suggested. The technique can be used by engineering companies for the development of new facilities, with abruptly variable load. Also, the above procedure can be used to assess the possibility of connecting new installations to existing power grids.

Keywords: short-term flicker indicator, voltage fluctuations, electrical receiver, abruptly variable load, mathematical expectation, dispersion, spline function, polygon, the stochastic nature of the work

Качество электрической энергии является составляющей электромагнитной совместимости и определяется совокупностью характеристик. Снижение качества электрической энергии приводит к причинению вреда электрооборудованию, повышает энергоемкость технологических процессов и воздействует на здоровье людей. Для предотвращения таких последствий необходимо проведение методических, технических и организационных мероприятий. Методические мероприятия включают в себя снижение уровня кондуктивных помех, вносимых электрооборудованием потребителя электроэнергии в систему электроснабжения предприятия и электрические сети энергосистем.

Колебания напряжения являются одним из показателей качества электрической энергии. Они вызываются потребителями электроэнергии, имеющими электрическую нагрузку резкопеременного характера. Уровень допустимых кондуктивных помех нормировался раньше ГОСТ 13109-87, а затем ГОСТ 13109-97. В этих стандартах колебания напряжения характеризовались двумя показателями: размахом изменения напряжения и дозой колебаний (дозой фликера). В 2015 году в действие введен новый стандарт ГОСТ 32144-2013, в котором колебания напряжения характеризуются только одним показателем – дозой фликера.

Рассчитать размах изменения напряжения проще, чем дозу фликера. В связи

с этим до последнего времени наибольшее развитие получили методики расчета размахов напряжения электрической сети, питающей различные потребители с резкопеременной нагрузкой [1, 9]. Аналитические методы расчета дозы фликера также предлагались рядом авторов [5, 7], но широко распространения в практике проектирования они не получили. В настоящее время развитие известных и разработка новых методов расчета дозы фликера в связи с вводом в действие ГОСТ 32144-2013 стали актуальны. Исследования в этом направлении проводятся рядом авторов, например [8].

Ниже описывается предлагаемая авторами методика расчета дозы фликера, возникающего в электрических сетях, питающих асинхронные электродвигатели при стохастическом характере изменения резкопеременных электрических нагрузок. Методика разработана на примере фанерного производства.

Расчет дозы фликера включает в себя выполнение следующих этапов работы, представленных на рис. 1.

Для выполнения первого этапа проектировщику необходимо иметь математические модели электрических нагрузок электроприводов с резкопеременной нагрузкой. Для создания таких моделей исследованы электрические нагрузки электроприводов фанерного производства, работающих в повторно-кратковременном режиме. Результаты исследований показали, что электрические нагрузки основного производства изменяются случайным образом и имеют резкопеременный характер. Графики нагрузок имеют точки экстремума (максимальные и минимальные значения), изменение нагрузок происходит с большой частотой [6]. Выбросы нагрузки электропривода имеют случайную амплитуду и случайную продолжительность. Графики нагрузок активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощностей исследуемых потоков можно классифицировать как периодические нестационарные потоки.

Отсутствие стационарности существенно затрудняет исследование и дальнейшее использование этих графиков. Поэтому авторы статьи предлагают рассматривать эти графики как импульсные случайные процессы со случайными амплитудами,

временем цикла и продолжительностью включения. Как показано в [3, 10, 11], такие процессы являются стационарными, ординарными.

Нами предложено рассматривать графики нагрузок в виде точек экстремумов соответствующих графиков активной и реактивной мощностей, соединенных прямыми линиями. Для расчета дозы фликера необходимо знать численные значения точек экстремумов этих графиков. В связи с этим предлагается описывать графики активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощностей решетчатыми моделями, интерполируемыми сплайн-функциями первой степени.

Например, для графика активной мощности сплайн-функция имеет вид

$$P(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{t=t_i}^{t=t_{i+1}} \left(\frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_i} \cdot P_{(t_i)} + \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} \cdot P_{(t_{i+1})} \right) \quad (1)$$

где n – число циклов, измеренных в результате опыта;

t_i – момент появления i -го экстремума;

t_{i+1} – момент появления $(i+1)$ -го экстремума;

$P_{(t_i)}$, $P_{(t_{i+1})}$ – значение нагрузки в точке экстремума в момент времени t_i и t_{i+1} соответственно.

При анализе электромагнитной совместимости электродвигателей с питающей их сетью нет необходимости знать законы распределения их электрических нагрузок. Для решения этой задачи достаточно знать их основные числовые характеристики – математические ожидания и дисперсию или среднее квадратическое отклонение.

Математические ожидания и средние квадратические отклонения графиков электрических нагрузок также предлагается описывать решетчатыми моделями интерполированными сплайн-функциями первой степени.

В качестве примера на рис. 2 и 3 представлены полигоны математического ожидания $M[P]$ и среднего квадратического отклонения $\sigma[P]$ активной мощности главного привода механизма электроприемника барабанной рубильной машины «Дробилка шпона» фанерного производства. Значения по оси ординат даны в процентах от среднего значения активной мощности в период работы рассматриваемого механизма.

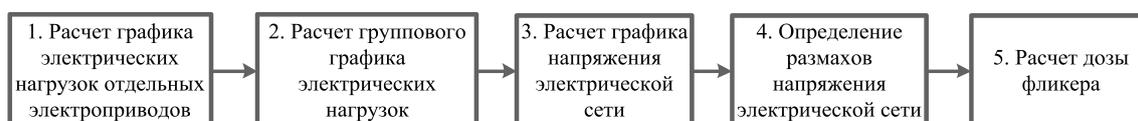


Рис. 1. Этапы расчета дозы фликера

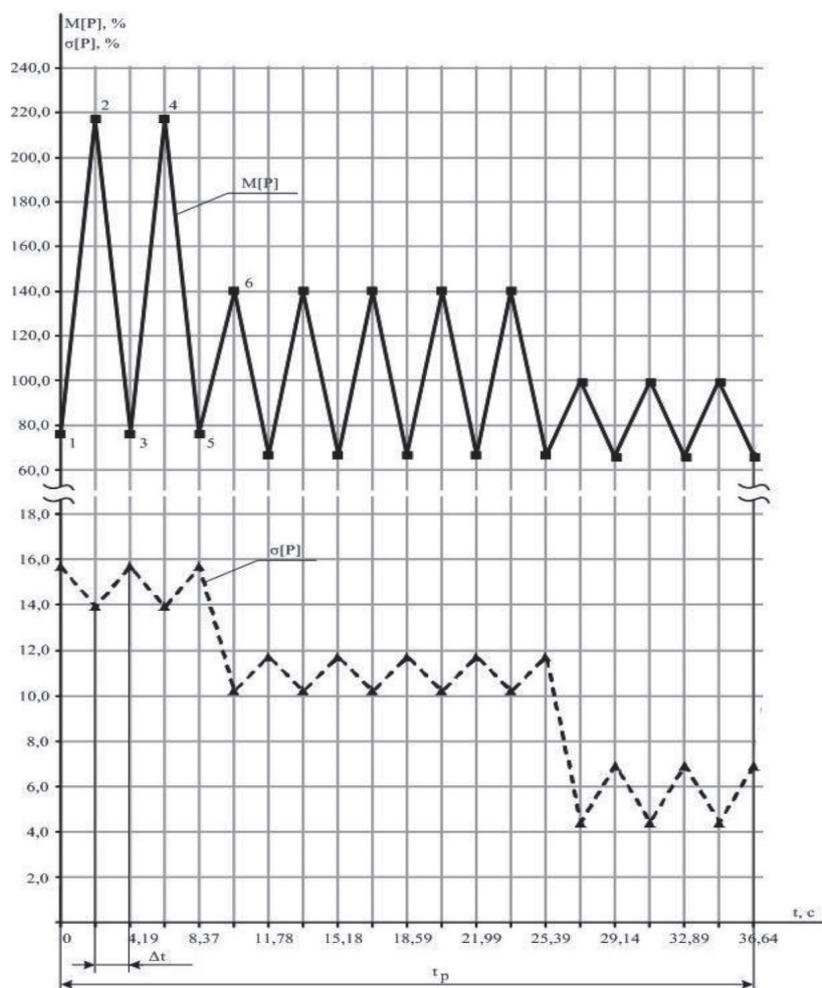


Рис. 2. Полигоны математического ожидания и среднего квадратического отклонения активной мощности рабочего цикла нагрузочной диаграммы электроприемника барабанной рубильной машины «Дробилка шпона» фанерного производства

Напряжения в узлах электрической сети, в какой-либо момент времени $t = t_p$ определяют по известному выражению

$$U(t_i) = U_0 - \Delta U(t_i), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta U(t_i) &= \frac{P(t_i) \cdot r + Q(t_i) \cdot x}{U_0} = \\ &= \Delta U_p + \Delta U_Q = L_p P(t_i) + L_Q Q(t_i), \quad (3) \end{aligned}$$

где U_0 – напряжение на источнике питания, В, r, x – сопротивления электрической сети, Ом, L_p, L_Q – линейные операторы активной и реактивной мощностей.

Таким образом, случайные функции $P(t)$ и $Q(t)$ связаны с потерей напряжения $\Delta U(t_i)$

линейными операторами L_p и L_Q и напряжением $U(t_i)$, также является случайным процессом, который предлагается описывать решетчатой моделью. Числовые характеристики напряжения в узлах решетчатой модели предлагается определять по полученным авторами формулам

$$M[\Delta U(t_i)] = L_p M[P(t_i)] + L_Q M[Q(t_i)], \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D[\Delta U(t_i)] &= L_p^2 D[P(t_i)] + L_Q^2 D[Q(t_i)] + \\ &+ 2L_p L_Q \sigma[P(t_i)] \sigma[Q(t_i)], \quad (5) \end{aligned}$$

где t_i – моменты времени, соответствующие вершинам сплайна, $\sigma[P(t_i)], \sigma[Q(t_i)]$ – среднее квадратическое отклонение функций $P(t)$ и $Q(t)$ в узлах сплайна.

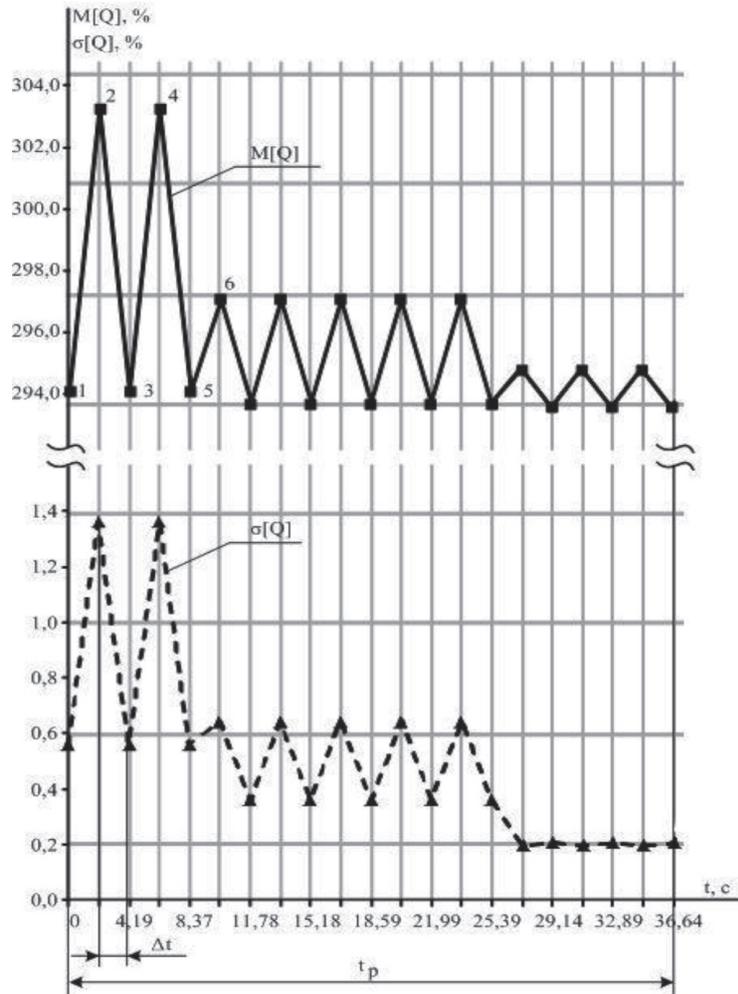


Рис. 3. Полигоны математического ожидания и среднего квадратического отклонения реактивной мощности рабочего цикла нагрузочной диаграммы электроприемника барабанной рубильной машины «Дробилка шпона» фанерного производства

По формулам (4) и (5) определяют числовые характеристики потери напряжения $\Delta U(t_i)$ в узлах сплайна. Количество экстремумов в графике напряжения равно количеству экстремумов в графике активной мощности, а продолжительность импульсов напряжения Δt равна продолжительности импульсов активной мощности.

По графику изменения напряжения определяются числовые характеристики размахов напряжения $\delta U(t_i)$,

$$\delta U(t_i) = |U_i - U_{i+\Delta t}|, \quad (6)$$

$$M[\delta U(t_i)] = M[\Delta U(t_i)] - M[\Delta U(t_i + \Delta t)], \quad (7)$$

$$D[\delta U(t_i)] = D[\Delta U(t_i)] + D[\Delta U(t_i + \Delta t)] - 2K[\Delta U(t_i), \Delta U(t_i + \Delta t)]. \quad (8)$$

Поскольку случайные величины $\Delta U(t_i)$ и $\Delta U(t_i + \Delta t)$ для фанерного производства являются независимыми, то корреляционная функция

$$K[\Delta U(t_i), \Delta U(t_i + \Delta t)] = 0.$$

При этом формула (8) примет вид

$$D[\delta U(t_i)] = D[\Delta U(t_i)] + D[\Delta U(t_i + \Delta t)]. \quad (9)$$

Дозу фликера авторы рассматривают как случайную величину, которая характеризуется основными числовыми характеристиками: математическим ожиданием $M[P_{sti}]$ и дисперсией $D[P_{sti}]$ для каждого момента времени t_i . Используя аналитический метод расчета, предложенный в [4, 5] и основные положения теории вероятности [2], получе-

ны следующие выражения для вычисления $M[P_{sti}]$ и $D[P_{sti}]$,

$$M[P_{sti}] = \varphi(M[\delta U(t_i)], M[\tau]) = \\ = \frac{a}{d_0} M[\delta U(t_i)] - \\ - \frac{b}{d_0} M[\tau] M[\delta U(t_i)] + K_{\delta U, \tau}, \quad (10)$$

где τ – длительность размаха (колебания) напряжения, с,

a, b – коэффициенты, полученные при аппроксимации кривой, определяющей значение коэффициента эквивалентности (F_3), зависящего от формы колебаний напряжения, d_0 – допустимый размах колебаний напряжения, %,

$K_{\delta U, \tau}$ – корреляционный момент,

$M[\tau]$ – математическое ожидание длительности размаха (колебания) напряжения, с.

$$D[P_{sti}] = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \delta U_t} \right)_m^2 D[\delta U_t] + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \right)_m^2 D[\tau] + \\ + 2 \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \delta U_t} \right)_m \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \right)_m \cdot K_{\delta U, \tau} \right], \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial \delta U_t} \right|_m = \frac{a}{d_0} - \frac{b \cdot M[\tau]}{d_0},$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \right|_m = -\frac{b}{d_0} M[\delta U_t].$$

Величина математического ожидания $M[P_{st10}]$ и дисперсии $D[P_{st10}]$ дозы фликера за интервал времени 10 минут, с учетом формул (2, 4, 5), предлагается вычислять по формулам

$$M[P_{st10}] = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n [M^3[P_{sti}] + 3 \cdot (M[P_{sti}] \cdot D[P_{sti}])]}, \quad (12)$$

$$D[P_{st10}] = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{1}{3} \cdot [M^3[P_{sti}]]^{-\frac{2}{3}} \cdot 3 \cdot M[P_{sti}]^2 \right)^2 + D[P_{sti}] \right]. \quad (13)$$

Зная численные значения величин $M[P_{st10}]$ и $D[P_{st10}]$, возможно решить вопросы соответствия требованиям [4], а также выбора методов и параметров устройств для снижения колебаний напряжения.

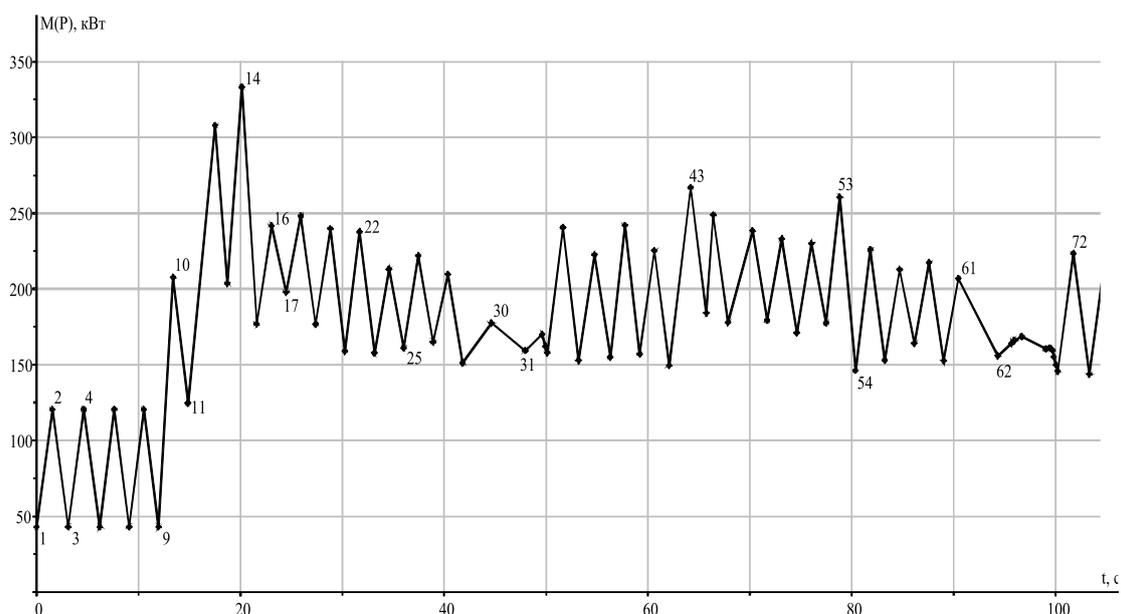


Рис. 4. Фрагмент математической модели группового графика сплайн-функции математического ожидания электрической нагрузки главных приводов механизмов, получающих питание от первой секции шин

В качестве примера использования предложенной методики ниже приводится расчет дозы фликера для секции шин трансформаторной подстанции, питающей фанерное производство. От данной секции получают питание четыре механизма: два лущильных станка, рубительная машина, барабанная рубительная машина «Дробилка карандашей».

Математические модели электрических нагрузок перечисленных механизмов получены на основании выполненных экспериментальных исследований [10]. По разработанной авторами методике, реализованной в виде программы для ЭВМ [11], была получена математическая модель группового графика нагрузки. На рис. 4 приведен фрагмент математического ожидания активной мощности $M(P)$ группового графика нагрузки. Аналогично, авторами были получены групповые графики для математического ожидания реактивной мощности $M(Q)$ и для дисперсии активной $D(P)$ и реактивной $D(Q)$ мощностей.

Ниже приводится пример расчета для двух точек экстремумов (точки 1 и 2, рис. 4) графика напряжения.

В таблице приведены параметры математической модели группового графика нагрузки для экстремумов в точках 1 и 2.

По формуле (4), производится расчет математического ожидания потери напря-

жения $M[\Delta U]$ в точках 1 и 2 группового графика, В,

в точке 1,

$$M[\Delta U_1] = 0,00000375 \cdot 42,96 \cdot 10^3 + 0,0000198 \cdot 3,67 \cdot 10^3 = 0,234,$$

в точке 2,

$$M[\Delta U_2] = 0,00000375 \cdot 120,51 \cdot 10^3 + 0,0000198 \cdot 28,35 \cdot 10^3 = 1,013.$$

В расчетах принято активное сопротивление $r = 0,0015$ Ом; реактивное сопротивление $x = 0,00791$ Ом; напряжение $U_6 = 400$, В; линейный оператор активной мощности $L_p = 0,00000375$; линейный оператор реактивной мощности, $L_Q = 0,0000198$.

Математическое ожидание напряжения электрической сети $M[\Delta U]$ определяется по формуле (2), для момента времени в точке экстремума 1, В,

$$M[U(t_1)] = 400 - 0,234 = 399,766,$$

для момента времени в точке экстремума 2, В,

$$M[U(t_2)] = 400 - 1,013 = 398,987.$$

Математическое ожидание размаха напряжения (формула (7)), В,

$$M[U(t_{1-2})] = 399,766 - 398,987 = 0,779.$$

Математическое ожидание размаха напряжения, %,

$$M[\delta U(t_{1-2})] = \frac{100}{400} \cdot [399,766 - 398,987] = 0,1947.$$

Дисперсия потери напряжения $D[\Delta U]$ в точках экстремума по формуле 5, В², в точке 1

$$D[\Delta U_1] = 0,0000375^2 \cdot 41,07 \cdot 10^6 + 0,0000198^2 \cdot 1,160 \cdot 10^6 + 2 \cdot 0,0000375 \cdot \sqrt{41,07 \cdot 10^6} + 0,0000198 \cdot \sqrt{1,160 \cdot 10^6} = 0,002,$$

в точке 2

$$D[\Delta U_2] = 0,0000375^2 \cdot 51,34 \cdot 10^6 + 0,0000198^2 \cdot 11,303 \cdot 10^6 + 2 \cdot 0,0000375 \cdot 0,0000198 \cdot \sqrt{51,34 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{11,303 \cdot 10^6} = 0,00873.$$

Дисперсия размаха напряжения (формула 8), В²,

$$D[U(t_{1-2})] = 0,002 + 0,00873 = 0,011.$$

Параметры точек экстремумов группового графика нагрузки

Точки экстремумов, i	Математическое ожидание активной мощности, $M(P_i)$, кВт	Математическое ожидание реактивной мощности, $M(Q_i)$, квар	Дисперсия активной мощности, $D(P_i)$, кВт ²	Дисперсия реактивной мощности, $D(Q_i)$, квар ²
1	42,96	3,67	41,07	1,16
2	120,51	28,35	51,34	11,303

Дисперсия размаха напряжения, %,

$$D[\delta U(t_{1-2})] = \left(\frac{100}{400}\right)^2 \cdot 0,011 = 0,0004.$$

Аналогичным образом производится расчет числовых характеристик для остальных точек экстремумов группового графика напряжения электроприводов, получаемых питание от первой секции шин.

Используя полученные в ходе расчетов данные, применяя формулы (10–13), рассчитываются числовые характеристики кратковременной дозы фликера.

Математическое ожидание дозы фликера для размаха 1–2,

$$M[P_{st1}] = \frac{0,841}{2,75} \cdot 0,194 - \frac{0,791}{2,75} \cdot 1,55 \cdot 0,194 = 0,0354.$$

Дисперсия дозы фликера для размаха 1–2,

$$D[P_{st1}] = \left(\frac{0,841}{2,75} - \frac{0,791 \cdot 1,55}{2,75}\right)^2 \times 0,00067 = 2,22 \cdot 10^{-7}.$$

Используя программу, написанную авторами для автоматизации расчетов (проходит процедуру регистрации), производится расчет математического ожидания и дисперсии дозы фликера для остальных размахов. А также данная программа позволяет получить величину кратковременной дозы фликера для интервала времени 10 минут, которая составляет: математическое ожидание – $M[P_{st10}] = 0,294$, дисперсия – $D[P_{st10}] = 0,045$.

Выводы

1. Для расчета колебаний напряжения сети и дозы фликера, создаваемых асинхронными электродвигателями с повторно-кратковременным режимом работы и случайной нагрузкой, предлагается описывать электрические нагрузки и напряжения сети решетчатыми моделями, а их математические ожидания и дисперсии интерполировать сплайн-функциями первой степени.

2. Случайная величина дозы фликера является функцией двух случайных аргументов – размаха изменения напряжения и длительности импульса напряжения. Учитывая это, авторами предложены математические выражения для расчета математического ожидания и дисперсии дозы фликера по числовым характеристикам размаха из-

менения напряжения и длительности импульса напряжения.

3. Предложенную методику расчета дозы фликера рекомендуется использовать для решения методических вопросов и разработки технических мероприятий обеспечения электромагнитной совместимости асинхронных электродвигателей, имеющих резкопеременный характер нагрузки, с питающей их электрической сетью.

Список литературы

1. Вагин Г.Я. Влияние отклонений и колебаний напряжения на качество контактной сварки. Промышленная энергетика. – М., 1982.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятности. – М., 1969. – 576 с.
3. Гайдукевич В.И., Титов В.С. Случайные нагрузки силовых электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.
4. ГОСТ 32144-2013 Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Принят 25.03.2013. – Москва, Стандартинформ, 2014. – 20 с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
6. Калинина Е.А. Исследование электрических нагрузок фанерного производства. // Фёдоровские чтения – 2015. XLV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы, Москва, 11–13 ноября 2015 г. – С. 242–244.
7. Куренный Э.Г. Метод расчета характеристик колебаний стационарных случайных процессов в заводских сетях. Изв.АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1971. – № 6. – С. 147–152.
8. Новоселов Н.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Методика расчета кратковременной дозы фликера в сетях с дугowymi сталеплавильными печами. // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 27–31.
9. Салтыков В.А. Исследование вероятностных характеристик резко-переменных электрических нагрузок и их влияние на качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий. Автореф. дис. . канд. техн. наук. – Л., 1978. – 23 с.
10. Седакин Н.М. Элементы теории случайных импульсных потоков. – М.: Изд-во «Советское радио», 1965.
11. Черепанов В.В., Калинина Е.А. Математические модели резкопеременных нагрузок фанерного производства: материалы 74-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования». Сборник докладов (международные мероприятия) г. Магнитогорск, ФГБОУ ВПО «МГТУ», 18–22 апреля 2016 г.
12. Черепанов В.В., Калинина Е.А., Бессолицын А.В. Расчет группового графика нагрузки, представленного в виде сплайна. Программа ЭВМ. Свидетельство о государственной регистрации программы № 2016619848 от 31.08.2016 г.

References

1. Vagin G.Ja. Vlijanie otklonenij i kolebanij naprjazhenija na kachestvo kontaktnoj svarki. Promyshlennaja jenergetika. M., 1982.
2. Ventcel E.S. Teorija verojatnosti. M., 1969. 576 p.
3. Gajdukevich V.I., Titov V.S. Sluchajnye nagruzki silovyh jelektroprivodov. M.: Jenergoatomizdat, 1983. 160 p.

4. GOST 32144-2013 Mezhgosudarstvennyj standart. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. Prinjat 25.03.2013. Moskva, Standartinform, 2014. 20 p.
5. Zhezhelenko I.V., Saenko Ju.L. Pokazateli kachestva jelektrojenerгии i ih kontrol na promyshlennyh predpriyatijah. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Jenergoatomizdat, 2000. 252 p.
6. Kalinina E.A. Issledovanie jelektricheskikh nagruzok fanernogo proizvodstva. // Fjodorovskie chtenija 2015. XLV Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija s jelementami nauchnoj shkoly, Moskva, 11–13 nojabrja 2015 g. pp. 242–244.
7. Kurennyj Je.G. Metod rascheta harakteristik kolebanij stacionarnyh sluchajnyh processov v zavodskih setjah. Izv.AN SSSR. Jenergetika i transport. 1971. no. 6. pp. 147–152.
8. Novoselov N.A., Nikolaev A.A., Kornilov G.P. Metodika rascheta kratkovremennoj dozy flikera v setjah s dugovymi staleplavilnymi pechami. // Promyshlennaja jenergetika. 2014. no. 1. pp. 27–31.
9. Saltykov V.A. Issledovanie verojatnostnyh harakteristik rezko-peremennyh jelektricheskikh nagruzok i ih vlijanie na kachestvo jelektrojenerгии v setjah promyshlennyh predpriyatij. Avtoref.dis. . kand. tehn. nauk. L., 1978. 23 p.
10. Sedjakin N.M. Jelementy teorii sluchajnyh impulsnyh potokov. M.: Izd-vo «Sovetskoe radio», 1965.
11. Cherepanov V.V., Kalinina E.A. Matematicheskie modeli rezkoperemennyh nagruzok fanernogo proizvodstva: materialy 74-oj Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii «Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrabotki». Sbornik dokladov (mezhdunarodnye meroprijatija) g. Magnitogorsk, FGBOU VPO «MGTU», 18–22 aprelja 2016 g.
12. Cherepanov V.V., Kalinina E.A., Bessolicyn A.V. Raschet gruppovogo grafika nagruzki, predstavlennoho v vide splajna. Programma JeVM. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy no. 2016619848 ot 31.08.2016 g.