

Энергетика . Автоматика

УДК 621.311

Мясоедов Юрий Викторович

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

e-mail: myv@amursu.ru**Савина Наталья Викторовна**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

e-mail: nataly-savina@mail.ru**Myasoedov Yuriy Victorovich**

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: myv@amursu.ru**Savina Natalia Victorovna**

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: nataly-savina@mail.ru**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ИСКАЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ АДАПТИВНОГО
УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****MODELING OF CURRENTS OF DISTRIBUTED SOURCES OF POWER
QUALITY DISTORTION FOR ADAPTIVE POWER QUALITY CONTROL**

Аннотация. В современных энергосистемах и в настоящее время, и при цифровой трансформации и интеллектуализации ухудшается качество электроэнергии. Отличительный признак – увеличение в них доли распределенных источников искажения качества электроэнергии. Выделены инновационные технологии, применение которых сопряжено с появлением новых распределенных источников искажения качества электроэнергии. Предложена обобщенная модель тока распределенных источников искажения качества электроэнергии и ее частные случаи для адаптивного управления качеством электроэнергии при разных видах неопределенности информации. Частные модели разработаны на основе совокупного использования вейвлет-анализа, теории случайного процесса и нечетких множеств.

Abstract. In modern energy systems, both at the present time and with digital transformation and intellectualization, the quality of electricity is deteriorating. A distinctive feature is the increase in the share of distributed sources of electricity quality distortion in them. Innovative technologies are identified, the use of which is associated with the emergence of new distributed sources of electricity quality distortion. The principle of constructing a generalized model is based on the selection of periodic components from a non-stationary random process due to the change in current over time, harmonics of direct and reverse sequence currents, a stationary random process with zero mathematical expectation, differentiable correlation functions and random noise. Particular models are developed on the basis of the combined use of wavelet analysis, random process theory and fuzzy sets.

Ключевые слова: качество электроэнергии, распределенный источник, адаптивное управление, ток, вейвлет-анализ, случайный процесс, нечеткое множество.

Key words: power quality, distributed source, adaptive control, current, wavelet analysis, random process, fuzzy set.

DOI: 10.22250/20730268_2023_103_28

Введение

В современных энергосистемах с нелинейной и несимметричной нагрузкой качество электроэнергии (КЭ), как правило, низкое. Это негативное явление для них, так как снижает функциональную надежность и эффективность работы. Наблюдаются заметный рост потерь электрической энергии, резкое сокращение срока службы электроустановок и кабельных линий, отказы и ложные срабатывания релейной защиты и автоматики, цифровых устройств, используемых как в энергосистемах, так и потребителями. Искажается и теряется информация при диспетчерском и технологическом управлении, становится недостоверным учет электроэнергии.

В то же время в России наблюдается усиление инновационной активности в энергетике, нормативно этот процесс закреплен в [1]. Ее ключевой аспект – цифровая трансформация и интеллектуализация электроэнергетики. Можно выделить инновационные технологии, применение которых повлечет за собой ухудшение КЭ, это возобновляемые источники и накопители энергии; электромобили; распределенная генерация; ряд технологий, придающих электрическим сетям свойства активно-адаптивных сетей. Данный факт подтверждается их принципом действия и конструктивными особенностями [2–6].

Исходя из сказанного, необходимы мониторинг и управление КЭ.

Особенность энергосистем в плане КЭ – множество источников его искажения со случайным изменением параметров режима, распределенных как во времени, так и территориально. Это обуславливает нестабильность показателей КЭ, которые представляют собой многомерные случайные процессы. Несмотря на то, что проблеме КЭ посвящено достаточно большое количество работ, в которых рассматриваются задачи его нормирования, оценка влияния низкого качества электроэнергии на объекты электроэнергетики и потребителей, технические средства и схемы решений, направленные на улучшение КЭ [например, 7–11], вопросы моделирования токов источников искажения КЭ с целью адаптивного управления им требуют развития.

Постановка задачи

Выбор эффективных мероприятий, параметров и законов управления технических средств улучшения КЭ, обеспечение условий электромагнитной совместимости для надежного функционирования электрических сетей энергосистем во многом предопределяются исходной информацией о режимах работы источников искажения КЭ. Различают стационарные и распределенные источники искажения качества электроэнергии (РИ). Стационарные источники не меняют своего территориального положения. Примером служат дуговые сталеплавильные печи, прокатные станы и т.п. Под распределенными понимаются такие источники искажения КЭ, положение которых меняется в пространстве (территориально), а режимы работы – случайным образом во времени. Ярким примером таких источников является электрифицированный железнодорожный транспорт – нечеткое множество электровазов, питание привода которых осуществляется однофазным переменным током, преобразуемым в постоянный посредством выпрямительных устройств, установленных непосредственно на электровазах.

Каждая тяговая подстанция, являясь источником искажения КЭ с постоянно изменяющейся нагрузкой (генератор), в то же время принимает высшие гармонические составляющие тока от соседних тяговых подстанций (рецептор). Все это обуславливает нестабильность показателей КЭ в элек-

трических сетях энергосистем, питающих тяговую нагрузку. При цифровизации и интеллектуализации электрических сетей доля распределенных источников искажения качества электроэнергии увеличится, при этом для моделирования их токов можно в качестве аналога взять электрические сети с тягой переменного тока, так как каждый источник распределенной генерации, являясь генератором высших гармоник тока и интергармоник, токов обратной последовательности, в то же время является рецептором, принимая искажающие токи от других источников распределенной генерации.

Методический подход одинаков. Для определения закономерностей их изменения прежде всего необходимо знать, как меняется ток совокупности распределенных источников искажения качества электроэнергии (РИ).

Режимная информация таких источников зависит от множества факторов: числа поездов на перегоне, графика движения, расположения поездов относительно друг друга, географических особенностей местности, электропотребления по пути движения и т.п. Эта информация обладает неопределенностью. В общем случае для анализа КЭ необходимо учитывать следующие виды неопределенностей: неполнота, недостоверность, нечеткость, неточность, ненадежность. В зависимости от видов неопределенности можно выделить четыре группы информации: детерминированная, вероятностная, нечеткая, интервальная.

Детерминированное представление информации о состоянии РИ для его анализа должно отражать наиболее вероятное (для стохастического описания режимных параметров), наиболее желательное (нечеткое описание) или среднее (интервальное описание) из множества значений, которые может принимать ток РИ. Как правило, детерминированная информация выражается номинальным током тягового трансформатора на подстанции или, в лучшем случае, его долей, идущей на питание контактной сети, которая задается произвольно, исходя из эмпирических наблюдений, или определяется по соотношению электропотребления обмоток средней и низкой стороны трансформатора. Такой подход не раскрывает физической природы режима работы РИ и возможен только при большой степени неопределенности.

Вероятностная информация отражает случайный характер изменения тока распределенных источников, их физическую природу. Исследуя статистику случайных процессов при полном объеме достоверного информационного потока, можно определить закономерности изменения узлового тока тяговой подстанции, найти характеристики случайного процесса и получить модель эквивалентного тока тяговой нагрузки или тока каждого источника распределенной генерации, каждого ВИЭ. При отсутствии достаточного объема статистических выборок, либо при потере информации, либо при ее нечеткости или недостоверности определение вероятностных характеристик случайного процесса затруднительно. Тогда информация является нечеткой. В этом случае модель тока может быть получена сочетанием теории случайных процессов и нечетких множеств.

Если закон распределения случайного процесса неизвестен и найти его не предоставляется возможным из-за неопределенности исходных данных либо их неполноты, связанной с отсутствием соответствующих измерительных средств или системы сбора и обработки информации, то модель тока распределенного источника можно получить, обрабатывая информационный поток с помощью интервального анализа. В данном случае определяются вероятностные интервалы, в которые входят исследуемые токи. При этом учитывается степень зависимостей, – например, между участвующими в суммарной нагрузке подстанции интервальными объектами – электровозами.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что исходная информация, на основе которой принимается решение о КЭ и выборе технических средств, места их установки и режимах работы, является неполной и неточной. Неполнота и недостоверность обусловлены физическими, техническими и эргономическими факторами, что необходимо учитывать при моделировании тока распределенных источников искажения. В зависимости от степени полноты и достоверности информации и должна выбираться эта модель.

Разработка модели тока распределенного источника искажения качества электроэнергии

Обобщенная модель тока РИ должна строиться на основе выделения из нестационарного случайного процесса периодических составляющих, обусловленных изменением тока во времени, гармонических составляющих, вызываемых выпрямлением тока, стационарного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием, дисперсией, дифференцируемыми корреляционными функциями и случайной помехи. Она имеет вид:

$$I(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} \cos(\omega_{mn}t + \varphi_{mn}) + \sum_{n=2}^N I_{2n} \cos(\omega_{2n}t + \varphi_{2n}) + I(t) + I_{ai}(t) + \xi, \quad (1)$$

где I_{mn} , ω_{mn} , φ_{mn} – соответственно амплитуда, частота и фаза m -й периодической составляющей (период во времени) n -й гармоники тока прямой последовательности; I_{2n} , ω_{2n} , φ_{2n} – соответственно амплитуда, частота и фаза n -й гармонической составляющей тока обратной последовательности; m – номер гармоники во времени; n – номер гармоники по частоте; M – число учитываемых гармоник по времени; N – число учитываемых частотных гармоник; $I(t)$ – стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием; $I_{ai}(t)$ – математическое ожидание тока – среднее значение за рассматриваемый период; ξ – случайная помеха, представляющая собой шум. Это может быть белый шум, мощность которого не зависит от частоты, а автокорреляционной функцией является δ -функция Дирака либо Гауссов шум. Согласно центральной теореме, сумма произвольных случайных процессов стремится к Гауссову процессу при возрастании числа слагаемых. При этом сходимость настолько быстра, что при числе слагаемых 5 или 6 результирующий процесс очень близок к Гауссову.

В зависимости от степени неопределенности и группы информационного потока обобщенная модель тока может принимать различные частные формы.

Для получения дискретной модели тока непрерывный процесс его изменения заменяется дискретной последовательностью выборок с некоторым временным интервалом Δt , по которой с заданной точностью можно восстановить исходный процесс.

При этом целесообразно применять неравномерное квантование, т.е. Δt – переменная величина. Процесс квантования описывается уравнением:

$$I_k(t) = I_k = N(t_k)\Delta\sigma(t - t_k), \quad (2)$$

где $I_k(t)$ – квантованный параметр; $N(t_k)$ – число квантов; $\Delta\sigma(t - t_k)$ – единичная функция, а оптимальная величина интервала дискретизации определяется с помощью теоремы Котельникова [14, 15].

Тогда токовую нагрузку можно описать дискретно. При этом каждая гармоническая составляющая как прямой, так и обратной последовательности тока представляется дискретной последовательностью:

$$I_k = I(k). \quad (3)$$

На интервалах стационарности корреляционная функция имеет вид:

$$R_k = MI_{m+k}\bar{I}_k = R, \quad (4)$$

а спектральная плотность равна

$$f(\lambda) = (2\pi)^{-1} \sum_k e^{j\lambda k} R(k), \quad (5)$$

где $\lambda \in [-\pi; \pi]$.

В этом случае модель тока каждой гармоники прямой и обратной последовательности при ее спектральном представлении имеет вид:

$$I_k = \int_{-\pi}^{\pi} e^{j\lambda k} f(\lambda) d\omega(\lambda), \quad (6)$$

а эквивалентное значение тока РИ определяется как среднеквадратичное значение сумм, полученных выше моделей:

$$I(t) = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_{k_{n1}}^2 + \sum_{n=1}^N I_{k_{n2}}^2}, \quad (7)$$

где $I_{k_{n1}}$ – модель тока n -й гармоники прямой последовательности; $I_{k_{n2}}$ – то же, но обратной последовательности.

С учетом временных гармонических составляющих ток первой и высших гармоник как прямой, так и обратной последовательностей может быть описан моделью, полученной с помощью формулы Котельникова:

$$I(t) = \sum_k \frac{\sin \pi(t-k)}{\pi(t-k)} I_k, \quad (8)$$

корреляционная функция которой имеет вид:

$$R(t) = \sum_n \frac{\sin \pi(t-k)}{\pi(t-k)} R_k. \quad (9)$$

При полном и достоверном информационном потоке частным случаем обобщенной модели (1) является модель, полученная в [16] и представленная стационарным случайным процессом и помехой:

$$I(t) = I_{ai(t)} \sqrt{1 + \gamma^2 R(\tau)} \times (1 + K_{nsl(t)})(1 + K_{2l(t)}) + \xi, \quad (10)$$

где γ – коэффициент вариации случайного процесса; $R(\tau)$ – нормированная корреляционная функция; K_{nsl} – случайный процесс изменения коэффициентов несинусоидальности тока; K_{2l} – случайный процесс изменения коэффициента обратной последовательности тока.

Модели случайных процессов изменения показателей качества электроэнергии, разработанные в [17], полностью подходят для исследования тока распределенных источников.

Возможен другой подход к реализации тока РИ при вероятностном представлении информации – применение вейвлет-анализа в сочетании с теорией случайных процессов. При исследовании нестационарных случайных процессов изменения тока РИ, не имеющих четкого периодического характера (это видно из рис.1), наиболее эффективно использовать не тригонометрические, а некоторые локализованные во времени компактные базисы, коэффициенты разложения по которым сохраняют информацию об изменении параметров аппроксимируемого процесса – вейвлеты.



Рис. 1. Корреляционная функция тока.

В отличие от классических преобразований Фурье, вейвлет-анализ имеет базис функций, локализованных и по времени, t , и по частоте f . В результате случайный процесс можно анализировать одновременно в физическом и частотном пространствах. При этом физическое пространство представляется временем, координатой и может отражать как изменение процесса во времени, так и территориально, – например, в фидерной зоне (положение электровозов относительно тяговой подстанции и относительно друг друга). Процесс изменения тока, представленный в системе базисных функций вейвлета, можно записать в виде обобщенного ряда Фурье, подбирая для каждого практического случая наиболее эффективный вейвлет. По своему смыслу вейвлет-преобразование полностью соответствует преобразованию Фурье, но ядром интегрального преобразования вместо экспоненциальной функции $e^{-j\omega t}$ служит вейвлет $\Psi(t, a)$, где a – масштаб осцилляции. Использование вейвлетов дает возможность сократить объем информации, необходимой для выявления закономерностей случайно-

го процесса, и снизить погрешность при его аппроксимации за счет учета случайных выбросов и провалов нагрузки.

При плавном изменении процесса на определенном интервале времени вейвлет растягивается по оси t или x (координата) и на нем проводится анализ, и, наоборот, при резком изменении (выброс или провал) – вейвлет сжимается до интервала выброса или провала.

В данном случае модель тока РИ представляется через коэффициенты вейвлет-преобразования и базис-вейвлетов:

$$I(t) = \frac{1}{\|\Psi_{xa}(t)\|} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_I(x, a) \Psi_{xa}(t) dadx, \quad (11)$$

где $a = \frac{1}{f_n}$, f_n – частота гармонических составляющих, включая и первую гармонику; x – аналог координат времени t , характеризующий изменение тока во времени; $\Psi_{xa}(t)$ – вейвлет произвольной формы; $W_I(x, a)$ – вейвлет-преобразование – функция двух аргументов – x и a .

При фиксированном значении a распределение $W_I(x, a)$ является сверткой исходного процесса изменения тока $i(t)$.

В качестве примера показан вейвлет-анализ непериодического случайного процесса изменения тока тяговой нагрузки при помощи вейвлета «Сомбреро» (Mexican hat), который является второй производной гауссиана и имеет вид:

$$\Psi(x) = (x^2 - 1)e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (12)$$

Как было сказано, переменная x – время.

Для каждой пары x и a структура вычисления вейвлет-преобразования $W_I(x, a)$ следующая: вейвлет $\Psi(x)$ растягивается (сжимается) в a раз по горизонтали и в $1/a$ по вертикали; полученная функция сдвигается в точку анализа случайного процесса на временной оси, x_i – данный вейвлет обозначается $\Psi_{x,a}$; усредняются значения исследуемого процесса в окрестности точки a (величина, обратная частоте) при помощи вейвлета $\Psi_{x,a}$; определяется вейвлет-преобразование токовой нагрузки с помощью произвольной функции вейвлета $\Psi(x)$:

$$W_I(x, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi\left(\frac{t-x}{a}\right) I(t) dt. \quad (13)$$

Распределение значений $W_I(x, a)$ строится в осях x, a : по горизонтали – переменная x (время или координата в пространстве), по вертикали – a . Далее строятся графики вейвлета $\Psi(x)$ при разных значениях x и a , осуществляется их обработка с исследуемым процессом. Методика такого вейвлет-анализа подробно приведена в [18].

Величина любого коэффициента $W_I(x, a)$ показывает, насколько характерный период колебаний a , соответствующий анализируемым частотам, представлен в точке в окрестности исследуемого момента времени x .

Таким образом, вейвлет-преобразование $W_I(x, a)$ содержит информацию о частотных и временных свойствах реализаций случайного процесса одновременно, что позволяет изучать случайные процессы более детально, чем использование Фурье-преобразований. Данный анализ можно реализовать в системе MATLAB.

В общем виде вейвлет-преобразование состоит из двух основных этапов: разложения исследуемого процесса, т.е. нахождение коэффициентов разложения, их анализ, и восстановление процесса по набору коэффициентов вейвлет-разложения.

Схема построения модели тока в пакете прикладных программ (ППП) MATLAB следующая.

1. Выбирается наиболее эффективный тип вейвлета $\Psi_0(t)$ для рассматриваемого процесса, – например, вейвлет Добеши, гауссовский вейвлет, вейвлет "Mexican hat", Морле и др.

При этом вейвлет $\Psi(x) \in L^2(\mathbf{R})$ должен удовлетворять условию:

$$C_\Psi = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\Psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty. \quad (14)$$

Если $\Psi(x) \in L^1(\mathbf{R})$, то $\hat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) dx = 0$.

2. Выбираются значение масштабного коэффициента a и параметр смещения (позиции) x .

3. Определяются вейвлет-коэффициенты тока нагрузки, соответствующие выбранным значениям a и x , по формуле (13) по алгоритму [18].

Токовая нагрузка распределенного источника задается выборкой значений $\{I_k\}$. Объем выборки определяется интервалом дискретизации, найденным с помощью теоремы Котельникова, и периодом наблюдения. В качестве тока берется кусочно-постоянная функция

$$I(t) = I(k\Delta t) = I_k \quad (15)$$

при $t \in [k\Delta t, (k+1)\Delta t]$.

Значения параметра x определяются шагом Δt :

$$x = 1:l, \quad l = \text{length}(I). \quad (16)$$

Так как аргумент t имеет дискретные значения, определенные шагом Δt , то используется вейвлет

$$\tilde{\Psi}(t) = \Psi_0(t/\Delta t) \quad (17)$$

с носителем на промежутке $[0, N\Delta t]$. Здесь $\Psi_0(t/\Delta t)$ – выбранный в пункте 1 вейвлет с дискретным представлением аргумента.

Носитель вейвлета $\tilde{\Psi}\left(\frac{t-x}{a}\right)$ находится на промежутке $[x, x + aN\Delta t]$, коэффициенты рассчитываются при $x = n\Delta t$ по формуле

$$C_{x,a} = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{k \geq n} I_k \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \tilde{\Psi}\left(\frac{t-x}{a}\right) dt = \sqrt{a}\Delta \sum_{k=n}^{k=n+[aN]+1} I_k C_k(a, x), \quad (18)$$

где для $x = n\Delta t$ коэффициенты $C_k(a, x)$ имеют вид:

$$C_k(a, x) = \Psi\left(\frac{k+1-n}{a}\right) - \Psi\left(\frac{k-n}{a}\right). \quad (19)$$

Здесь $\Psi(t)$ – первообразная выбранного вейвлета. Если вейвлет $\Psi_0(t)$ принимается из MATLAB, то его первообразная находится при помощи команды «intwave».

4. Используя формулу обращения, можно получить модель токовой нагрузки:

$$I(t) = C_\Psi^{-1} \iint_{\mathbf{R}^2} W_I(x, a) \Psi\left(\frac{t-x}{a}\right) \sqrt{a^{-1}} \frac{da dx}{a^2}, \quad (20)$$

где $C_\Psi = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\Psi}(\omega)|^2 d\omega$ вычисляется по вейвлету $\Psi(t)$.

При нечетком задании исходной информации выбор подхода к моделированию токов зависит от вида неопределенности. Например, при ее определении в фидерной зоне количество электровозов можно задавать нечетким множеством. При исследовании нестационарных случайных процессов изменения тока тяговой нагрузки подстанции математическое ожидание каждой реализации тока n -й гармоники, включая первую, можно определять с помощью множественной регрессии с нечеткими коэффициентами. Эти коэффициенты находятся с помощью α -сечений или другим известным из теории нечетких множеств методом [19]:

$$I_{\text{сп}_n}(t) = \sum_1^M \tilde{a}_i I_{in}. \quad (21)$$

Если неопределенность обусловлена неполнотой информации, то моделирование тока осуществляется совместным применением теории случайных процессов и нечетких множеств. Сначала осуществляется восстановление информации об изменении тока. Его порядок следующий.

1. Выбираются множества значений трех реализаций случайного процесса: двух ретроспективных (полные потоки информации) и текущей (поток с неполной исходной информацией). Текущее множество нужно восстановить. Ретроспективные множества обозначаются I^{P1} , I^{P2} ; текущее или восстанавливаемое – I^{B} . Эти множества задаются относительными значениями.

2. Для каждого выбранного множества строится колоколообразная (bell – shaped) функция принадлежности.

$$f_n(I) = \frac{1}{1 + \left| \frac{I-c}{a} \right|^{2b}}, \quad (22)$$

где a, b, c – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношения: $a < b < c$, причем $b > 0$, или функция плотности нормального распределения в предположении, что $\sqrt{2\pi\sigma} = 1$, задаваемая аналитическим выражением

$$f_n(I) = e^{-\frac{(I-c)^2}{2\sigma^2}}, \quad (23)$$

где c – математическое ожидание реализации случайного процесса (рассматриваемого множества); σ – ее среднее квадратическое отклонение.

Построение графиков функций принадлежности осуществляется в среде fuzzy – TECH MATLAB [20].

3. Рассчитывается относительное расстояние Хемминга по выражениям

$$\begin{aligned} \delta(\underline{I}^{P1}, \underline{I}^b) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_n(I_i^{P1}) - f_n(I_i^b)| \\ \delta(\underline{I}^{P2}, \underline{I}^b) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_n(I_i^{P2}) - f_n(I_i^b)| \\ \delta(\underline{I}^{P2}, \underline{I}^{P1}) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_n(I_i^{P2}) - f_n(I_i^{P1})|, \end{aligned} \quad (24)$$

где $0 \leq \delta(\underline{I}^{P1}, \underline{I}^b) \leq 1$; $0 \leq \delta(\underline{I}^{P2}, \underline{I}^b) \leq 1$; $0 \leq \delta(\underline{I}^{P2}, \underline{I}^{P1}) \leq 1$.

4. В зависимости от значений относительного расстояния Хемминга восстанавливаемое текущее множество заполняется значениями либо первого, либо второго ретроспективного множества. Сравнение обобщенных относительных расстояний Хемминга $\delta(\underline{I}^{P1}, \underline{I}^b)$, $\delta(\underline{I}^{P2}, \underline{I}^b)$, $\delta(\underline{I}^{P2}, \underline{I}^{P1})$ позволяет определить степень близости одного нечеткого множества к другому. Если $\delta(\underline{I}^{P1}, \underline{I}^b) < \delta(\underline{I}^{P2}, \underline{I}^b)$, то $\underline{I}^b \subset \underline{I}^{P1}$.

Нахождение расстояния между i значениями тока нечетких множеств \underline{I}^b и \underline{I}^{P1} для данного случая позволяет выбрать наиболее достоверное восстанавливаемое значение:

$$\alpha(\underline{I}^b, \underline{I}^{P1}) = \max[f_n(I_i^b) f_n(I_i^{P1})] - \min[f_n(I_i^b) f_n(I_i^{P1})]. \quad (25)$$

Если $\alpha(\underline{I}^b, \underline{I}^{P1}) < 0,5$, то выбирается значение \underline{I}_i^b , в противном случае \underline{I}_i^{P1} .

Полученная совокупность значений тока моделируется рассмотренными выше способами.

Область применения модели тока распределенного источника искажения качества электроэнергии

Учитывая разнообразие распределенных источников искажения качества электроэнергии, стохастический характер их работы, а также высокую степень неопределенности функционирования энергосистем, следует не только осуществлять мониторинг качества электроэнергии, но и адаптивное управление им в электрических сетях.

Под адаптивным управлением качеством электроэнергии понимается такое управление, при котором, используя результаты мониторинга КЭ в адаптивном режиме, автоматически осуществляется управляющее воздействие, направленное на улучшение КЭ, причем доза управляющего воздействия выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальный эффект от ее ввода. Для этого необходимо иметь модели тока РИ, адекватные результатам мониторинга КЭ, т.е. качеству информации о токовой нагрузке РИ.

Предложенные модели тока (обобщенная и частные случаи) позволяют разработать и реализовать алгоритмы адаптивного управления качеством электроэнергии. При этом в алгоритме адаптивного управления КЭ должен присутствовать блок выбора соответствующей модели в зависимости от качества информации по анализируемому РИ, а результаты обработки токов являются основой для выбора узла для ввода управляющего воздействия и дозы управляющего воздействия.

Заключение

1. Показано, что при переходе электроэнергетики на новую технологическую платформу, основанную на цифровизации и интеллектуализации электрических сетей, в энергосистемах увеличится не только доля распределенных источников искажения качества электроэнергии, но и типы таких источников. В то же время для их описания можно использовать единый методический подход. В качестве примера он показан для тяги переменного тока.

2. В зависимости от видов неопределенности выделены четыре группы информации, используемой для моделирования токов распределенных источников качества электроэнергии. Дан их анализ.

3. Получена обобщенная модель тока распределенных источников искажения качества электроэнергии и ее частые случаи при различных группах исходной информации.

4. Показано, как можно моделировать токи гармоник, генерируемых распределенными источниками искажения качества электроэнергии, на основе совокупного применения теории случайных процессов и вейвлет-анализа, теорий случайных процессов и нечетких множеств с использованием ППП MATLAB.

1. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 г. № 1523-р [Электронный ресурс]: URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения: 15.03.2022 г).

2. Smart Grids – основы и технологии энергосистем будущего / пер. с англ.; под общ. ред. Н.И. Воропая. – М.: Изд. дом МЭИ, 2017. – 461 с.: ил. – ISBN 978-5-383-01228-4.

3. Инновационная электроэнергетика-21 / под ред. В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая. – М.: ИЦ «Энергия», 2017. – 584 с. ISBN (print): 978-5-98908-457-9.

4. Елистратов, В.В. Возобновляемая энергетика. – Изд. 2-е, доп. – СПб.: Наука, 2013. – 307 с.: ил. – ISBN 978-5-02-038220-6.

5. Велькин, В.И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, 2015. – 226 с. – ISBN 978-5-321-02460-7. – EDN WNXMSV.

6. Булатов, Ю.Н. Распределенная генерация и энергетические роутеры в системах электроснабжения железных дорог / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, Г.О. Арсентьев. – Москва-Берлин: ООО «Директмедиа Паблишинг», 2020. – 172 с. – ISBN 978-5-4499-0083-8. – EDN PHWLQH.

7. Электромагнитная совместимость потребителей / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк [и др.] – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.

8. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с. – ISBN 978-5-283-033-07-5.

9. Бадер, М.П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с. – ISBN 5-89035-065X.

10. Управление качеством электрической энергии. Сборник трудов Международной научно-практ. конф. Москва, 23-25 ноября 2016 г. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2017. – 300 с. – ISBN 978-5-905486-14-2. – EDN ZSHUCH.

11. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев [и др.], под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 319 с. – ISBN 5-903072-13-5. – EDN QMJCZZ.

12. Смирнов, С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения – Новосибирск: Академический научно-

изд. производственно-полиграф. и книгораспространительский центр «Наука», 2010. – 326 с. – ISBN 978-5-02-023320-1. – EDN QMLHNP.

13. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.А. Любченко, А.В. Черепанов. – Москва-Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 184 с. – ISBN 978-5-4499-1580-1. – EDN KIUCMZ.

14. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Учеб. для студентов вузов по специальности «Радиотехника» – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2003 (ГУП ИПК Ульян. Дом печати). – 462 с. – ISBN 5-06-003843-2 (в пер.).

15. Нефедов, В.И. Основы радиоэлектроники и связи. Учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», направления подготовки «Проектирование и технология электронных средств» / В.И. Нефедов, А.С. Сигов; под ред. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2009. – 735 с.: ил. – ISBN 978-5-06-006161-1.

16. Савина, Н.В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях / отв. ред. Н.И. Воропай; Российская акад. наук, Сибирское отд., Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, М-во образования и науки Российской Федерации, Амурский гос. ун-т. – Новосибирск: Наука, 2008. – ISBN 978-5-02-023222-8.

17. Savina, N.V. Modelling of parameters of the electric power quality characterizing non-sinusoidal and asymmetry of voltage // 6th International conference Electrical power quality and utilization. September 19-21, 2001. – Cracow, Poland. – P.173-178.

18. Смоленцев, Н.К. Введение в теорию вейвлетов. – М.; Ижевск: РХД, 2019. – 292 с. – ISBN 978-5-4344-0748-9.

19. Борисов, В.В., Федулов, А.С., Зернов, М.М. Основы теории нечетких множеств. Учебное пособие для вузов. Серия «Основы нечеткой математики». – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – ISBN: 978-5-9912037-1-5.

20. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 719 с.: ил. – ISBN 5941570872.