Оценка и нормирование несимметрии напряжений в системах электроснабжения общего назначения

КУРЕННЫЙ Э.Г., ДМИТРИЕВА Е.Н., ЛЮТЫЙ А.П., СИДОРЕНКО О.А.

Рассматривается проблема обеспечения достоверности и универсальности показателей несимметрии напряжений. Предлагается оценивать электромагнитную совместимость путем моделирования воздействий несимметрии на электроприемники. Для целей нормирования вводятся понятия долго- и кратковременной доз несимметрии.

Ключевые слова: *электроэнергия, электромагнитная совместимость, несимметрия, моделирование, доза несимметрии.*

The problem of guarantee of reliability and universality of nonsymmetry indexes is considered. For estimation of EMC by modeling of nonsymmetry influences on electrical equipment is proposed. For the purpose of standardization the conceptions of long- and short-time doses of nonsymmetry are introduced.

Key words: *EMC, nonsymmetry, EMC models, dose of nonsymmetry.*

Показатели электромагнитной совместимости (ЭМС) должны отражать негативные последствия воздействия помех: дополнительные потери мощности, сокращение срока службы и др. Первоначально допустимость несимметрии напряжений (помехи) оценивалась только величиной коэффициента несимметрии, что корректно лишь при неизменных помехах, поскольку в этом случае потери мощности и эффекты дополнительного нагрева связаны с ним функционально. В [1] при измерениях в действующих электрических сетях учитывается еще и длительность T_{VS} воздействия помехи, которая принята равной 3 с.

Однако такой кумулятивный принцип[1] не обеспечивает физический смысл и универсальность оценок ЭМС. Действительно, операция квадратичного трехсекундного осреднения описывает нагрев гипотетического электроприемника с активной входной проводимостью и не

[1] Принцип сформулирован в [2], но впоследствии авторы показали его некорректность, перейдя к «инерционному» принципу [3], который принят и здесь.

реализуемыми на практике тепловыми свойствами: при его включении на постоянную помеху происходит адиабатический нагрев с линейным возрастанием температуры, через 3 с все выделяющееся тепло начинает полностью отдаваться в окружающую среду при неизменной температуре электроприемника, а при отключении температура в течение 3 с линейно убывает до температуры окружающей среды.

Достоверность оценки ЭМС обеспечивается путем моделирования воздействий помех на электрооборудование [4]. В полной мере такой подход реализован в [5] и [6] для показателей колебаний и несинусоидальности напряжения. Здесь этот общий принцип используется для оценки несимметрии напряжений. Для краткости рассматривается лишь трехпроводная система, но все выводы можно распространить и на четырехпроводные системы.

В стандарте [1] нормы устанавливаются в точках общего присоединения, а в стандартах вида [7] (ранее – и в ГОСТ 13109-67) – на зажимах электроприемников. Задача обеспечения ЭМС является оптимизационной: при выполнении ограничений сопоставляются ущерб от несимметрии напряжений и затраты на средства ее уменьшения. При определении ущерба необходимо использовать модели конкретного электрооборудования, а в нормировании в точках общего присоединения – «стандартных» электроприемников (термин из [6]).

Несимметричная компонента. Декомпозиция несимметричной системы линейных токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ (или напряжений) требуется для оценки дополнительных потерь мощности и дополнительного нагрева от несимметрии. Понятие несимметрии не является абсолютным, а зависит от способа декомпозиции. Далее используется традиционная трактовка несимметрии как системы токов обратной последовательности:

$$\underline{I}_{2A} = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_A + a^2\underline{I}_B + a\underline{I}_C\right), \quad \underline{I}_{2B} = a\underline{I}_{2A}, \quad \underline{I}_{2C} = a^2\underline{I}_{2A}, \tag{1}$$

где $a = \exp\{j120°\}$ – оператор трехфазной системы при $j = \sqrt{-1}$. В приложении приведен другой способ декомпозиции.

Условность метода симметричных составляющих очевидна: несимметрия есть симметричная система (1). Поэтому в ряде случаев раздельное рассмотрение прямой и обратной последовательностей не всегда возможно. Проиллюстрируем это на примере двух вариантов канализации электроэнергии: тремя одножильными кабелями или одним трехжильным. Для простоты рассмотрим неизменную во времени однофазную нагрузку $\underline{I}_A = -\underline{I}_B$, считая активные сопротивления *r* жил кабелей одинаковыми.

В первом варианте критичным является нагрев наиболее нагруженного кабеля, который обусловлен потерями активной мощности в фазе *A* или *B*:

$$\Delta P_A = \Delta P_B = I^2 r, \tag{2}$$

где *I* – модуль тока фазы *A* или *B*. Для определения доли $\langle \Delta P_2 \rangle$ потерь мощности от несимметрии найдем токи прямой и обратной последовательностей фазы *A*:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{I}{\sqrt{3}} \exp\{-\pi/6\}; \quad \underline{I}_{A2} = \frac{I}{\sqrt{3}} \exp\{\pi/6\}. \tag{3}$$

Модули I_1 и I_2 токов симметричных составляющих равны между собой, а угол между векторами $\psi_{A12} = 60°$. Квадрат модуля суммы

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2 I_1 I_2 \cos\psi_{A12}. \tag{4}$$

Третье слагаемое содержит модули токов обеих последовательностей, поэтому его нужно разделить между ними. Коэффициент долевого участия естественно принять пропорциональным квадрату модуля I_2:

$$\alpha_{A2} = \frac{I_2^2}{I_1^2 + I_2^2}. \tag{5}$$

Так как второе слагаемое относится к обратной последовательности, то

$$\langle \Delta P_2 \rangle_A = \left(I_2^2 + 2\alpha_{A2} I_1 I_2 \cos\psi_{A12} \right) r. \tag{6}$$

В рассматриваемом примере α_2 = 0,5, а $\langle \Delta P_2 \rangle_A = I^2 r/2$, что и следовало ожидать. Аналогичный результат получим и для фазы *B*. Векторы составляющих токов фазы *C* равны по величине и противоположны по направлению. Поэтому $\alpha_{C2} = -1$, а доля потерь равна нулю, как и сами потери.

Нетрудно видеть, что потери мощности в фазах нельзя определять как сумму потерь от симметричных составляющих. Действительно, в этом случае в каждой фазе якобы будут одинаковые потери

$$\left(I_1^2 + I_2^2 \right) r = \frac{2}{3} I^2 r, \tag{7}$$

которые существенно отличаются от фактических, особенно в фазе *C*, где потерь нет вообще. Это означает, что в первом варианте раздельное рассмотрение симметричных составляющих не допустимо.

Во втором варианте нагрев обусловлен суммарными потерями мощности

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_A + \Delta P_B = 2I^2 r. \tag{8}$$

Этот же результат получается, если просуммировать величины (7), т.е. утроить их. Отсюда следует, что при анализе суммарных потерь мощности система симметричных составляющих является ортогональной. Это позволяет рассматривать составляющие раздельно, а дополнительные потери мощности от несимметрии определять по формуле

$$\Delta P_{2\Sigma} = 3I_2^2 r \tag{9}$$

без введения коэффициента (5).

Исходные для расчета графики $U_2(t)$ изменения во времени линейных напряжений обратной последовательности в кВ или их характеристики определяются по экспериментальным записям линейных напряжений или по линейным токам электроприемников. Для расчета используется формула (Б.18) из [1], которая относится к частному случаю применения метода симметричных составляющих, когда треугольник линейных напряжений или токов является замкнутым. Это означает, что в любой момент времени модуль одного напряжения не должен превышать сумму модулей двух других напряжений. При обрыве фазы *A*, когда $U_{AB} = 0,$ в формуле будет деление на нуль. Учитывая, что в этом случае $U_{BC} = U_{CA},$ получим, что модули прямой U_1 и обратной U_2 последовательностей будут равны между собой и отличаться от U_{BC} или U_{CA} в $\sqrt{3}$ раз. Если по условиям задачи требуется знать угол между векторами U_1 и U_2, как в (6), то необходимо применять общие формулы метода симметричных составляющих.

Динамические модели ЭМС. Для определенности оценим влияние несимметрии напряжений на асинхронные электродвигатели (АД).

Целью расчетов является определение суммарных потерь активной мощности ΔP_2, максимального превышения температуры $\vartheta_{2\max}$ и уменьшения срока службы $\Delta\varepsilon_2$ от несимметрии напряжений.

При решении оптимизационной задачи уменьшения несимметрии имеется ограничение

$$\vartheta_{2\max} \le \acute{\vartheta}_{2\max} \tag{10}$$

по допустимому значению $\acute{\vartheta}_{2\max}$, нарушение которого требует применения средств уменьшения несимметрии без экономических обоснований.

В [7] нормируются превышения температуры при отклонения напряжения и частоты: 10°С – для машин мощностью до 1000 кВт и 5°С – большей мощности. Естественно считать, что эти нормы оценивают интегральный эффект воздействия на АД всех кондуктивных помех, а не только перечисленных в стандарте. Отсюда следует, что допустимая величина $\acute{\vartheta}_{2\max}$, приходящаяся на несимметрию, определяется разностью между интегральной нормой и превышением нормы от других помех.

В общем случае модель электромеханических и тепловых процессов в двигателе может быть сложной, но обычно при решении задач ЭМС двигатель считают идеальным тепловым телом с одной постоянной времени нагрева *T*. Это позволяет рассматривать симметричные составляющие раздельно, а превышение температуры ϑ_2 от несимметрии определять по сумме потерь мощности ΔP_2 в трех фазах путем решения дифференциального уравнения

$$T\vartheta_2' + \vartheta_2 = c_\vartheta \Delta P_2, \tag{11}$$

в котором коэффициент пропорциональности в °С / кВт

$$c_{\vartheta}=\frac{\eta_{\text{н}}\acute{\vartheta}}{\left(1-\eta_{\text{н}}\right)P_{\text{н}}}$$

вычисляется по номинальным значениям $P_{\text{н}}$ мощности в кВт и $\eta_{\text{н}}$ КПД, а также длительно допустимой температуре превышения $\acute{\vartheta}$ при номинальной загрузке [7]: 60, 75, 80, 100 и 125°С – для изоляции классов *A*, *E*, *B*, *F* и *H* соответственно (при измерениях методом сопротивления).

Потери мощности определяются по схеме замещения АД для токов обратной последовательности. В общем случае для расчетов целесообразно использовать двухконтурную схему замещения [8], которая учитывает вытеснение тока в роторе. Для каждого *l*-го контура вычисляются проводимости Y_l и фазные токи

$$I_l=U_2Y_l=K_{2U}U\ Y_l/100, \tag{12}$$

где K_{2U} – коэффициент несимметрии по обратной последовательности в процентах от номинального напряжения.

Суммарные потери в кВт

$$\Delta P_2=3\sum_l I_l^2r_l=3\cdot10^{-4}K_{2U}^2U^2\sum_l r_lY_l \tag{13}$$

пропорциональны квадрату коэффициента несимметрии с коэффициентом пропорциональности в кВт/(%)^2

$$c_{2\Delta P}=3\cdot10^{-4}U^2\sum_l r_lY_l. \tag{14}$$

Для возможности обобщения введем коэффициент в (%)$^{-2}$

$$c_{2н} = \Delta P_{2н} \big/ \left(P_н K_{2U}^2 \right) = c_{2\Delta P} / P_н \,, \tag{15}$$

который условно назовем коэффициентом потерь.

При изменяющейся несимметрии напряжений расчеты выполняются по средней величине потерь

$$\Delta P_с = c_{2\Delta P} K_{2Uэ}^2 , \tag{16}$$

пропорциональной квадрату эффективного значения $K_{2Uэ}$ коэффициента несимметрии.

Для укрупненных расчетов можно использовать усредненные зависимости коэффициентов потерь от номинальной мощности. Представляется целесообразным создать базу данных о коэффициентах потерь для каждого АД, а для укрупненных расчетов использовать осредненные зависимости для двигателей разных фирм. Например, для двигателей старой серии 4А напряжением 380 В усреднение результатов расчетов по двухконтурной схеме замещения с учетом (15) дает соотношения:

$$c_{2н} = 7{,}8375 \cdot 10^{-4} P^{-0{,}1567}, \quad c_{2\Delta Pн} = 7{,}8375 \cdot 10^{-4} P^{0{,}8433}, \tag{17}$$

а для АД напряжением 400 В итальянской фирмы MarelliMotori –

$$c_{2н} = 9{,}5203 \cdot 10^{-4} P^{-0{,}1505}, \quad c_{2\Delta Pн} = 9{,}5203 \cdot 10^{-4} P^{0{,}8495}. \tag{18}$$

Двигатели серии 4А имеют меньшие дополнительные потери мощности от несимметрии, хотя потери от прямой последовательности в них больше. По-видимому, это объясняется тем, что двигатели с повышенными

КПД и кратностями пускового момента имеют глубокие пазы, а следовательно, на них больше сказывается явление вытеснения тока ротора.

Для группы электроприемников средние значения потерь суммируются. В силу нелинейности (17) и (18) потери мощности должны вычисляться для каждого АД. В практике удобно использовать суммарные номинальные мощности в том или ином диапазоне мощностей. С этой целью функции (17) и (18) заменяются кусочно-линейными.

По потерям активной мощности вычисляется среднее превышение температуры

$$\vartheta_{2с} = c_{\vartheta} \Delta P_{с} = c_{2\vartheta} K_{2Uэ}^{2}, \tag{19}$$

где коэффициент

$$c_{2\vartheta} = c_{\vartheta} c_{2\Delta P} = c_{\vartheta} c_{2н} P = \frac{c_2 \acute{\vartheta}}{1/\eta_{н} - 1} \tag{20}$$

имеет размерность °C / (%)^2.

При наличии нескольких помех, как и в (8), дополнительные потери мощности от каждой из них суммируются, а при использовании дифференциального уравнения (11) суммируются и средние значения соответствующих превышений температур.

Несимметрия сокращает срок службы в

$$\varepsilon_2 = \exp\{ b \vartheta_{2c} \} = \exp\{ b c_{2\vartheta} K_{2U}^{2} \} \tag{21}$$

раз, т.е. на $\Delta\varepsilon_2 = \left(1 - 1/\varepsilon_2\right) 100$ %. Здесь b – коэффициент, который для изоляции класса A равен 0,0866 (°C)$^{-1}$. Номинальный срок службы АД будет одинаковым, если $b\acute{\vartheta} = const$. Из этого соотношения для изоляции классов E,

B, F и H найдем значения b: 0,0693; 0,065; 0,052 и 0,0416 (°C)$^{-1}$. Обратные величины $\Delta\theta = 1/b$ близки к рекомендуемым в [9] – лишь для изоляции класса H расхождение составляет –12,5 %, что при наибольшей норме в 10°C из [7] дает погрешность в определении ε_2 всего 6,6 %.

Максимальное превышение температуры определяется с заданной интегральной вероятностью, которую, как и в [1], примем равной 0,95.

Для укрупненных расчетов в [10] рекомендуется формула для максимального превышения температуры

$$\vartheta_{\max} = 0{,}0434 K_{2U}^2 / b, \tag{22}$$

из которой следует, что в среднем

$$c_{2\vartheta} = 0{,}0434/b. \tag{23}$$

Подставив сюда значения коэффициента b, для изоляции классов E, B, F и H найдем значения $c_{2\vartheta}$ = 0,501; 0,626; 0,668; 0,835 и 1,043 $°\mathrm{C}/(\%)^2$.

Из (11), (16) и (19) следует, что структурная схема модели ЭМС (рис. 1) включает в себя квадратор 1, звено 2 определения среднего значения, пропорциональное звено 3 с параметром $c_{2\vartheta}$, выполняющее нелинейное преобразование (21) звено 4, пропорциональное звено 5 с параметром $c_{2\Delta P}$, инерционное (апериодическое) звено 6 с коэффициентом передачи $c_{2\vartheta}$ и постоянной времени T, блок 7 вычисления максимального значения.

Дозы несимметрии. Отмеченные недостатки нормирования трехсекундных коэффициентов несимметрии требуют отказа от этого показателя ЭМС. В соответствии с наметившейся тенденцией в нормировании введем новые показатели: дозы несимметрии $\Psi_{\varepsilon 2}$ по тепловому износу и $\Psi_{\vartheta 2}$ по превышению температуры, которые для краткости назовем долговременной и кратковременной дозами. В качестве стандартного электроприемника примем АД, как наиболее распространенного и чувствительного[2] к несимметрии.

Параметры стандартного АД должны выбираться путем экспертных оценок. Будем считать, что этот АД имеет изоляцию класса F и коэффициент $\acute{c}_{2\vartheta} = 0{,}835$ °C/(%)[2]. Постоянную времени нагрева $\acute{T}$ выберем из условия, чтобы за допускаемое в [7] время $t_{\text{п}}$ = 1 мин токовой перегрузки $I_{\text{п}}$ = 150 % превышение температуры $\vartheta_{\text{п}}$ составило 110°C. До появления перегрузки ток был равен номинальному $I_{\text{н}}$ = 100 %, а превышение температуры для изоляции класса F – $\acute{\vartheta} = 100$°C. Следовательно, коэффициент перехода от (%)^2 к градусам Цельсия $c_{\vartheta I} = 0{,}01$°C $/(\%)^2$.

При $\acute{\gamma} = 1/\acute{T}$ процесс повышения температуры описывается известным выражением

$$\vartheta(t) = \acute{\vartheta}\exp\{-\acute{\gamma}t\} + c_{\vartheta I} I_{\text{п}}^2 \left(1 - \exp\{-\acute{\gamma}t\}\right),$$

из которого найдем округленное значение $\acute{T} = 10$ мин.

Тепловой износ не зависит от постоянной нагрева, а определяется средним превышением температуры. В связи с этим долговременная доза

$$\Psi_{\varepsilon 2} = k_{\varepsilon 2} K_{2U} \qquad (24)$$

в относительных единицах пропорциональна эффективному значению коэффициента несимметрии. Коэффициент пропорциональности определим из условия эквивалентности оценок по дозе и коэффициенту несимметрии для случая неизменной несимметрии с допускаемым в [1] значением

[2] По данным [11], несимметрия в большей мере воздействует на синхронные двигатели с успокоительной обмоткой, но они менее распространены.

$K_{2U} = 2\%$. Допустимое значение дозы $\psi_{\varepsilon 2} = 1$, поэтому из (24) найдем $k_{\varepsilon 2} = 0{,}5(\%)^{-1}$, что позволяет записать

$$\psi_{\varepsilon 2} = 0{,}5K_{2U}\,. \tag{25}$$

В относительных единицах кратковременная доза

$$\psi_{\vartheta 2} = \sqrt{k_{\vartheta 2}\vartheta_{2\max}}\,, \tag{26}$$

где $k_{\vartheta 2}$ – коэффициент пропорциональности. При $\vartheta_{2\max}$ = 10°С и допустимой дозе , равной единице, из (26) получим значение $0{,}1(°\mathrm{C})^{-1}$. Тогда

$$\psi_{\vartheta 2} = \sqrt{0{,}1\vartheta_{2\max}}\,. \tag{27}$$

Соотношение между дозами зависит от формы графика несимметрии. Если несимметрия не изменяется во времени, то долговременная доза дает более жесткую оценку, чем кратковременная, так как

$$\psi_{\vartheta 2}/\psi_{\varepsilon 2} = 2\sqrt{0{,}1c_{2\vartheta}} < 1.$$

Максимальное значение $\psi_{\vartheta 2\max}$ кратковременной дозы определяется с интегральной вероятностью 0,95. Для предельного режима в [1] интегральная вероятность принята равной единице, что допустимо лишь для статистических функций распределения коэффициентов несимметрии, находимых из опыта. В проектных расчетах используются теоретические распределения – обычно нормальный закон, для которого такая вероятность давала бы бесконечное расчетное значение коэффициента несимметрии или дозы. В соответствии с известным правилом «трех сигм» для максимального значения $\psi_{\vartheta 2\,\text{ср}\max}$ дозы в предельном режиме интегральную вероятность примем равной 0,999. Соответственно допустимое значение дозы

$$\tilde{\psi}_{\vartheta 2\,\text{ср}} = 2\tilde{\psi}_{\vartheta} = \overline{2} \quad 2.$$

Долговременная доза вычисляется за сутки, а значения кратковременных доз за $3\tilde{T} = 30$ мин. За сутки количество значений равно 48, что вполне достаточно для статистической обработки.

В точке общего присоединения нормы ЭМС выполняются, если

$$\psi_{\varepsilon 2} \le 1,\ \psi_{\vartheta 2\max} \le 1,\ \psi_{\vartheta 2\,\text{ср}\max} \le \quad 2. \tag{28}$$

Так как для норм в точках общего присоединения потери активной мощности определять не требуется, структурная схема динамической модели упрощается (рис. 2): в ней помимо квадратора 1 есть пропорциональное звено 8 с параметром $k_{\varepsilon 2}$, инерционное звено 6 с коэффициентом передачи $c_{2\vartheta}k_{\vartheta 2}$ и постоянной времени $\tilde{T}$, а также блок 9 статистической обработки, в котором интегральными вероятностями 0,95 и 0,999 определяются максимальные значения кратковременных доз.

В отличие от трехсекундных коэффициентов несимметрии, дозы имеют физический смысл: кратковременная доза отражает техническое требование (10), а долговременная позволяет оценить ущерб от сокращения срока службы АД и дополнительных потерь электроэнергии. В самом деле, поскольку согласно (25) эффективное значение коэффициента несимметрии равно удвоенной дозе, то формулы (16) и (21) приобретают вид:

$$\Delta P_{\text{с}} = 4c_{2\Delta P}\psi_{\varepsilon 2}^{2}, \tag{29}$$

$$\varepsilon_2 = \exp\left\{ 4bc_{2\vartheta}\psi_{\varepsilon 2}^2 \right\}. \tag{30}$$

Для укрупненных расчетов, с учетом (17) и (23), при b = 0,835°C/(%)^2 получим

$$\Delta P_{\text{с}} = 0{,}3134\psi_{\varepsilon 2}^2 P_{\text{н}}^{0{,}8433}, \qquad \varepsilon_2 = \exp\left\{ 0{,}208\psi_{\varepsilon 2}^2 \right\}.$$

При допустимой дозе срок службы АД сокращается в 1,23 раза, т.е. на 18,7 %.

Измерения и расчет. В точке общего присоединения измерение доз несимметрии осуществляется специализированным прибором, структура которого совпадает со структурной схемой модели ЭМС на рис. 2. Для контроля же выполнения норм на зажимах электроприемников и получения данных для экономических расчетов в сети рассматриваемого предприятия регистрируются линейные напряжения. Для целей проектирования необходимо знать линейные токи источников несимметрии. В этом случае возможно сжатие информации: вместо графиков тока задавать вычисленные по ним среднее значение $I_{2\text{с}}$ и корреляционную функцию $B_{2I}(\tau)$ тока обратной последовательности, а также корреляционную функцию $B_{ZI}(\tau)$ процесса $Z(t) = I_2^2(t)$. Если источников несимметрии несколько, то характеристики $I_{2\text{с}}$ и $B_{2I}(\tau)$ вычисляются по соответствующим индивидуальным графикам с использованием формул теории вероятностей для суммы векторов. В случае нормальных процессов достаточно задавать только $B_{2I}(\tau)$, так как

$$B_{ZI}(\tau) = 2B_{2I}^2(\tau) + 4I_I^2 B_{2I}(\tau).$$

Рассмотрим случай, когда исходным для расчетов является график $K_{2U}(t)$. В действующих сетях он строится по данным измерений напряжений, а в проектировании рассчитывается по графику тока обратной последовательности:

$$K_{2U}(t) = k_2 I_2(t), \tag{31}$$

где $k_2 = \sqrt{3} z_{2н} / 10U$ в (%)/А, z_2 – полное фазное сопротивление току обратной последовательности в Ом. В сетях напряжением 6-10 кВ и выше можно учитывать только индуктивное сопротивление.

Для вычисления среднего значения потерь мощности и сокращения срока службы согласно (16) и (21) достаточно найти эффективное значение исходного графика. Это же значение используется при быстрых изменениях несимметрии по сравнению с постоянной времени нагрева АД, поскольку в этом случае максимальное превышение температуры практически не отличается от (19).

В общем случае для определения $\vartheta_{2\max}$ необходимо рассчитать ординаты графика температуры. Решение дифференциального уравнения (11) имеет вид

$$\vartheta_2(t) = \left[\vartheta_{2н} + c_{2\vartheta} \gamma \int_0^t K_{2U}^2(\xi) \exp\{\gamma \xi\} \, d\xi \right] \exp\{-\gamma t\}, \tag{32}$$

где $\gamma = 1/T$, ξ – переменная интегрирования, $\vartheta_{2н}$ – начальная ордината.

В проектировании используют ступенчатые и кусочно-линейные графики коэффициентов несимметрии. В первом случае в пределах длительности t_i i-й ступени величиной K_{2Ui}^2 формула (32) дает

$$\vartheta_{2i}(t) = \vartheta_{2н} \exp\{-\gamma t\} + c_{2\vartheta} w_{пi}(t), \tag{33}$$

где

$$w_{\text{п}i}(t) = K_{2Ui}^{2}\left(1 - \exp\{-\gamma t\}\right). \tag{34}$$

Расчет начинается с первого участка, для которого начальная ордината принимается равной нулю. Конечная ордината $\vartheta_{2\text{к}1}$ при $t = t_1$ является начальной для второго участка и т.д. Это означает, что вначале протекает переходный процесс длительностью примерно $3T$, а затем наступает стационарное состояние, для которого и вычисляют максимальную температуру. В связи с этим длительность записи исходного непериодического графика должна быть намного больше $3T$.

Во втором случае на i-м участке исходный процесс описывается линейной функцией $a_i t + d_i$ с постоянными коэффициентами a_i и d_i. Ординаты графика температур вычисляются по аналогичной (33) формуле, в которую вместо $w_{\text{п}i}(t)$ подставляется функция времени

$$w_{\text{л}i}(t) = a_i^2\left(t^2 - 2Tt + 2T^2\right) + 2a_i d_i\left(t - \tau\right) + \left(2a_i d_i T - 2a_i^2 T^2 - d_i^2\right)\exp\{-\gamma t\}. \tag{35}$$

График сложной формы заменяют ступенчатым с очень малой длительностью Δ ступеней. В этом случае применима формула (33) с тем отличием, что длительности одинаковы и нет необходимости рассчитывать процесс в пределах каждой ступени, а достаточно вычислить лишь конечные ординаты $\vartheta_{2\text{к}i}$. Обозначив через $b_\Delta = \exp\{-\gamma\Delta\} = const,$ найдем

$$\vartheta_{2\text{к}i} = b_\Delta \vartheta_{2\text{н}i} + \left(1 - b_\Delta\right) c_{2\vartheta} K_{2Ui}^2. \tag{36}$$

В случае периодического графика формулы для стационарного состояния получают без расчета переходного процесса из условия совпадения ординат в начале и конце цикла. Например, для ступенчатого графика с количеством ступеней N выражение (33) дает систему N алгебраических уравнений для определения конечных ординат:

$$
\begin{aligned}
&\vartheta_{21\text{к}} = \vartheta_{2N\text{к}} \exp\{-\gamma t_1\} + c_{2\vartheta} w_{\text{п}1}(t_1), \\
&\vartheta_{22\text{к}} = \vartheta_{21\text{к}} \exp\{-\gamma t_2\} + c_{2\vartheta} w_{\text{п}2}(t_2), \\
&\ldots \\
&\vartheta_{2N\text{к}} = \vartheta_{2,\,N-1,\text{к}} \exp\{-\gamma t_N\} + c_{2\vartheta} w_{\text{п},\,N}(t_N),
\end{aligned}
\tag{37}
$$

при составлении которых учтены соотношения:

$$\vartheta_{2i\text{н}} = \vartheta_{2,\,i-1,\text{к}}, \qquad \vartheta_{21\text{н}} = \vartheta_{2N\text{к}}.$$

Решение этой системы относительно N неизвестных конечных ординат не встречает затруднений. В случае кусочно-линейного графика система алгебраических уравнений будет такой же, но вместо $w_{\text{п}}(t_i)$ в нее подставляются значения $w_{\text{л}}(t_i)$.

Перейдем к случайным помехам. Здесь по заданным характеристикам тока обратной последовательности рассчитываются соответствующие характеристики коэффициентов несимметрии по обратной последовательности:

$$K_{2U} = k_2 I_{2\text{с}}, \qquad B_{2U}(\tau) = k_2^2 B_{2I}(\tau), \qquad B_{ZU}(\tau) = k_2^4 B_{ZI}(\tau).$$

Квадрат эффективного значения

$$K_{2\text{э}U}^2 = K_{2U}^2 + B_{2U}(0) = k_2^2\left[I_{2\text{с}}^2 + B_{2I}(0)\right].$$

Для определения максимальной температуры необходимо знать вероятностное распределение температур повышения. Эта задача имеет аналитическое решение лишь для частных случаев, а приближенное решение в виде ряда Чебышева-Эйлера приводит к нарушению физического смысла (отрицательные участки плотности распределения на рис. 26 и 27 в [12]). Хорошие результаты дает использование бета-распределения [13] и распределения Джонсона. Учитывая, что инерционные системы нормализуют процесс, для практических целей процесс изменения температуры можно считать нормальным[3].

Для нормального процесса помимо среднего значения (19) достаточно рассчитать дисперсию $D\vartheta_2$ температуры, поскольку максимальное превышение температуры

$$\vartheta_{2\text{maxc}} = \vartheta \ + \beta\sqrt{D\vartheta}\ , \tag{38}$$

где при интегральной вероятности 0,95 статистический коэффициент β = 1,65, а при вероятности 0,999 – β = 3,09 (табл. 1 в [14]).

Дисперсия температуры вычисляется по общей формуле

$$D\vartheta_2 = c_{2\vartheta}^2 \gamma \int_0^\infty \exp\{-\gamma\xi\}\, B_{ZU}(\xi)\, d\xi, \tag{39}$$

в которой берутся только положительные значения аргументов корреляционной функции. Наиболее употребительными являются экспоненциальная и экспоненциально-синусоидальная корреляционные функции:

[3] В [12] сделан противоположный вывод, но для случая, когда T = const, а время корреляции увеличивается. Здесь рассматривается другой случай, поэтому в таблице на стр. 321 необходимо отношение k/α уменьшать, а не увеличивать. В пределе при $T \to \infty$ асимметрия и эксцесс будут равны нулю.

$$B_{2U}(\tau)=\sigma_{2U}^2\exp\{-\alpha|\tau|\},\quad B_{2U}(\tau)=\sigma_{2U}^2\exp\{-\alpha|\tau|\}\cos\omega_0\tau, \tag{40}$$

где σ_{2U} – стандарт коэффициентов несимметрии, α и ω_0 – параметры. Подстановка этих выражений в (39) после интегрирования дает

$$D\vartheta_2=2c_{2\vartheta}^2\sigma_{2U}^2\left(\frac{\sigma_{2U}^2}{1+2\alpha T}+\frac{2U_{2\text{c}}^2}{1+\alpha T}\right),$$

$$D\vartheta_2=2c_{2\vartheta}^2\sigma_{2U}^2\left[\frac{\sigma_{2U}^2}{1+2\alpha T}\cdot\frac{(1+2\alpha T)^2+2\omega_0 T^2}{(1+2\alpha T)^2+4\omega_0^2T^2}+\frac{2U_{2\text{c}}^2(1+\alpha T)}{(1+\alpha T)^2+\omega_0^2T^2}\right].$$

Отсутствие общего аналитического решения задачи о вероятностном распределении параметров после квадратичного инерционного сглаживания повышает роль имитационных методов. Опыт показал высокую эффективность метода элементных процессов [15], суть которого заключается в том, что нормальный случайный процесс $K_{2U}(t)$ представляется в виде суммы большого количества n независимых элементных процессов с корреляционной функцией в n меньшей, чем у заданного процесса. Форма элементного процесса выбирается предельно простой, удобной для компьютерной имитации. Метод отражает внутреннюю структуру имитируемого процесса: например, недифференцируемость непрерывных марковских процессов с корреляционными функциями (40), что позволяет использовать этот метод не только для решения инженерных задач, но и для получения новых знаний.

Примеры расчетов. 1. На литейном участке имеются две магнитогидродинамические установки для дозированной заливки жидкого металла, каждая из которых за 6 с периода разливки создает ток обратной последовательности 240 А, а за 20 с периода нагревания – 193 А. Сопротивление сети 380 В до шин подстанции составляет 0,013 Ом. Оценить

ЭМС питающегося от этой подстанции АД 200 кВт, с изоляцией класса B, приняв T = 10 мин. Другие помехи ЭМС отсутствуют.

По графику тока вычислим среднее и эффективное значения: $I_{2с}$ = 203,8 А и $I_{2э}$ = 204,8 А, а также дисперсию $DI_2 = I_{2э}^2 - I_{2с}^2 = 411$ А^2.

Среднее значение суммарного тока $I_{2с\Sigma} = 2I_{2с} = 407,6$ А. Так как установки работают независимо друг от друга, то суммируются и дисперсии: $DI_{2\Sigma}$ = 2·411 = 822 А^2. Квадрат эффективного значения суммарного тока

$$I_{2\Sigma}^2 = 407,6^2 + 822 = 166960 \text{ А}^2.$$

Коэффициент перехода к коэффициентам несимметрии напряжений

$$k_2 = \sqrt{3} \cdot 0,013 / (10 \cdot 0,38) = 0,00593 \text{ (\%)/А}.$$

Квадрат эффективного значения

$$K_{2U}^2 = 0,00593^2 \cdot 166960 = 5,87 \text{ (\%)}^2.$$

Коэффициент (17)

$$c_{2\Delta P} = 7,8375 \cdot 10^{-4} \cdot 200^{0,8433} = 0,0683 \text{ кВт/(\%)}^2.$$

Дополнительные потери активной мощности (16)

$$\Delta P_с = 0,0683 \cdot 5,87 = 0,4 \text{ кВт}.$$

Длительность цикла $t_ц$ = 26 с невелика, поэтому максимальную температуру можно принять равной средней. В самом деле, расчеты с использованием (37) показывают, что с погрешностью менее 5 % такое допущение приемлемо уже при T = 0,4 мин.

Для изоляции класса B коэффициенты b = 0,065 (°С)$^{-1}$ и $c_{2\vartheta}$ = 0,668 °С/(%)^2. Согласно (19)

$$\vartheta_{2\text{с}} = 0{,}668 \cdot 5{,}87 = 3{,}92°\text{С}.$$

Поскольку другие помехи отсутствуют, допустимое максимальное превышение температуры равно 5°С. Следовательно, условие (10) не нарушается.

Срок службы АД сокращается в

$$\varepsilon_2 = \exp\{0{,}065 \cdot 3{,}92\} = 1{,}29 \text{ раза},$$

т.е. на 22,5 %.

Расчет ущерба от сокращения срока службы и экономическое обоснование целесообразности применения средств уменьшения несимметрии может быть выполнен по методике из [11].

2. Дуговая сталеплавильная печь 100 т в период расплавления создает несимметрию токов со средним значением $I_{2\text{с}}$ = 104,3 А, стандартом σ_{2I} = 58,3 А и экспоненциальной корреляционной функцией с параметром α = 6,5 с$^{-1}$. Мощность КЗ на шинах 35 кВ равна 600 МВА. Оценить ЭМС по дозе несимметрии и трехсекундным коэффициентам несимметрии.

Сопротивление сети

$$z_2 = \frac{35^2}{600} = 2{,}04 \text{ Ом}.$$

Коэффициент в (31)

$$k_2 = \sqrt{3} \cdot 2{,}04 \big/ (10 \cdot 35) = 0{,}01 \text{ (\%)/А}.$$

Характеристики коэффициентов несимметрии:

$$K_{2U\text{с}} = 0{,}01 \cdot 104{,}3 = 1{,}043 \text{ \%}, \quad \sigma_{2U} = 0{,}01 \cdot 58{,}3 = 0{,}583 \text{ \%}.$$

Квадрат эффективного значения

$$K_{2\text{э}U}^2 = 1{,}043^2 + 0{,}583^2 = 1{,}428 \text{ (\%)}^2.$$

Долговременная доза несимметрии (25)

$$\psi_{\varepsilon 2} = 0{,}5\sqrt{1{,}428} = 0{,}6.$$

Поскольку время корреляции

$$\tau_\text{к} = 1/\alpha = 1/6{,}5 = 0{,}154 \text{ с}$$

намного меньше постоянной времени нагрева, максимальная температура практически не отличается от средней. При $c_{2\vartheta}$ = 0,835°С/(%)^2 формула (19) дает

$$\vartheta_{2\text{с}} = 0{,}835 \cdot 1{,}428 = 1{,}19\text{°С}.$$

Кратковременная доза (27)

$$\psi_{\vartheta 2} = \sqrt{0{,}1 \cdot 1{,}19} = 0{,}345.$$

Обе дозы меньше единицы, поэтому ЭМС по несимметрии при работе печи не нарушается.

Для определения максимального значения трехсекундных коэффициентов несимметрии K_{VS} помимо эффективного значения необходимо определить дисперсию D_{VS} осредненного на интервале T_{VS} = 3 с процесса $Z(t)$. С этой целью найдем корреляционную функцию в $(\%)^4$

$$B_Z(\tau) = 2 \cdot 0{,}583^4 \exp\{-2 \cdot 6{,}5|\tau|\} + 4 \cdot 1{,}043^2 \cdot 0{,}583^2 \exp\{-6{,}5|\tau|\} =$$
$$= 0{,}23 \exp\{-13|\tau|\} + 1{,}48 \exp\{-6{,}5|\tau|\}.$$

С учетом общей формулы (II.69) из [14] при αT_{VS} = 19,5 и $2\alpha T_{VS}$ = 39 получим

$$D_{VS} = \frac{2 \cdot 0{,}23}{39^2}\left(39 + \exp\{-39\} - 1\right) +$$
$$+ \frac{2 \cdot 1{,}48}{19{,}5^2}\left(19{,}5 + \exp\{-19{,}5\} - 1\right) = 0{,}156(\%)^4.$$

По аналогии с (38) квадрат максимального значения

$$K_{VS}^2 = K_{2U}^2 + \beta\sqrt{D_{VS}} = 1{,}428 + 1{,}65\sqrt{0{,}156} = 2{,}08(\%)^2.$$

Требования [1] выполняются, поскольку

$$\sqrt{2{,}08} = 1{,}442 < 2\%.$$

Отношение долговременной дозы к допустимому значению равно 0,6, а соответствующих трехсекундных коэффициентов несимметрии – 1,442/2 = 0,721. Это означает, что оценка ЭМС по дозе оказалась менее жесткой, поскольку доза учитывает постоянную времени нагрева АД.

Выводы. 1. Физический смысл оценок ЭМС обеспечивается путем моделирования воздействий несимметрии напряжений на электрооборудование и электрическую сеть: дополнительных потерь активной мощности, максимального превышения температуры и теплового износа изоляции.

2. В стандарте на показатели ЭМС в точках общего присоединения вместо трехсекундного коэффициента несимметрии целесообразно перейти к нормированию по долговременной и кратковременной дозам несимметрии напряжения. В стандартах на показатели ЭМС электрооборудования следует нормировать температуру дополнительного нагрева от помех ЭМС, включая несимметрию.

3. Техническая необходимость применения средств уменьшения несимметрии обусловлена требованиями стандартов на показатели ЭМС, а экономическая целесообразность оценивается сопоставлением ущерба от несимметрии с затратами на симметрирование.

Приложение. С одной стороны, исходная несимметричная система линейных токов может быть заменена симметричной трехфазной системой токов $\underline{\dot{I}}_A, \underline{\dot{I}}_B, \underline{\dot{I}}_C$ и однофазной нагрузкой [11], которая и является несимметричной компонентой. Обозначив через m индекс фазы с наименьшим модулем I_m тока, получим

$$\underline{\dot{I}}_m = \underline{I}_m, \quad \underline{\dot{I}}_{m-1} = a^2 \underline{I}_m, \quad \underline{\dot{I}}_{m+1} = a \underline{I}_m, \tag{П.1}$$

где $m - 1$ – индекс отстающей на 120° фазы, а $m + 1$ – опережающей на 120°. Например, если $m = B$, то $m - 1 = C$, а $m + 1 = A$.

Однофазные нагрузки равны разностям между фактическими и симметричными токами:

$$\tilde{I}_m = 0, \quad \underline{\tilde{I}}_{m-1} = \underline{I}_{m-1} - a^2 \underline{I}_m, \quad \underline{\tilde{I}}_{m+1} = \underline{I}_{m+1} - a \underline{I}_m = -\underline{\tilde{I}}_{m-1}. \tag{П.2}$$

С другой стороны, несимметричная система (П.2) может быть определена в виде двух симметричных систем токов: обратной последовательности, совпадающей с (1), и прямой последовательности, которая отличается от обратной только знаком. Отсюда видно различие между двумя трактовками несимметрии: компонента (П.2) включает в себя не только систему (1), но и часть прямой последовательности, а модуль симметричной системы (П.1) меньше модуля прямой последовательности исходной несимметричной системы.

Выделение однофазной нагрузки более наглядно, чем выделение обратной последовательности (1): как и в исходной системе, ток в фазе с индексом m меньше, чем в других фазах. Такой способ декомпозиции может быть использован при выборе и анализе эффективности многих средств уменьшения несимметрии. Однако он не обладает свойством ортогональности. По этой причине потери мощности в линии совпадают с фактическими лишь для фазы с индексом m, а сумма потерь мощности от симметричной и однофазной компонент не совпадает с фактическими суммарными потерями в трех фазах. Для получения точных значений потерь мощности в фазах необходимо вначале выполнить геометрическое суммирование токов (П.1) и (П.2) по фазам, что дает исходную систему токов.

Недостатком рассмотренного способа является то, что при изменении нагрузок во времени эквивалентная однофазная нагрузка будет переключаться на разные линейные напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 13109-97.** Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. с 01.01.1999.

2. **Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д.** Кумулятивный принцип оценки качества напряжения. – Электричество, 1978, № 9.

3. **Электромагнитная** совместимость электроприемников промышленных предприятий / Под ред. А.К. Шидловского. – Киев: Наукова думка, 1992. – 236 с.

4. **Куренный Э.Г., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д.** Оценка качества электроэнергии с использованием моделей объектов / В кн.: Качество электроэнергии в сетях промпредприятий. Материалы конференции. – М.: МДНТП, 1977.

5. **CEI/IEC 61000-4-15.** Electromagnetic compatibility – Part 4, Section 15: Flickermeter – Functional and design specification. 1997.

6. **Куренный Э.Г., Лютый А.П.** Оценка несинусоидальности напряжения при анализе качества электроэнергии. – Электричество, 2005, № 8.

7. **ГОСТ 183-74.** Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. – Введен 01.01.76.

8. **Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А.** Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин. – Электричество, 1979, № 10.

9. **Федоров М.М., Рак А.Н.** К вопросу о прогнозировании остаточного срока службы изоляции электрических машин. – ИВУЗ Электромеханика, 1997, № 1-2.

10. **Церазов А. Л., Якименко Н. И.** Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности на работу асинхронных двигателей. – М.: Госэнергоиздат, 1963.

11. **Шидловский А. К., Кузнецов В. Г.** Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985.

12. **Свешников А.А.** Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1986.

13. **Kourennyi E.G., Petrosov V.A., Pogrebnyak N.M.** Squaring and smoothing in EMC models: a statistical solution. – Fifteenth International Wroclaw symposium and exhibition: Electromagnetic compability 2000. – Wroclaw: National Institute of Telecommunications, 2000, part I.

14. **Шидловский А.К., Куренный Э.Г.** Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. – Киев: Наукова думка, 1984.

15. **Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н.** Статистическое моделирование нормальных процессов в заводских электрических сетях. – Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 5.