

УДК 621.316.1

Саенко Ю.Л.<sup>1</sup>, Горпинич А.В.<sup>2</sup>

### **ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НА НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*В работе исследовано влияние несинусоидальных режимов на надёжность электроснабжения. В условиях несинусоидальных режимов потоки отказов систем электроснабжения оказываются нестационарными, неординарными и немарковскими. Указывается на необходимость учёта вероятностных характеристик несинусоидальных режимов и показателей надёжности корректирующих устройств при расчёте надёжности электроснабжения, приводится соответствующая математическая модель.*

Несинусоидальные (НС) режимы возникают в электрических сетях с мощными нелинейными нагрузками, такими как вентиляльные преобразователи (ВП), электродуговые сталеплавильные печи (ЭДСП), люминесцентные и ртутные лампы, магнитные усилители и т.п.

Возникновение НС режимов приводит к ускоренному старению изоляции электрических машин, трансформаторов, батарей конденсаторов (БК) и кабелей, дополнительному нагреву токоведущих частей, ложным срабатываниям релейной защиты и автоматики (РЗА) и т.д. В электрических сетях промышленных предприятий БК в ряде случаев оказываются в режиме, близком к резонансу токов на частоте какой-либо из гармоник и, как следствие, из-за перегрузок по току (и мощности) они быстро выходят из строя [2]. В результате происходит возрастание интенсивности отказов с течением времени, что обуславливает нестационарность потока отказов.

При искажённой кривой напряжения сети даже в случае резонансной настройки дугогасящих аппаратов через место замыкания на землю протекает ток высших гармоник (ВГ); при возникновении резонансных условий на частотах гармоник в контуре тока замыкания на землю действующее значение его может достигать нескольких десятков ампер, вследствие чего происходит прожигание кабеля в месте первого повреждения. Практика свидетельствует о том, что, например, в электрических сетях некоторых целлюлозно-бумажных комбинатов в связи с указанной причиной число аварий в кабельных сетях, иногда сопровождающихся погашением сборных шин, достигает десятка в год. В этом случае возможно возникновение, как показывает опыт эксплуатации, одновременно двух аварий, поскольку в сети могут развиваться перенапряжения. Следовательно, поток отказов электрооборудования утрачивает свойство ординарности.

Измерения состояния изоляции кабелей в сетях 10 кВ старой части одного из металлургических заводов, где ВП нет, и новой, цеха которой широко оснащены тиристорными агрегатами, показали, что во втором случае состояние изоляции значительно хуже; это проявилось в повышенной аварийности, которая с годами возрастает.

При высоком уровне гармоник имеет место взаимозависимость некоторых отказов и поток их не может рассматриваться как поток событий без последствия. Так, при повреждении БК установок поперечно-ёмкостной компенсации в сетях с электротермическими установками, получающими питание от тиристорных преобразователей, возможно отключение их из-за возбуждения автоколебаний за счёт проникновения в системы управления гармоник 30-40-х порядков; обычно эти гармоники шунтируются конденсаторами. Подобного рода последствия могут иметь место, когда отрицательное влияние нелинейных нагрузок скомпенсировано с помощью фильтров, при отключении последних.

<sup>1</sup> 111 ТУ, д-р. техн. наук, проф.

<sup>2</sup> 1 ТУ, аспирант

Таким образом, потоки отказов СЭС при несинусоидальных режимах в общем случае оказываются нестационарными, неординарными и немарковскими.

Несимметричные и резкопеременные нагрузки по отношению к питающей сети представляют электрооборудование, частично прерывающее электроэнергию с номинальными параметрами в энергию искажения [3]. Наличие мощности искажения, обусловленной резкопеременными и несимметричными нагрузками, а также нагрузками с нелинейными вольт- или вебер-амперными характеристиками, приводит к возникновению дополнительных потерь в электрически связанном с ними электрооборудовании и преждевременному выходу его из строя вследствие сокращения срока службы. Причём в качестве конкретного элемента для оценки сокращения срока службы целесообразно принять трансформатор. Это объясняется, в частности, тем, что первым силовым элементом, с которым связан источник мощности искажения и который наиболее чувствителен к перегрузкам и воспринимает их в наибольшей мере, является трансформатор.

Отказы трансформаторов в условиях несинусоидальных режимов - не редкость. Например, энергообъединение Среднего Запада США сообщило об отказе трансформатора, нагрузка которого не превышала номинальную, но состояла главным образом из регулируемых электроприводов с высоким содержанием гармоник. В другом случае сообщается об отказе трансформатора номинальной мощностью 300 кВА, хотя амперметр, фиксирующий среднее значение тока, не показал перегрузки. Когда заменивший его трансформатор тоже вышел из строя, вскоре после установки, более тщательные измерения с использованием амперметра, регистрирующего среднеквадратическое значение тока, показали значительную перегрузку токами ВГ [8]. Следует отметить, что, например, трансформатор номинальной мощностью 750 кВА стоит в США около 13000 долларов [9].

Наличие ВГ, как отмечалось, приводит к ускоренному старению изоляции трансформаторов. Согласно закону Аррениуса срок службы изоляционных материалов составляет:

$$V = e^{M + \frac{N}{\theta}}, \quad (1)$$

где  $M$  и  $N$  – постоянные;  $\theta$  - температура изоляционного материала, К.

Ряд исследователей (Монтзингер и др.) показал [4,10], что для изоляции класса А в диапазоне изменения температур от 80 до 140 °С справедливо соотношение

$$V = A e^{-\alpha \theta}, \quad (2)$$

где  $A$  – постоянная;  $\alpha$  - коэффициент старения изоляции;  $\theta$  - температура изоляции в наиболее нагретой точке (для трансформаторов численно равна температуре обмотки в наиболее нагретой точке).

Согласно данным различных источников  $A \approx (1,5-7,5) \cdot 10^3$  лет. Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендует для изоляции класса А принимать шестиградусное правило старения изоляции, которое гласит: срок службы изоляции изменяется вдвое при изменении её температуры на шесть градусов. При этом  $\alpha = 0,1155$ .

В соответствии с (2) срок службы изоляции трансформаторов при номинальной температуре в наиболее нагретой точке (+98 °С) будет:

$$V_H = A e^{-\alpha \theta_H}. \quad (3)$$

Выражение для относительного срока службы изоляции

$$V_* = \frac{V}{V_H} = e^{-\alpha(\theta - \theta_H)}. \quad (4)$$

Отсюда срок службы изоляции трансформатора

$$V = V_* V_H = V_H e^{-\alpha(\theta - \theta_H)} = V_H e^{-\alpha(\theta_{HHT} + \theta_O - \theta_H - \theta_{OH})}, \quad (5)$$

где  $\theta_{HHT}$  - превышение температуры обмотки в наиболее нагретой точке над температурой охлаждающей среды  $\theta_O$ ;  $\theta_H = 78^\circ\text{C}$  - номинальное превышение температуры обмотки в наиболее нагретой точке над номинальной температурой охлаждающей среды  $\theta_{OH} = 20^\circ\text{C}$ .

Примем допущение о том, что имеют место медленные колебания температуры охлаждающей среды, поэтому изменение температуры обмоток трансформатора полностью опреде-

ляется изменением токовой нагрузки. Температура охлаждающей среды может быть представлена в виде суммы [5]

$$\vartheta_o = \vartheta_{CP} + \frac{1}{\alpha} \ln\left(1 + \frac{\alpha \Delta \vartheta_c}{8}\right) + \frac{1}{\alpha} \ln\left(1 + \frac{\alpha \Delta \vartheta_r}{8}\right), \quad (6)$$

где  $\vartheta_{CP}$  - среднегодовая температура;  $\Delta \vartheta_c$  и  $\Delta \vartheta_r$  - соответственно амплитуды суточных и годовых колебаний температуры.

Тогда

$$V = B e^{-\alpha(\theta_{HTT} - \theta_H)} = B e^{-\alpha \Delta \tau}, \quad (7)$$

где  $\Delta \tau$  - дополнительный нагрев изоляции трансформатора;  $B = V_H e^{-\alpha(\vartheta_o - \vartheta_{OH})}$ ; величина  $\vartheta_o$  определяется по выражению (6).

Дополнительный нагрев изоляции трансформатора за счёт протекания через него энергии искажения [1,3]:

$$\Delta \tau = \theta_{MH} \left( \left[ \frac{K^2 + \frac{P_X}{P_K}}{1 + \frac{P_X}{P_K}} \right]^x - 1 \right) + \theta_{ННТМН} (K^y - 1), \quad (8)$$

где  $\theta_{MH}$  - номинальное превышение температуры масла над температурой охлаждающей среды в верхних слоях масла;  $\theta_{ННТМН}$  - превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях;  $P_X$  и  $P_K$  - потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора;  $x=0,9$ ,  $y=1,6$  для трансформаторов с системами охлаждения М,Д и  $x=1$ ,  $y=1,8$  для трансформаторов с системами охлаждения ДЦ,Ц;  $K = (P_K + P_{ДОБ}) / P_K$ ;  $P_{ДОБ}$  - дополнительные потери в меди трансформатора от энергии искажения.

Разлагая в ряд Тейлора выражение (8) и пренебрегая слагаемыми второго и более высоких порядков, для трансформаторов с системами охлаждения М,Д получим

$$\Delta \tau = P_{ДОБ} \left( \frac{1,8 \theta_{MH}}{P_K + P_X} + \frac{1,6 \theta_{ННТМН}}{P_K} \right). \quad (9)$$

Потери в трансформаторе от токов ВГ [2,3]

$$P_{ДОБ} = 3R_T \sum_{v=2}^n I_v \sqrt{v}, \quad (10)$$

где  $I_v$  - ток  $v$ -й гармоники, проходящий через трансформатор;  $R_T$  - сопротивление короткого замыкания трансформатора при промышленной частоте.

Значит

$$\Delta \tau = 3R_T \left( \frac{1,8 \theta_{MH}}{P_K + P_X} + \frac{1,6 \theta_{ННТМН}}{P_K} \right) \sum_{v=2}^n I_v^2 \sqrt{v}. \quad (11)$$

В сетях с резкопеременными нагрузками несинусоидальность токов не является функционально определённой величиной и значения токов ВГ имеют вероятностный характер [6]. В частном случае [3] при нормальном распределении случайной величины (что подтверждается многочисленными исследованиями [2] и исследованиями, проведенными на Тайване [11]):

$$m_{I_v^2} = m_{I_v}^2 + \sigma_{I_v}^2; \quad (12)$$

$$D_{I_v^2} = 4m_{I_v}^2 \sigma_{I_v}^2 + 2\sigma_{I_v}^4 \quad (13)$$

где  $m_{I_v^2}$  и  $D_{I_v^2}$  - соответственно математическое ожидание и дисперсия квадрата тока  $I_v$ ;

$m_{I_v}$ ,  $\sigma_{I_v}$  - математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение тока  $I_v$ .

Следовательно, математическое ожидание и дисперсия величины  $\Delta \tau$  будут равны

$$m_{\Delta\tau} = C \sum_{v=2}^n \sqrt{v} (m_{I_v}^2 + \sigma_{I_v}^2); \quad (14)$$

$$D_{\Delta\tau} = C^2 \sum_{v=2}^n v (4m_{I_v}^2 \sigma_{I_v}^2 + 2\sigma_{I_v}^4), \quad (15)$$

$$\text{где } C = 3R_T \left( \frac{1,8\theta_{MH}}{P_K + P_X} + \frac{1,6\theta_{HHTMH}}{P_K} \right).$$

Так как при резкопеременных нагрузках закон распределения температуры перегрева трансформатора нормальный [5], а  $\Delta\tau = \theta_{HHT} - \theta_H$ , то аналогично (12) и (13) имеем

$$m_{\Delta\tau^2} = m_{\Delta\tau}^2 + D_{\Delta\tau}; \quad (16)$$

$$D_{\Delta\tau^2} = 4m_{\Delta\tau}^2 D_{\Delta\tau} + 2D_{\Delta\tau}^2. \quad (17)$$

Разлагая выражение (7) в ряд и ограничиваясь тремя членами разложения, получаем

$$V = B \left( 1 - \alpha \Delta\tau + \frac{\alpha^2}{2} \Delta\tau^2 \right). \quad (18)$$

Из последнего уравнения после некоторых преобразований получаем выражения для математического ожидания и среднеквадратического отклонения срока службы изоляции трансформатора:

$$m_V = B \left( 1 - \alpha m_{\Delta\tau} + \frac{\alpha^2}{2} m_{\Delta\tau^2} \right); \quad (19)$$

$$\sigma_V = B\alpha \sqrt{D_{\Delta\tau} - 2\alpha m_{\Delta\tau} D_{\Delta\tau} + \frac{\alpha^2}{2} D_{\Delta\tau^2}}. \quad (20)$$

Отказы, возникающие вследствие износа и старения, достаточно хорошо описываются нормальным законом распределения с функцией надёжности вида [7,3]

$$R(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t-T_0}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{T_0}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx}, \quad (21)$$

а так как обычно  $\sigma \ll T_0$ , то можно записать это равенство в более компактном виде

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{t-T_0}{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (22)$$

Здесь  $T_0$  и  $\sigma$  - среднее и среднеквадратическое значения времени безотказной работы.

Функция надёжности  $R(t)$ , характеризующая старение трансформатора в результате воздействия токов ВГ, определится следующим образом

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{t-m_V^{HC}}{\sigma_V^{HC}}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 0,5 + \Phi \left( \frac{m_V^{HC} - t}{\sigma_V^{HC}} \right), \quad (23)$$

где  $m_V^{HC}$  и  $\sigma_V^{HC}$  определяются по (19) и (23) соответственно, используя выражения (14) -

(17);  $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  - интеграл вероятностей.

Поскольку могут возникать отказы при допустимом КЭ и отказы, связанные с некачественной электроэнергией, функция надёжности

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad (24)$$

где  $R_i(t)$  - функция надёжности трансформатора при воздействии  $i$ -го фактора, влияющего на надёжность;  $n$  - число факторов.

Средняя наработка до отказа в этом случае равна

$$MTTF = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^n R_i(t) dt. \quad (25)$$

#### Выводы

1. В условиях несинусоидальных режимов потоки отказов систем электроснабжения оказываются нестационарными, неординарными и немарковскими.
2. Оценка надёжности электроснабжения должна выполняться с учётом вероятностных характеристик несинусоидальных режимов и показателей надёжности корректирующих устройств.

#### Перечень ссылок

1. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения Допустимые нагрузки.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1994 - 272 с.
3. Липский А.М. Качество электроснабжения промышленных предприятий. - К.: Вища школа, 1985 - 160 с.
4. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций. - М.: Энергия, 1976 - 552 с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Степанов В.П. Методы вероятностного моделирования в расчётах характеристик электрических нагрузок потребителей. - М.: Энергоатомиздат, 1990 - 128 с.
6. Жежеленко И.В., Шиманский О.Б. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий. - К.: Вища школа, 1986 - 119 с.
7. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д. Математические методы в теории надёжности. - М.: Наука, 1965 - 524 с.
8. Richard Redl, Paolo Tendi, J. Daan van Wyk. Power electronics' polluting effects// IEEE Spectrum. - 1997. - №5. - P. 32-39.
9. Chris Pruess. Low core loss transformers for industrial energy savings// IEEE Power Engineering Review. - 1998. - №7. - P. 12 - 14.
10. Thomas Leibfried. Online monitors keep transformers in service// IEEE Computer Applications in Power. - 1998. - №3. - P. 36 - 42.
11. Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in Northern Taiwan/Chung - Hsing Hu, Chi - Jui Wu, Shih - Shong Yen, Yun - Wu Chen, Bor - An Wu, Jan - San Hwang// IEEE Power Engineering Review. - 1997. - №7. - P. 67 - 68.

Саенко Юрий Леонидович. Д-р техн. наук, проф. кафедры электроснабжения промышленных предприятий Приазовского государственного технического университета, окончил Мариупольский металлургический институт в 1984 году. Основные направления научных исследований - проблемы качества электрической энергии; теория расчёта реактивной мощности; вероятностные методы расчёта электрических нагрузок.

Горпинич Александр Викторович. Аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Приазовского государственного технического университета, окончил Приазовский государственный технический университет в 1998 году. Основные направления научных исследований - проблемы качества электрической энергии и надёжности электроснабжения.