

# Энергетика. Автоматика

УДК 621.31

Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.А. Мясоедова, И.Г. Подгурская

## УЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК ПРИ РАСЧЕТЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

*Приведена уточненная методика расчета симметричных токов короткого замыкания в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой, учитывающая изменение сопротивлений элементов сети за счет высших гармоник, доаварийные несинусоидальные режимы, а также подпитка места короткого замыкания токами высших гармоник.*

*Ключевые слова: нелинейная нагрузка, высшие гармоники, несинусоидальные режимы, элементы электрической сети, математическая модель электрической сети, короткое замыкание, алгоритм, расчет.*

## ACCOUNTING FOR NON-LINEAR LOADS AT CALCULATION OF SHORT CIRCUITS

*The article is devoted of the specification method of determination of symmetrical currents of short circuit in systems of electrical supply with nonlinear load. In the given method are taken account of change of the resistances of network elements for account of high harmonicas and before emergency non-sinusoidal modes, as well as feeding of the place of short circuit by currents of high harmonicas.*

*Key words: nonlinear load, harmonics, non-sinusoidal modes, elements of the electrical network, mathematical model of the electrical network, short circuit, algorithm, calculating*

### Введение

В последнее десятилетие в системах электроснабжения наблюдалось интенсивное внедрение различных нелинейных нагрузок, в первую очередь электронной преобразовательной техники. Доля приемников электрической энергии с нелинейной вольт- или веберамперной характеристикой в развитых странах достигает 50% и имеет очевидную тенденцию к дальнейшему росту. Такие нагрузки вызывают нелинейные искажения кривой напряжения сети или несинусоидальные режимы.

Однако при расчете коротких замыканий общепринят подход, при котором в энергосистемах рассматриваются только линейные потребители, либо принимаются допущения о неучете высших гармоник. Для систем электроснабжения (СЭС), доля нелинейных нагрузок которых велика, расчет коротких замыканий без учета нелинейности приводит к большим погрешностям, а следовательно, к некорректному выбору коммутационного оборудования и уставок релейной защиты. В результате этого снижается надежность при эксплуатации электрических сетей и СЭС.

### Постановка задачи

При коротких замыканиях в системах электроснабжения с источниками высших гармоник изменяются активные и индуктивные сопротивления всех элементов сети до точки короткого замыкания, синхронные генераторы и двигатели потребляют часть высших гармоник тока, генерируемых нелинейными электроприемниками, увеличивается ток короткого замыкания (КЗ) за счет высших гармонических составляющих тока, подтекающего к месту КЗ.

Исходя из сказанного, в тех случаях, когда требуется повышенная точность расчетов токов КЗ в произвольный момент времени, необходимо учитывать переходные процессы в электрических машинах и рассчитывать реальный доаварийный режим сети с учетом высших гармоник (ВГ). В данной работе для повышения надежности при эксплуатации электрических цепей, питающих нелинейную нагрузку, предлагается использовать следующий подход.

Уровни токов КЗ и их распределение по узлам сети определяются структурой и параметрами этой сети на промышленной частоте и частотах ВГ. Методика расчетов токов КЗ формируется с учетом свободных составляющих токов и напряжений промышленной частоты и частот, генерируемых нелинейными потребителями с предварительным приведением уравнений состояния к уравнениям I порядка. Двигательная нагрузка представляется с помощью уравнений Парка – Горева для первой и n-гармоник, в которых проводимости и сопротивления записываются как для двигателя-потребителя ВГ. Доаварийный режим рассчитывается с учетом реальной загрузки двигателей и генераторов методом узловых потенциалов на частотах ВГ, а нагрузка эквивалентруется. При таком подходе для расчета токов КЗ модель электрической сети можно описать в виде отдельных блоков, что значительно облегчает решение задачи.

Рассмотрим методы составления уравнений блоков и их совместного решения при расчетах электромагнитных переходных процессов для трехфазного КЗ в сети с нелинейной нагрузкой.

Уравнения блоков составляются в наиболее удобных системах координат относительно граничных переменных – тока и напряжения в узлах сети. В узловые блоки входят только вращающиеся машины – синхронные и асинхронных двигатели, генераторы электрических станций, а остальная нагрузка, в том числе и нелинейная, т.е. пассивные элементы в узлах, относится к уравнениям в сети. Уравнения всех элементов системы записываются в относительных единицах.

### Модель синхронной машины

Представим модель синхронной машины с учетом высших гармоник на основе уравнений Парка – Горева [1] в системе координат, связанных с осями ротора, для частот первой и n-гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{d_n} = \frac{-d\Psi_{d_n}}{dt} - \Psi_{q_n} \omega - R_{s_n} i_{d_n} \\ U_{q_n} = \frac{-d\Psi_{q_n}}{dt} + \Psi_{d_n} \omega - R_{s_n} i_{q_n} \\ U_{f_n} = \frac{d\Psi_{f_n}}{dt} + R_{f_n} i_{f_n} \\ 0 = \frac{d\Psi_{d(2)}}{dt} + R_{d(2)_n} i_{d(2)} \\ 0 = \frac{d\Psi_{q(2)}}{dt} + R_{q(2)_n} i_{q(2)} \end{array} \right. \quad (1)$$

Потокосцепления, входящие в (1) соответственно равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{d_n} = X_{d_n} i_{d_n} + X_{ad_n} (i_{f_n} + i_{d(2)}) \\ \Psi_{q_n} = X_{q_n} i_{q_n} + X_{aq_n} i_{q(2)} \\ \Psi_{f_n} = X_{f_n} i_{f_n} + X_{ad_n} (i_{d_n} + i_{d(2)}) \\ \Psi_{d(2)} = X_{d(2)} i_{d(2)} + X_{ad} (i_f + i_d) \\ \Psi_{q(2)} = X_{q(2)} i_{q(2)} + X_{aq(2)} i_q \end{array} \right. , \quad (2)$$

где  $U_{d_n}, U_{q_n}, U_{f_n}$  – соответственно составляющие напряжения прямой последовательности  $n$ -гармоники (включая первую) по продольной и поперечной осям машины, обмотки возбуждения;  $\Psi_{d_n}, \Psi_{q_n}, \Psi_{f_n}$  – полные потокосцепления прямой последовательности по продольной и поперечной осям, контура возбуждения на частоте  $n$ -й гармоники;  $\Psi_{d(2)}, \Psi_{q(2)}$  – полные потокосцепления обратной последовательности по продольной и поперечной осям;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $R_{\sigma_n}$  – активное сопротивление цепи статора на частоте  $n$ -й гармоники;  $i_{d_n}, i_{q_n}, i_{f_n}$  – соответственно составляющие токов прямой последовательности по продольной и поперечной осям, ток возбуждения;  $R_{f_n}$  – активное сопротивление контура возбуждения на частоте  $n$ -й гармоники;  $R_{d(2)}, R_{q(2)}$  – соответственно активное сопротивление обратной последовательности по продольной и поперечной осям;  $i_{d(2)}, i_{q(2)}$  – составляющие токов обратной последовательности по продольной и поперечной осям;  $X_{d_n}, X_{q_n}$  – синхронные индуктивные сопротивления по продольной (d) и поперечной (q) осям на частоте  $n$ -й гармоники;  $X_{ad_n}, X_{aq_n}$  – сопротивления взаимной индукции между обмотками статора и ротора по осям d и q на частоте  $n$ -й гармоники;  $X_{f_n}$  – полное индуктивное сопротивление обмотки возбуждения на частоте  $n$ -й гармоники.

Рассматривая синхронную машину как потребителя ВГ, выразим ее сопротивления через номер ВГ.

В качестве примера покажем зависимость индуктивных сопротивлений от высших гармоник для турбогенераторов и явнополюсных синхронных машин.

При КЗ в результате насыщения наблюдается резкое проявление поверхностного эффекта, поэтому индуктивное сопротивление для  $n$ -й гармоники согласно [3] можно записать в виде:

$$X_{d_n} = X_{\sigma} \cdot n + \frac{I}{\frac{1}{nX_{ad}} + \frac{1}{nX_{\sigma_1}} + \frac{1}{nX_{kd}}}, \quad (3)$$

$$X_{q_n} = X_{\sigma} \cdot n + \frac{I}{\frac{1}{nX_{ad}} + \frac{1}{nX_{kq}}}, \quad (4)$$

$$X_{ad_n} = n \cdot X_{ad}; X_{aq_n} = n \cdot X_{aq}; X_{f_n} = X_f \cdot \frac{n}{\sqrt{n \pm 1}}, \quad (5)$$

где  $X_{\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;  $n$  – номер ВГ, генерируемой нелинейной нагрузкой;  $X_{ad}, X_{aq}$  – сопротивление взаимной индукции для первой гармоники по осям d и q;  $X_{\sigma_1}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора для 1-й гармоники;  $X_{kd}, X_{kq}$  – индуктивное сопротивление цепи успокоительного контура по продольной и поперечной осям;  $X_f$  – индуктивное сопротивление обмотки возбуждения для первой гармоники.

Все активные сопротивления схемы замещения синхронной машины, приведенные в выражении (1), на частоте  $n$ -й гармоники должны быть увеличены в  $\sqrt{n}$  раз.

Уравнения для d и q составляющих в выражениях (1), (2) можно записать в виде двух матричных соотношений, в которых матрицы сопротивлений и потокосцеплений содержат элементы для каждой n-й гармоники (включая первую):  $\frac{d[\Psi_n]}{dt} = \omega[\Psi_n] - [R_n][i_n] + [u_n]$ ;  $[\Psi_n] = [X_n][i_n]$ , где  $[\Psi_n], [X_n], [R_n]$  – квадратные матрицы коэффициентов.

После несложных преобразований матричные соотношения можно свести к одной системе, решенной относительно производных токов синхронных машин:

$$\frac{d[i_n]}{dt} = [X_n]^{-1} (\omega[X_n] - [R_n])[i_n] - [X_n]^{-1} [u_n]. \quad (6)$$

При моделировании переходных процессов использовался подход, предложенный в [5]. Отметим, что составляющие напряжений высших гармоник  $U_{d_n}, U_{q_n}, U_{f_n}$  определяются из расчета установившегося несинусоидального режима, предшествующего аварии, методом узловых напряжений.

### Модель асинхронного двигателя

Уравнения асинхронных двигателей, ротор которых вращается со скоростью  $\omega_a$  в координатных осях, вращающихся с синхронной скоростью  $\omega$ , с учетом ВГ имеют вид:

$$\begin{cases} u_{sd_n} = R_s \sqrt{n} i_{sd_n} + \frac{d\Psi_{sd_n}}{dt} - \omega \Psi_{sq_n} \\ u_{sq_n} = R_s \sqrt{n} i_{sq_n} + \frac{d\Psi_{sq_n}}{dt} - \omega \Psi_{sd_n} \\ u_{rd_n} = R_r \sqrt{n} i_{rd_n} + \frac{d\Psi_{rd_n}}{dt} - (\omega - \omega_a) \Psi_{rq_n} \\ u_{rq_n} = R_r \sqrt{n} i_{rq_n} + \frac{d\Psi_{rq_n}}{dt} - (\omega - \omega_a) \Psi_{rd_n} \end{cases}. \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Psi_{sd_n} = X_s \cdot n \cdot i_{sd_n} + X_{ad} \cdot n \cdot i_{rd_n} \\ \Psi_{sq_n} = X_s \cdot n \cdot i_{sq_n} + X_{ad} \cdot n \cdot i_{rq_n} \\ \Psi_{rd_n} = X_r \cdot n \cdot i_{rd_n} + X_{ad} \cdot n \cdot i_{sd_n} \\ \Psi_{rq_n} = X_r \cdot n \cdot i_{rq_n} + X_{ad} \cdot n \cdot i_{sq_n} \end{cases}. \quad (8)$$

В данных выражениях первые два уравнения относятся к статору (обозначаются в индексе буквой «s»), вторые – к ротору (обозначаются буквой «r»). Индекс «n» соответствует потокосцеплению на n-й частоте ВГ, n – номер ВГ. Остальные обозначения общепринятые.

Уравнения для d и q составляющих, как и в предыдущем случае, представляются в матричной форме  $\frac{d[\Psi_n]}{dt} = \omega_a [\Psi_n] - [R_n][i_n] + [u_n]$ ,  $[\Psi_n] = [X_n][i_n]$ .

После преобразований получим уравнение относительно тока аналогично предыдущему случаю  $\frac{d[i_n]}{dt} = [X_n]^{-1} (\omega_a [X_n] - [R_n])[i_n] - [X_n]^{-1} [u_n]$ .

### Модель электрической сети

**Уравнения электрической сети.** Уравнения электрической сети с нелинейной нагрузкой записываются в системе координат d, q, вращающейся с синхронной скоростью  $\omega$ . Направление осей принято таким, что ось q опережает ось d на  $90^\circ$ , а направление оси d совпадает с направлением оси вектора фазы a. В такой системе для элемента сети, представленного сопротивлением r, индуктивностью L, ограниченной узлами  $\alpha$  и  $\beta$ , и поперечной емкости C в узле  $\alpha$  соответственно записываем [5]:

$$\begin{cases} u_{d_{\alpha n}} = u_{d_{\beta n}} + r_n i_{d_{\alpha\beta n}} + L_n \frac{di_{d_{\alpha\beta n}}}{dt} - \omega L_n i_{q_{\alpha\beta n}}; \\ u_{q_{\alpha n}} = u_{q_{\beta n}} + r_n i_{q_{\alpha\beta n}} + L_n \frac{di_{q_{\alpha\beta n}}}{dt} - \omega L_n i_{d_{\alpha\beta n}} \end{cases}; \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{du_{d_{\alpha n}}}{dt} = \frac{1}{C_n} i_{q_n} + \omega h u_{q_{\alpha n}} \\ \frac{du_{q_{\alpha n}}}{dt} = \frac{1}{C_n} i_{d_n} - \omega h u_{d_{\alpha n}} \end{cases}. \quad (10)$$

Здесь индекс «n» обозначает номер гармоники (включая первую).

При принятых направлениях осей d и q, вводя представления токов и напряжений в комплексной форме посредством соотношений:  $i_n = i_{d_n} + j i_{q_n}$ ;  $u_n = u_{d_n} + j u_{q_n}$ , преобразуем (9), (10) к виду:

$$u_{\alpha n} = u_{\beta n} + z_{\alpha\beta n} i_{\alpha\beta n} + L_n \frac{di_{\alpha\beta n}}{dt}, \quad C_n \frac{du_{\alpha n}}{dt} = i_n - j\omega C_n u_{\alpha n},$$

где  $z_{\alpha\beta n} = r_n + j\omega L_n$ .

Тогда уравнение баланса токов в узлах (уравнения узловых напряжений) для первой гармоники будет иметь вид:

$$i_{\alpha} = u_{\alpha} \sum_{\beta=1}^{l+n} \frac{1}{z_{\alpha\beta}} - \sum_{\beta=1}^l \frac{u_{\beta}}{z_{\alpha\beta}} - \sum_{\beta=1}^{l+n} \frac{L_{\alpha\beta}}{z_{\alpha\beta}} \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} - C \frac{du_{\alpha}}{dt} + j u_{\alpha} \omega C = u_{\alpha} \left( \sum_{\beta=1}^{l+n} \frac{1}{z_{\alpha\beta}} - j\omega C \right) - \sum_{\beta=1}^l \frac{u_{\beta}}{z_{\alpha\beta}} - i_{\square\alpha}. \quad (11)$$

Здесь  $i_{\square\alpha}$  – сумма слагающих в первой части, содержащих производные по токам ветвей и напряжений в узле;  $l$  – количество узлов, связанных с узлом  $\alpha$ ;  $n_r$  – количество шунтов в данном узле.

Для высших гармоник запись уравнений баланса тока аналогична, только сопротивления, индуктивности и емкости записываются с индексом «n» (т.е. на частотах ВГ). В узлах, где нет нелинейной нагрузки  $i_{\square\alpha} = 0$  (в левой части уравнения ставится 0), в узлах, где есть источник ВГ, в левой части уравнения записывается ток n-гармоники, генерируемый данным источником ВГ.

В матричной форме уравнения узловых напряжений относительно точки КЗ будут:

$$[Y_n][u_n] + [Y_n]_k [u_n]_k = [i_n] + [i_{\Delta_n}], \quad (12)$$

где  $[Y_n]$  – комплексная матрица узловых проводимостей сети порядка m, включающая и проводимости на частотах ВГ; m – количество узлов сети;  $[Y_n]_k$  – столбцовая матрица проводимостей связи узлов сети с точкой КЗ, включающая и проводимости на частотах ВГ;  $[u_n], [i_n]$  – комплексные векторы напряжений и токов в узлах сети; их составляющие дают мгновенные значения этих величин в осях d и q;  $[i_{\Delta_n}]$  – вектор дополнительных токов в узлах;  $u_{k_n}$  – напряжение в месте КЗ.

На частотах ВГ в узлах, где нет нелинейной нагрузки,  $i_n = 0$ .

Для определения тока в месте КЗ уравнение (12) дополняется уравнением

$$[Y_n]_k^T [u_n] + Y_{kk_n} = i_{k_n} + i_{\Delta_n}, \quad (13)$$

где  $i_{\square k_n} = \sum_{\beta=1}^n \frac{L_{k\beta n}}{Z_{k\beta n}} \frac{di_{k\beta}}{dt}$ ;  $i_{k_n}$  – ток в месте КЗ;  $[Y_n]_k^T$  – транспонированная матрица  $[Y_n]_k$ .

Элементы матрицы узловых проводимостей в выражениях (12), (13) представляются в виде зависимостей от номера гармоники.

При расчете электромагнитных переходных процессов в системах электроснабжения учитываются воздушные и кабельные линии, силовые трансформаторы, токоограничивающие реакторы.

Рассмотрим изменение их сопротивлений при несинусоидальных режимах.

**Зависимость сопротивлений элементов сети от номера высших гармоник.** В воздушных линиях электропередачи, провода которых имеют витую многопроволочную конструкцию, зависимость  $R(n)$  существенно нелинейна. На значения активного сопротивления влияют поверхностный эффект и эффект близости, проводимость земли и наличие стального троса. В этом случае активное сопротивление на частоте  $n$ -й гармоники представляется в виде

$$R_n = k_{R_n} \cdot R_{(1)}, \quad (14)$$

где  $k_{R_n}$  – коэффициент увеличения активного сопротивления ВЛ от номера высших гармоник;  $R_{(1)}$  – сопротивление ВЛ на частоте первой гармоники, определяемое по погонным параметрам линии.

Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления ВЛ со сталеалюминиевыми проводами от номера высших гармоник (ВГ) представлена согласно [3] следующим выражением:

$$k_{R_n} = \begin{cases} 1 + \frac{x^4}{3} & \text{при } x \leq 1 \\ x + 0,25 + \frac{0,47}{x} & \text{при } x > 1 \end{cases} \quad (15)$$

где  $x = 0,4\sqrt{n/R_l}$ . Здесь  $R_l$  – сопротивление ВЛ на промышленной частоте, определяемое по выражению  $R_l = \frac{\rho}{F}(1 + \alpha_T(t - 20))$ , где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление;  $F$  – сечение сталеалюминиевой части провода,  $\text{мм}^2$ ;  $\alpha_T$  – температурный коэффициент расширения, равный 0,004;  $t$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ .

Погрешность расчета по приведенной формуле не превосходит 3%.

В табл. 1 приведена зависимость  $k_{R_n}$  от номера ВГ, а на рис. 1 показано семейство кривых  $k_{R_n}(n)$  для сталеалюминиевых проводов.

Таблица 1

**Зависимость увеличения активного сопротивления сталеалюминиевых проводов ВЛ от номера ВГ**

Марка, сечение провода	Сопротивление ВЛ (Ом/км) при промышленной частоте, $R_l$	Коэффициент увеличения активного сопротивления ВЛ от номера ВГ															
		5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37	41	43	47	49
АС-50	0,63	1,79	1,94	2,20	2,33	2,55	2,66	2,86	2,96	3,14	3,22	3,39	3,47	3,62	3,69	3,84	3,91
АС-70	0,45	1,94	2,13	2,47	2,62	2,90	3,03	3,27	3,39	3,61	3,71	3,91	4,01	4,19	4,28	4,45	4,54
АС-95	0,332	2,11	2,34	2,76	2,94	3,28	3,43	3,72	3,86	4,12	4,24	4,47	4,59	4,80	4,91	5,11	5,21
АС-120	0,263	2,27	2,54	3,02	3,23	3,62	3,79	4,12	4,27	4,57	4,71	4,97	5,09	5,34	5,46	5,69	5,80
АС-150	0,21	2,44	2,76	3,31	3,55	3,98	4,18	4,55	4,72	5,05	5,21	5,51	5,65	5,92	6,06	6,31	6,44
АС-185	0,17	2,63	2,99	3,61	3,88	4,36	4,59	5,00	5,19	5,56	5,73	6,07	6,23	6,53	6,68	6,97	7,11
АС-240	0,131	2,91	3,33	4,04	4,35	4,91	5,16	5,63	5,86	6,28	6,47	6,85	7,04	7,39	7,56	7,88	8,04
АС-300	0,105	3,18	3,66	4,46	4,81	5,43	5,72	6,25	6,49	6,97	7,19	7,62	7,82	8,21	8,40	8,77	8,95
АС-400	0,079	3,59	4,15	5,08	5,48	6,21	6,54	7,16	7,44	7,99	8,25	8,74	8,98	9,43	9,65	10,07	10,28

Эквивалентное сопротивление ВЛ с учетом всех генерируемых источниками искажений высших гармоник равно:

$$R_{eq}^L = R_{(1)} \sqrt{\sum_{i=1}^n k_{R_{n_i}}^2}. \quad (16)$$

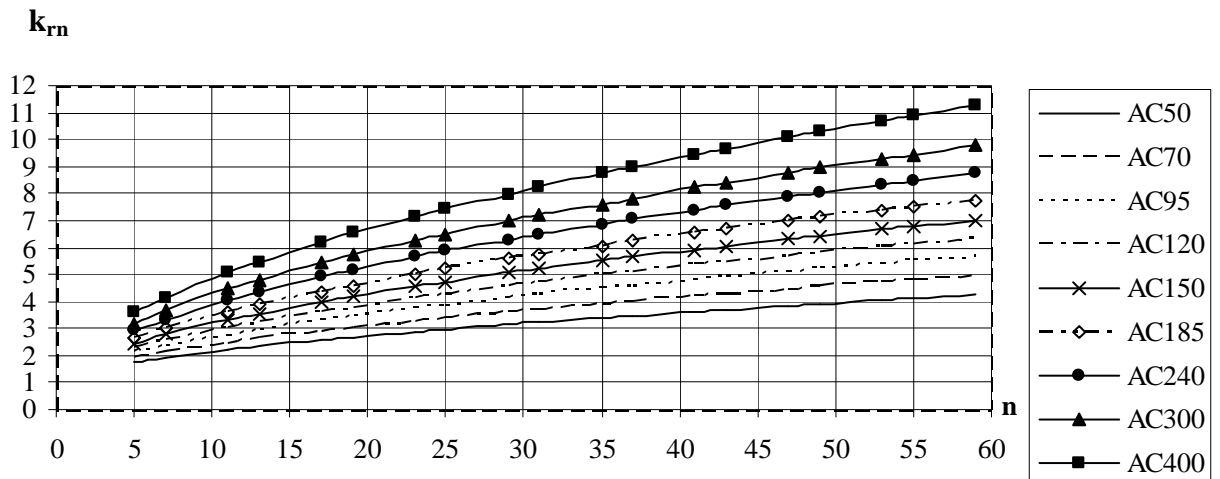


Рис. 1. Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления от номера гармоники.

Для кабельных линий активное сопротивление на частотах высших гармоник определяется влиянием поверхностного эффекта и эффекта близости, а также геометрией сечений кабеля.

Уравнение зависимости  $k_{R_n}$  имеет вид  $k_{R_n} = k_{S_n} + k_{\delta_n}$ , где  $k_{S_n}$ ,  $k_{\delta_n}$  – коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости.

На рис. 2 и в табл. 2 представлены зависимости  $k_{R_n}$  от номера ВГ для современных силовых трехжильных кабелей с алюминиевыми жилами.

Эквивалентное сопротивление кабельной линии с учетом высших гармоник также определяется зависимостью (16).

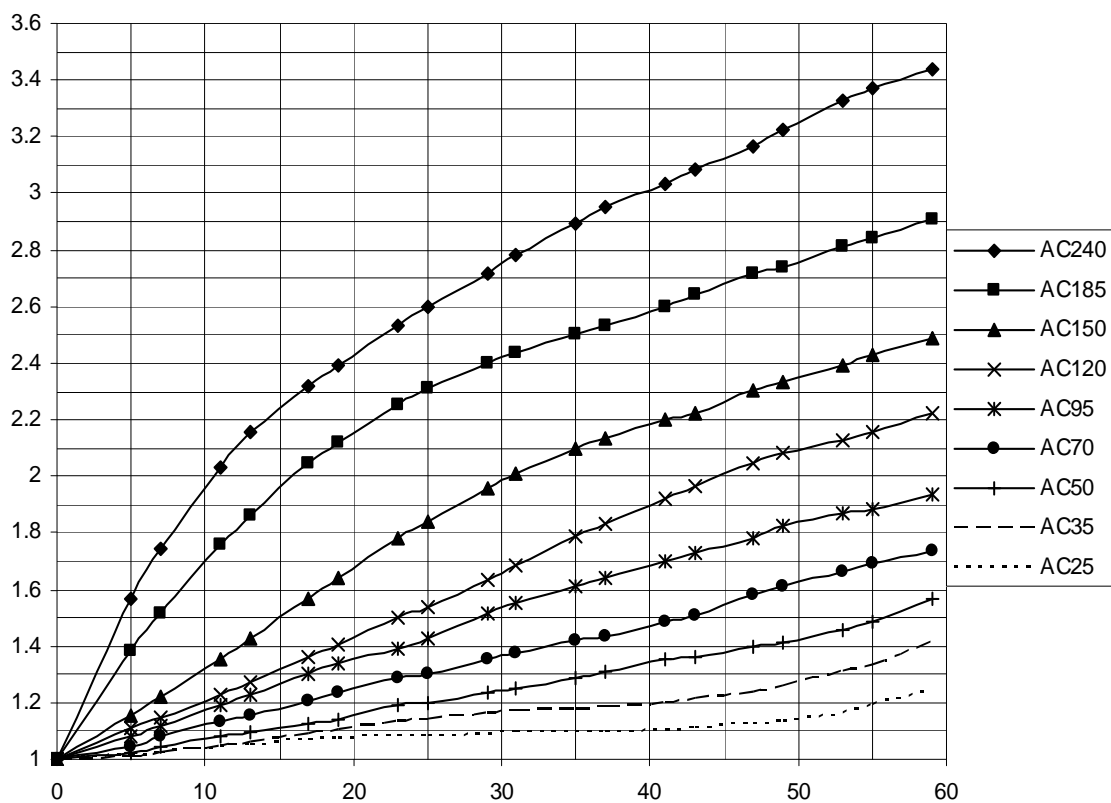


Рис. 2. Зависимость  $k_{R_n}$  от  $n$  для кабелей.

Зависимость  $k_{R_n}$  от  $n$  для кабелей

Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>	Зависимость $k_{R_n}$ от номера ВГ, $n$															
	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37	41	43	47	49
25	1,014	1,024	1,042	1,050	1,065	1,071	1,081	1,084	1,090	1,093	1,097	1,099	1,105	1,110	1,124	1,135
35	1,009	1,020	1,047	1,061	1,091	1,105	1,130	1,141	1,160	1,167	1,180	1,186	1,199	1,216	1,239	1,256
50	1,025	1,045	1,080	1,097	1,125	1,142	1,188	1,200	1,239	1,250	1,290	1,313	1,352	1,364	1,400	1,415
70	1,045	1,080	1,131	1,153	1,205	1,239	1,286	1,303	1,352	1,375	1,420	1,438	1,489	1,511	1,585	1,614
95	1,084	1,118	1,191	1,229	1,303	1,337	1,392	1,426	1,517	1,551	1,608	1,642	1,700	1,727	1,784	1,824
120	1,111	1,148	1,227	1,270	1,359	1,406	1,503	1,540	1,636	1,688	1,790	1,830	1,920	1,966	2,045	2,080
150	1,157	1,218	1,352	1,424	1,569	1,641	1,778	1,842	1,959	2,010	2,099	2,137	2,198	2,222	2,307	2,335
185	1,383	1,519	1,758	1,863	2,043	2,121	2,252	2,308	2,401	2,439	2,503	2,531	2,597	2,641	2,713	2,740
240	1,565	1,741	2,033	2,154	2,318	2,392	2,534	2,597	2,716	2,784	2,892	2,955	3,034	3,085	3,165	3,222

На активное сопротивление трансформатора при наличии ВГ влияют геометрические размеры, поверхностный эффект, вихревые токи и наличие магнитных полей рассеяния. С инженерной точностью коэффициент увеличения активного сопротивления трансформатора от номера ВГ можно определить согласно [3] по выражению:

$$k_{R_n} = 1 + 0,1n^{1,2}. \quad (17)$$

В материалах СИГРЭ приводится более точная зависимость активного сопротивления трансформатора от номера ВГ:

$$R(n) = 0,1026kn_{KT}(y+n), \quad (18)$$

где  $y$  – отношение потерь на гистерезис к потерям от вихревых токов;  $k = \frac{l}{y+l}$ .

Однако в условиях эксплуатации пользоваться ею трудоемко в плане сбора исходной информации.

На рис. 3 представлена зависимость  $k_{R_n}(n)$  для силовых трансформаторов.

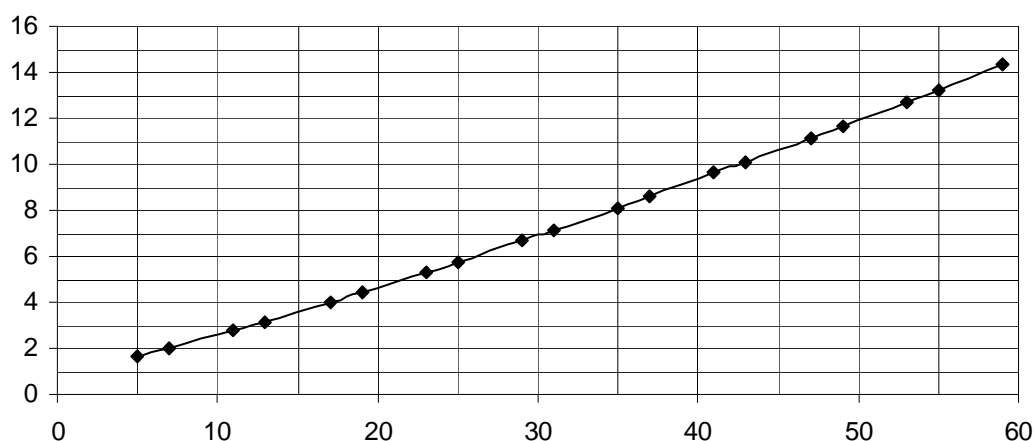


Рис. 3. Зависимость  $k_{R_n}(n)$  для силовых трансформаторов.

В реакторах активное сопротивление также может быть определено по выражениям (16) и (17).

Таким образом, получено общее выражение для определения эквивалентного сопротивления любого элемента распределительной сети с учетом высших гармоник (16).

Индуктивные сопротивления линий, трансформаторов, реакторов на частоте  $n$ -й гармоники определяются по выражению [3]  $X_n = X \cdot n$ , где  $X$  – индуктивное сопротивление элемента сети на промышленной частоте.



Емкостная проводимость воздушных линий (ВЛ) представляется в виде  $B_n = B_L \cdot n$ , где  $B_L$  – емкостная проводимость ВЛ при промышленной частоте.

Таким образом, уравнения блоков представлены с учетом высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой.

### Алгоритм расчета симметричных токов КЗ

Расчет переходного процесса в системе электроснабжения сводится к совместному решению уравнений блоков, – например, модифицированным системным методом. Порядок расчета представляется следующей последовательностью действий:

рассчитывается несинусоидальный режим, предшествующий аварии;

производится преобразование напряжений, записанных в координатах сети, в координаты синхронной машины;

определяются токи подпитки от синхронных и асинхронных машин решением соответствующих уравнений узловых блоков с учетом ВГ;

преобразуются полученные токи в координаты сети;

решаются уравнения блока сети (уравнения узловых напряжений), – например, модифицированным методом Ньютона – Рафсона.

При расчетах КЗ, когда ротор асинхронных машин вращается с синхронной скоростью  $\omega$ , преобразование токов и напряжений будет соответствовать повороту осей координат на постоянный угол. Для  $i$ -й машины он равен начальному (при  $t = 0$ ) относительному углу поворота между осями сети и  $i$ -й машины.

Для определения напряжения в узлах сети, тока и напряжения в месте КЗ необходимо предварительно преобразовать форму уравнений сети. Из (12) следует, что

$$\cdot [u_n] = [Y_n]^{-1} \left( [i_n] + [i_{\Delta_n}] - [Y_n] \cdot u_{kn} \right) \quad (19)$$

подставив (19) в (13), получим

$$\left( [Y_{kk}] - [Y_{kn}]^T [Y_n]^{-1} [Y_{kn}] \right) u_k = i_{k_n} + i_{\Delta k_n} - [Y_{kn}]^T [Y_n]^{-1} \left( i_n + i_{\Delta_n} \right)$$

или

$$[\bar{Y}_n] u_k = i_{k_n} + i_{\Delta k_n} - [Y_{kn}]^T [Y_n]^{-1} \left( i_n + i_{\Delta_n} \right)$$

где  $[\bar{Y}_n] = [Y_{kk}] - [Y_{kn}]^T [Y_n]^{-1} [Y_{kn}]$ .

Данный подход позволяет найти мгновенное значение полного тока КЗ в любой точке системы электроснабжения, содержащей нелинейную нагрузку, отличается высокой точностью и возможностью определения тока подпитки места КЗ от системы, любого генератора или двигателя, с учетом нелинейной нагрузки.

На основе предложенного метода расчета симметричных токов КЗ в сетях с нелинейной нагрузкой разработан алгоритм расчета токов короткого замыкания. Данный алгоритм включает следующие этапы:

ввод и контроль исходных данных;

расчет параметров схем замещения элементов сети – воздушных и кабельных линий, энергоустановки, силовых трансформаторов, реакторов, генераторов, синхронных и асинхронных двигателей для промышленной частоты и высших гармоник, генерируемых нелинейными нагрузками;

расчет токов ВГ от нелинейных электроприемников;

расчет установившегося режима сети для первой и  $n$ -х высших гармоник методом узловых напряжений и определение токов ВГ в ветвях схемы; определение напряжений в узлах на частотах ВГ, в том числе и в электрических машинах;

введение в схему замещения шунта – точки КЗ;

решение дифференциальных уравнений Парка – Горева для различных моментов времени с учетом момента сопротивления на валу высоковольтных двигателей и скорости вращения, высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой;

определение токов КЗ: от системы, генераторов, двигательной нагрузки, нелинейной нагрузки, суммарного значения в произвольный момент времени;

определение токов во всех ветвях схемы с учетом ВГ;

определение остаточных напряжений во всех узлах схемы с учетом ВГ;

вывод результатов расчета на печать.

При расчете установившегося режима задается напряжение в базисном узле схемы, формируется матрица узловых проводимостей, определяются напряжения на частотах  $n$ -х гармоник во всех остальных узлах схемы с учетом фактической загрузки силовых трансформаторов и положения РПН или ПБВ. Режимы работы двигателей и потребляемые ими токи также определяются для реальной загрузки. Затем заново находятся напряжения в узлах по полученным токам и сравниваются с первоначальными значениями. Расчет повторяется до тех пор, пока значения напряжения в узлах для всех гармоник не совпадут. Определяется эквивалентное напряжение узла по выражению:

где  $m$  – номер последней учитываемой гармоники;  $u_{\alpha_n}$  – напряжение в узле, полученное в результате расчета установившегося режима.

Дифференциальные уравнения Парка – Горева формируются в каноническом виде. Статические элементы распределительной сети учтены в ряде уравнений равновесия напряжения для соответствующих схем замещения этих элементов в переходных режимах в тех же осях координат, что и двигатели. Уравнения Парка – Горева для  $n$ -гармоники ( $n=1,3,5$  и т.д.) решаются численным интегрированием с помощью модифицированного системного метода, обеспечивающего устойчивость решения и сокращающего время решения по сравнению с общепринятыми методами решения.

### Заключение

1. Предложены математические модели синхронных машин и асинхронных двигателей для определения мгновенных значений токов SC в произвольный момент времени, учитывающие влияние высших гармоник, генерируемых нелинейными потребителями сети.

2. Разработана математическая модель электрической сети для расчета доаварийных установившихся режимов в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой.

3. Показан алгоритм уточненного расчета симметричных коротких замыканий в сетях с несимметричными режимами, позволяющий учитывать переходные процессы в электрических машинах, реальную загрузку элементов сети, доаварийный режим работы сети, влияние высших гармоник на величину токов SC.

---

1. Горев, А.А. Переходные процессы в синхронных машинах. – Л.: Наука, 1985. – 502.

2. Гамазин, С.И., Ставцев, В.А., Цырук, С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 424.

3. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

4. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152.

5. Сивокобыленко, В.Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций. – Донецк: Донецкий политехнический институт, 1984. – 116.