

## ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

**Костюченко В. И., Кузьмин В. М.**  
**V.I. Kostyuchenko, V.M. Kuzmin**

### **ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА**

### **THE HIGHER HARMONICS OF MAGNETIZING CURRENTS IN TRANSFORMER TYPE HEATERS**



**Костюченко Владимир Иванович** – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kem@knastu.ru](mailto:kem@knastu.ru).

**Mr. Vladimir I. Kostyuchenko** — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Military Education, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [kem@knastu.ru](mailto:kem@knastu.ru).



**Кузьмин Вячеслав Матвеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kem@knastu.ru](mailto:kem@knastu.ru).

**Mr. Vyacheslav M. Kuzmin** — Doctor in Engineering, Professor of the Department of Electrical Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [kem@knastu.ru](mailto:kem@knastu.ru)

**Аннотация.** Проведены исследования высших гармоник намагничивающих токов трансформаторов, имеющих симметричный магнитопровод. Предложены аналитические выражения для расчета модулей высших гармоник токов намагничивания отдельных фаз трансформатора и их симметричных составляющих. Достоверность методики подтверждена экспериментальными данными. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при проектировании и производстве нагревательных элементов системы энергообеспечения на основе трехфазных трансформаторов.

**Summary.** A study of the higher harmonics of magnetizing currents of transformers with a symmetric magnetic conductor was carried out. Analytical equations are proposed for calculating modules of the higher harmonics of magnetizing currents of a transformer's separate phases and their symmetric components. The reliability of this method was confirmed by experimental data. Results of the theoretical and experimental research can be used for designing and manufacturing of heating elements within power supply systems on the basis of three-phase transformers.

**Ключевые слова:** высшие гармоники намагничивающих токов трансформаторов; симметричный магнитопровод; электродонагреватель.

**Key words:** higher harmonics of magnetizing currents of transformers; symmetric magnetic conductor; electrical water-heater.

УДК 621.356; 621.314.2

Необходимость обеспечения плавного пуска нагревательного элемента трансформаторного типа обусловлена характерным для трансформатора переходным процессом при подключении его к сети. Возникающие при этом ударные токи и перенапряжения отрица-

тельно сказываются на состоянии изоляции, оказывают влияние на питающую сеть и должны быть по возможности снижены.

Это может быть достигнуто следующими способами: включение производится в строго определённый момент времени, частота или величина напряжения во время включения плавно доводятся до рабочего значения.

Плавный пуск позволяет ограничить скорость нарастания температуры изоляции в короткозамкнутом трансформаторе (КЗТ). За счёт этого может быть увеличен срок службы изоляции и КЗТ в целом.

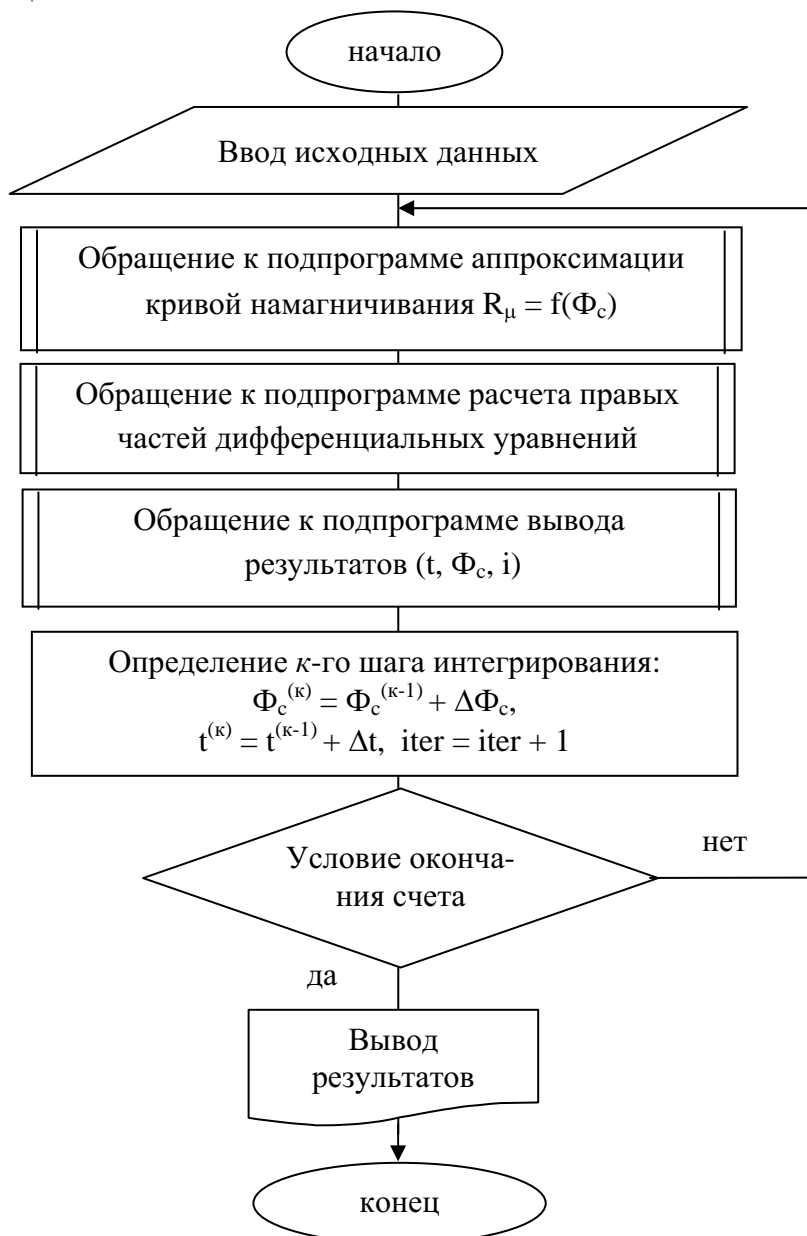


Рис. 1. Блок-схема расчета переходного процесса трехфазного трансформатора

Задача регулирования нагрева является одной из наиболее важных и решается путем формирования управляющего сигнала. Применяются как замкнутые системы регулирования, так и разомкнутые. Первые для потребителя предпочтительней в силу постоянства температуры нагреваемой среды и возможности задания температуры непосредственно, но дороже,

поскольку требует применения датчиков температуры, усложняется процесс настройки и калибровки.

Для исследования зависимости величины тока намагничивания от времени включения были произведены расчеты переходных процессов при включении электроводонагревателя трансформаторного типа с пространственной магнитной системой призматической формы. Блок-схема расчета переходных процессов представлена на рис. 1.

Расчеты показали, что максимальный бросок тока включения  $i_{1\max}$  сильно зависит от начальной фазы напряжения  $\varphi_0$ . В кривой тока включения наблюдаются нагрузочная и намагничивающая составляющие. Нагрузочный ток ввиду малости индуктивностей рассеяния практически сразу принимает установившийся синусоидальный характер и не зависит от  $\varphi_0$ .

Для устранения бросков тока в обмотках КЗТ включение и отключение нагрузки желательнее осуществлять в момент перехода первичного тока через ноль (чаще – в ожидаемый момент).

Анализ полученных результатов показал, что наилучшим моментом включения трехфазного трансформатора в сеть является вариант при начальной фазе напряжения  $U_A$ ,  $\varphi_0 = 0$ ,  $\Phi_{\max}^* = 1,71$ ,  $i_{1\max}^* = 3,38$ ; наилучшим –  $\varphi_0 = \pi/2$ ,  $\Phi_{\max}^* = 0,99$ ,  $i_{1\max}^* = 1,55$ .

Произведена оценка длительности переходного процесса при самом неблагоприятном моменте включения данного устройства ( $\varphi_0 = 0$ ). Полученный результат показывает, что время окончания переходного процесса  $t_k = 900$  о.е. ( $t_k = 2,813$  с). Зная величины бросков тока и время переходного процесса, можно производить настройку защитной аппаратуры, делая запас с учетом допущений и погрешностей расчета.

При анализе несинусоидальных режимов систем электроснабжения (СЭ) влиянием токов намагничивания понижающих трансформаторов на гармонические искажения напряжения обычно пренебрегают ввиду их небольшой величины, считая, что основными источниками высших гармоник в электрических сетях являются вентильные преобразователи, электродуговые печи, сварочные установки. Однако измерения в сетях 6 – 10 кВ показывают наличие значительных, достигающих 2 – 4 % фоновых составляющих высших гармоник напряжения в электрических сетях с заведомо линейными нагрузками, причем доминирующими являются 3, 5 и 7 гармоники. Объяснить появление таких гармоник соответствующим их проникновением из высоковольтной питающей сети удастся не всегда. Представляется, что одной из главных причин их возникновения является влияние нелинейных шунтов намагничивания трансформаторов, суммарная мощность которых может быть соизмерима с мощностью трансформатора связи с энергосистемой [1; 3]. В токе намагничивания присутствуют все нечетные гармоники, в том числе и кратные трем. Последние, однако, являются гармониками не нулевой, а прямой и обратной последовательностей. Наибольший вес имеют 3, 5 и 7 гармоники.

Как правило, при номинальном напряжении в питающей сети величина токов намагничивания достаточно мала. Однако уже при повышении напряжения до уровня  $1,15 U_N$  (максимальное рабочее напряжение) величина тока намагничивания может возрасти в 2,5 – 2,7 раза [2; 3], а коэффициент искажения синусоидальности напряжения, согласно расчетам, может даже при отсутствии в сети специально установленных емкостных элементов достигнуть значения 1 – 2 %. Наличие в распределительной сети емкостных элементов типа конденсаторных батарей (КБ) поперечной емкостной компенсации может привести к возникновению резонансных условий с соответствующим ростом токов и напряжений отдельных гармоник.

Теоретические исследования показывают, что в нормальном режиме при установке в СЭ регулируемых КБ мощностью, соизмеримой с номинальной мощностью сетевого трансформатора, возможны резонансы, начиная с 5 – 7 гармоник. При возникновении в сети однофазного замыкания на землю (наиболее частого повреждения в распределительных сетях 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью) резонансная частота в контуре нулевой последовательности может сместиться в область 3 – 5 гармоник.

С целью определения аналитических выражений для расчета модулей высших гармоник токов намагничивания отдельных фаз трансформатора, Г.Н. Петровым были записаны и совместно решены системы уравнений магнитной и электрической цепей трехфазного трехстержневого трансформатора на холостом ходу [4]. В нашем случае (см. рис. 2) длины магнитных путей всех стержней магнитопровода трансформатора одинаковые, следовательно, представленные по методу гармонического баланса в виде совокупности решений для гармоник намагничивающих токов  $I_v$  с относительными частотами  $v = 1, 3, 5, 7 \dots$  и для гармоник намагничивающих сил стержней имели бы для всех гармоник, не кратных трем, следующий вид:

а) соединение обмотки ВН в звезду:

$$W_1 \dot{I}_{v(A,B,C)} = \dot{F}_{v(A,B,C)};$$

б) соединение обмотки ВН в треугольник:

$$W_1 \dot{I}_{v(A,B,C)} = \sqrt{3} \dot{F}_{v(A,B,C)},$$

где  $\dot{F}_v = l \cdot \dot{H}_v$ ,  $\dot{I}_{v(A,B,C)}$  – мгновенные значения токов намагничивания фаз;  $l$  – длины магнитных путей для стержней магнитопровода;  $H_v = f(B)$  – напряженности магнитного поля в соответствующих стержнях трансформатора, нелинейно зависящие от индукций магнитного поля, являющихся, в свою очередь, функциями напряжения, приложенного к обмотке трансформатора. Причем токи гармоник, кратных трем, в обоих случаях отсутствуют.

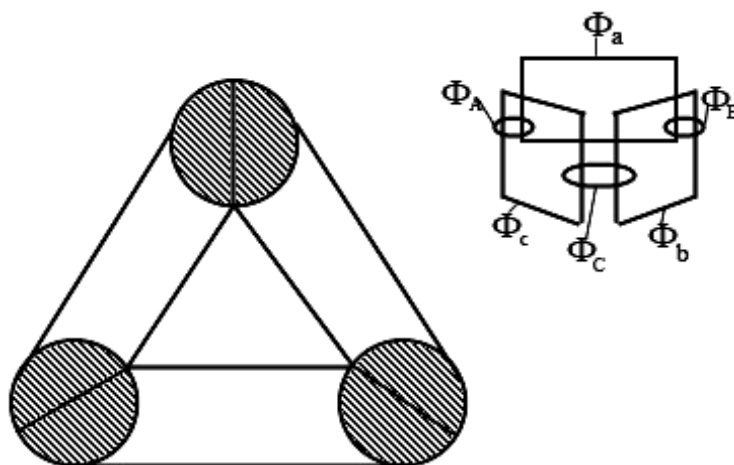


Рис. 2. Магнитная система и поле в трехфазном трансформаторе с пространственной магнитной системой

При соединении первичной и вторичной обмоток в звезду третья гармоническая намагничивающего тока по обмоткам протекать не может, в этом случае возникает третья гармоническая в магнитном потоке  $\Phi_0$ .

На практике первую и третью гармонические потока  $\Phi_0$  приходится учитывать с точки зрения потерь от вихревых токов, которые этот поток создают в стенках бака и других металлических конструкциях трансформатора. При анализе намагничивающих токов будем пренебрегать потоком  $\Phi_0$  ввиду его относительно малого значения.

Для исследования трансформатора с обмотками, соединенными по схеме треугольник – звезда, составляются уравнения:

$$\begin{aligned}F_B - F_A &= i_{0rB} W_1 - i_{0rA} W_1 = i_{0rI} W_1, \\F_C - F_B &= i_{0rC} W_1 - i_{0rB} W_1 = i_{0rII} W_1, \\F_A - F_C &= i_{0rA} W_1 - i_{0rC} W_1 = i_{0rIII} W_1.\end{aligned}\quad (1)$$

Так как магнитные потоки в стержнях так же, как и напряжения, синусоидальны и образуют симметричную трехфазную систему, то, зная магнитные характеристики каждого стержня, можно построить кривые  $F_A, F_B, F_C$  в функции времени и путем вычитания кривых найти форму линейных намагничивающих токов по формулам (1).

Фазные намагничивающие токи, текущие в треугольнике, тождественны по форме с кривыми намагничивающих сил отдельных стержней, поэтому

$$i_{0rA} = \frac{F_A}{W_1}; \quad i_{0rB} = \frac{F_B}{W_1}; \quad i_{0rC} = \frac{F_C}{W_1}.\quad (2)$$

В случае соединения обмоток (при том же числе витков в фазе) по схеме звезда – звезда к уравнениям полного тока (1) следует добавить равенство  $i_{0rA} + i_{0rB} + i_{0rC} = 0$ . Из совместного решения уравнений определяются токи:

$$\begin{aligned}i_{0rA} &= \frac{2F_A - F_B - F_C}{3W_1}; \\i_{0rB} &= \frac{2F_B - F_A - F_C}{3W_1}; \\i_{0rC} &= \frac{2F_C - F_A - F_B}{3W_1}.\end{aligned}\quad (3)$$

При соединении первичной обмотки в звезду и вторичной в треугольник намагничивающие токи  $i_{0rA}, i_{0rB}, i_{0rC}$ , определяемые из равенств (2), следует разбить на две части:

$$\begin{aligned}i_{0rA} &= i'_{0rA} + i_{0r\Delta} = \frac{F_A}{W_1}; \\i_{0rB} &= i'_{0rB} + i_{0r\Delta} = \frac{F_B}{W_1}; \\i_{0rC} &= i'_{0rC} + i_{0r\Delta} = \frac{F_C}{W_1}.\end{aligned}\quad (4)$$

Ток, протекающий во вторичной обмотке, соединенной треугольником  $i_{0r\Delta}$ , одинаковый во всех трех фазах, будет протекать в треугольнике, токи  $i'_{0rA}, i'_{0rB}, i'_{0rC}$  – в звезде, причем  $i'_{0rA} + i'_{0rB} + i'_{0rC} = 0$ .

При этих условиях, складывая уравнения (4), определяются:

$$\left. \begin{aligned} i_{0r\Delta} &= \frac{F_A + F_B + F_C}{3W_1} \\ i'_{0rA} &= \frac{F_A}{W_1} - i_{0rA}; \\ i'_{0rB} &= \frac{F_B}{W_1} - i_{0rB}; \\ i'_{0rC} &= \frac{F_C}{W_1} - i_{0rC} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Радикальной мерой для устранения многих нежелательных явлений, связанных с наличием высших гармонических в магнитном потоке, является соединение одной из обмоток трехфазных трансформаторов в треугольник. В этом случае высшие гармонические в магнитных потоках и фазных ЭДС удается почти полностью устранить.

Проведенные исследования показали, что при проектировании систем электроводонагрева на основе трехфазных трансформаторов первичную (питаемую от сети) обмотку предпочтительно соединять в треугольник. При необходимости соединения первичной обмотки трансформаторов, используемых для электроводонагрева в звезду, для продления срока службы и дополнительных возможностей по преобразованию переменного напряжения для бытовых нужд возможно размещать дополнительную обмотку низшего напряжения, соединенную в треугольник.

В связи с вышеизложенным можно заключить, что проведенные исследования и анализ результатов позволяют расширить границы применения электронагревателей на основе трехфазных трансформаторов. В настоящее время всё большую востребованность получает специализированное оборудование, предназначенное для таких отраслей, как железнодорожный транспорт (нагрев цистерн), нефтегазодобывающий комплекс (нагрев нефти, газа), предприятия химической промышленности и др. Использование нагревательных элементов трансформаторного типа по различным критериям оценки наиболее целесообразно. Экспериментальные исследования макетных образцов предложенного устройства полностью подтвердили правильность теоретических выводов, а анализ результатов подтверждает высокие эксплуатационные характеристики, высокую надежность и долговечность таких устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Бредли, П. Боджер; пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1990. – 320 с.: ил.
2. Важнов, А. И. Электрические машины / А. И. Важнов. – Л.: Энергия, 1969. – 768 с.: ил.
3. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.: ил.
4. Петров, Г. Н. Трансформаторы / Г. Н. Петров. – М.: Госэнергоиздат, 1934. – 446 с.: ил.