

УДК 621.314

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А.В. Сериков, В.М. Кузьмин

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

E-mail: kem@knastu.ru

Предложена математическая модель для исследования электромагнитных процессов в нагревательном элементе трансформаторного типа. Реализована компьютерная модель в системе MATLAB. Приведены результаты гармонического анализа и определены коэффициенты несинусоидальности кривой напряжения при включении исследуемого устройства в сеть ограниченной мощности.

Ключевые слова:

Нагревательный элемент трансформаторного типа, компьютерная модель, переходные процессы, гармонический анализ, коэффициент искажения, высшие гармоники.

Key words:

Transformer type heating element, computer model, transient processes, harmonic analysis, distortion coefficient, higher harmonics.

Использование нагревательных элементов трансформаторного типа (НЭТ) позволяет качественно улучшить условия подготовки горячей воды в децентрализованных системах теплоснабжения, увеличить их долговечность и повысить надёжность. НЭТ представляют собой понижающий трансформатор, первичная обмотка которого подключается к сети, а вторичная — имеет один замкнутый коротко виток и является тепловыделяющим элементом [1]. Одной из конструкций нагревательного элемента является трёхфазный трансформатор с индуктором на основе плоской стержневой магнитной системы. Вторичная обмотка может выполняться в виде полых колец, по которым пропускается нагреваемая жидкость [2]. Кольца concentрически охватывают стержень с первичной обмоткой.

Источники теплоснабжения на основе НЭТ являются энергоёмкими нагрузками с нелинейными вольт-амперными характеристиками, которые потребляют из сети несинусоидальный ток, особенно в переходных режимах работы, например при включении. Токи высших гармоник, проходя по элементам сети, вызывают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов, которые, накладываясь на основную синусоиду, приводят к искажению формы напряжения. При ограниченных мощностях питающей сети нелинейность тока нагрузки может привести к сильному искажению формы напряжения. Нелинейный характер нагрузки сильно проявляется и при повышенном напряжении, например во время минимума нагрузки (ночное время суток) в результате сильного насыщения магнитопровода НЭТ.

Наличие высших гармонических составляющих неблагоприятно сказывается на работе силового электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Возникающие при этом экономические ущербы обусловлены, главным образом, ухудшением энергетических показателей, снижением надёжности функционирования электросетей и сокращением срока службы электрооборудования. Так же высшие гармоники напряжения

влияют на изоляцию трансформатора и электрических кабелей [3]. Искажение формы напряжения заметно сказывается на возникновении и протекании ионизационных процессов в изоляции. При наличии газовых включений в изоляции возникает ионизация, сущность которой заключается в образовании объёмных зарядов с последующей нейтрализацией их. Нейтрализация зарядов связана с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействие на окружающий диэлектрик. В результате этого развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к снижению её электрической прочности, возрастанию диэлектрических потерь и, в конечном счёте, к сокращению срока службы.

Предварительные исследования показали, что наиболее целесообразно при использовании НЭТ с нелинейными характеристиками применять двухпозиционное регулирование мощности путём периодического включения и отключения трансформатора. В этом случае переходные процессы характеризуются большими бросками тока, зависящими от момента подачи напряжения на первичную обмотку.

Целью работы является создание компьютерной модели для исследования электромагнитных процессов в НЭТ, получение с помощью этой модели гармонического состава напряжения при включении такого устройства в сеть.

Для решения поставленной задачи в работе предложена и реализована математическая модель для расчёта переходных процессов в трёхфазном трансформаторе с короткозамкнутой вторичной обмоткой.

Уравнения напряжений для обмоток трансформатора принимают вид:

$$U_A = \frac{d\psi_A}{dt} + r_1 i_A, \quad U_B = \frac{d\psi_B}{dt} + r_1 i_B, \quad U_C = \frac{d\psi_C}{dt} + r_1 i_C,$$

$$U_a = \frac{d\psi_a}{dt} + r_2 i_a, \quad U_b = \frac{d\psi_b}{dt} + r_2 i_b, \quad U_c = \frac{d\psi_c}{dt} + r_2 i_c, \quad (1)$$

где $U_A, U_B, U_C, U_a, U_b, U_c$ – фазные напряжения питающей сети и вторичного контура; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ – потокосцепления первичной и вторичной обмоток; t – время; r_1, r_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ – фазные токи первичной и вторичной обмоток.

Так как вторичная обмотка конструктивно короткозамкнутая, то

$$U_a = U_b = U_c = 0.$$

Потокасцепления можно выразить через соответствующие потоки

$$\begin{aligned} \psi_A &= \Phi_A W_1, \quad \psi_B = \Phi_B W_1, \quad \psi_C = \Phi_C W_1, \\ \psi_a &= \Phi_{1m} W_2, \quad \psi_b = \Phi_{2m} W_2, \quad \psi_c = \Phi_{3m} W_2, \end{aligned}$$

где Φ_A, Φ_B, Φ_C – магнитные потоки соответствующих стержней магнитопровода; $\Phi_{1m}, \Phi_{2m}, \Phi_{3m}$ – потоки взаимной магнитной связи; W_1, W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

Потоки взаимной магнитной связи:

$$\Phi_{1m} = \Phi_A - \Phi_{1\sigma}, \quad \Phi_{2m} = \Phi_B - \Phi_{2\sigma}, \quad \Phi_{3m} = \Phi_C - \Phi_{3\sigma},$$

где $\Phi_{1\sigma}, \Phi_{2\sigma}, \Phi_{3\sigma}$ – магнитные потоки рассеяния.

При моделировании переходных процессов в трёхфазных стержневых трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются по воздуху, поэтому индуктивность для токов нулевой последовательности значительно меньше индуктивности для токов прямой последовательности. В этом случае к уравнениям (1) необходимо добавить уравнения для магнитной цепи трансформатора, удовлетворяющие схеме замещения (рис. 1).

Уравнения для магнитной цепи имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} F_A &= R_{\mu 1} \Phi_A + R_{\sigma} (\Phi_A - \Phi_{1m}), \\ F_a &= -R_{\sigma} (\Phi_A - \Phi_{1m}) + R_0 \Phi_0, \\ F_B &= R_{\mu 2} \Phi_B + R_{\sigma} (\Phi_B - \Phi_{2m}), \\ F_b &= -R_{\sigma} (\Phi_B - \Phi_{2m}) + R_0 \Phi_0, \\ F_C &= R_{\mu 3} \Phi_C + R_{\sigma} (\Phi_C - \Phi_{3m}), \\ F_c &= -R_{\sigma} (\Phi_C - \Phi_{3m}) + R_0 \Phi_0, \\ \Phi_0 &= \Phi_{1m} + \Phi_{2m} + \Phi_{3m}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_A, F_B, F_C, F_a, F_b, F_c$ – намагничивающие силы соответствующих фаз первичной и вторичной обмоток; $R_{\mu 1}, R_{\mu 2}, R_{\mu 3}$ – магнитные сопротивления стержней фаз A, B, C , соответственно; Φ_0 – поток нулевой последовательности; R_{σ}, R_0 – магнитные сопротивления рассеяния и потоков нулевой последовательности, соответственно.

Токи, протекающие по обмоткам, выражаются через соответствующие магнитодвижущие силы

$$\begin{aligned} i_A &= \frac{F_A}{W_1}, \quad i_B = \frac{F_B}{W_1}, \quad i_C = \frac{F_C}{W_1}, \\ i_a &= \frac{F_a}{W_2}, \quad i_b = \frac{F_b}{W_2}, \quad i_c = \frac{F_c}{W_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

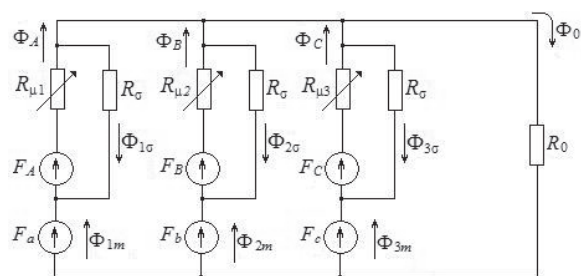


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи трансформатора

Магнитные сопротивления R_{σ} и R_0 определяются воздушными промежутками и считаются постоянными, не зависящими от величины потока

$$R_{\sigma} = \frac{l_{\sigma}}{\mu_0 \alpha_p \pi D_{cp}}, \quad R_0 = \frac{l_0}{\mu_0 S_{бок}},$$

где l_{σ} – высота окна магнитопровода; μ_0 – магнитная проницаемость среды; D_{cp} – средний диаметр обмоток; α_p – ширина приведённого канала рассеяния; l_0 – длина канала для потока нулевой последовательности; $S_{бок}$ – площадь боковой поверхности яра.

Магнитные сопротивления фаз $R_{\mu 1}, R_{\mu 2}$ и $R_{\mu 3}$ соответствуют сумме магнитных сопротивлений стержня, двух примыкающих воздушных зазоров и участков ярм. Для их определения рассчитано магнитное сопротивление R_{μ} от потока стержня Φ_c и построена зависимость $R_{\mu} = f(\Phi_c)$, которая при расчётах на ЭВМ учитывается в виде аппроксимирующей функции.

Исследования переходных процессов целесообразно проводить, используя метод визуального программирования. Наилучшим образом для этого подходит пакет моделирования динамических систем Simulink, который входит в состав программы MATLAB [4]. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Однако стандартные блоки трёхфазных трансформаторов из библиотеки SimPowerSystems построены на основе трёх однофазных, что приводит к невозможности учёта особенностей электромагнитных процессов протекающих в трёхстержневой магнитной цепи и короткозамкнутой вторичной обмотке.

В соответствии с описанной математической моделью составлена Simulink-модель (рис. 2) на основе блока Differential Equation Editor (DEE, редактор дифференциальных уравнений). В этот блок для решения занесена система дифференциальных уравнений (1) в явной форме Коши. На вход поданы сигналы от источника синусоидального напряжения, величины активных сопротивлений первичной и вторичной обмоток (блоки R_1 и R_2) и токи первичной и вторичной обмоток от блоков $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$, в которых производятся вычисления по формулам (3) и (2). На выходе блока DEE сформированы сигналы соответствующие потокам $\Phi_A, \Phi_B, \Phi_C, \Phi_{1m}, \Phi_{2m}, \Phi_{3m}$. Нели-

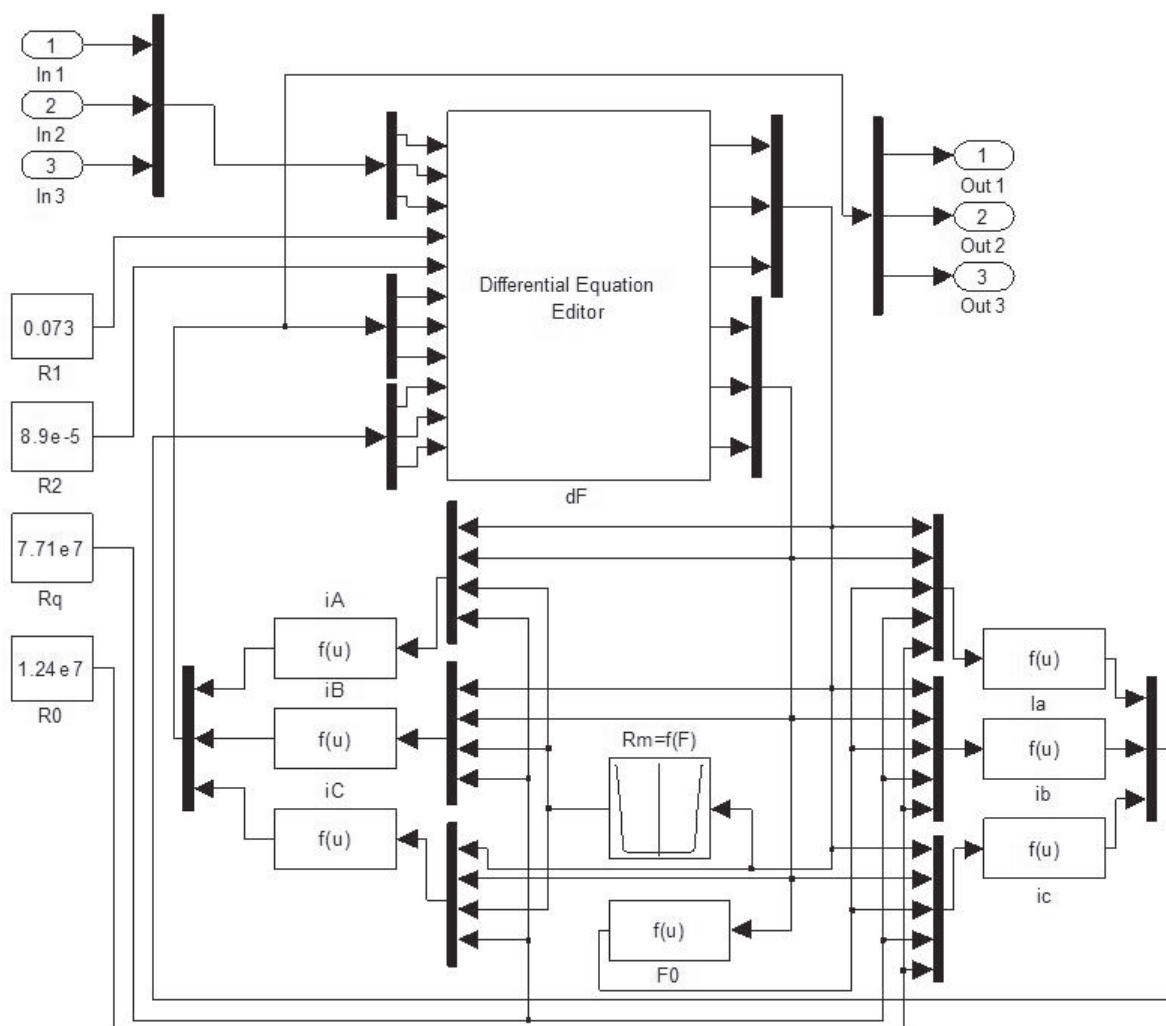


Рис. 2. Компьютерная Simulink-модель (подсистема) трансформатора

нейность магнитной цепи (магнитных сопротивлений стержней) учитывается с помощью блока одномерной таблицы $R_m=f(F)$ (рис. 2). С помощью этого блока значение магнитного сопротивления стержня i -й фазы R_{mi} определяется величиной потока соответствующего стержня.

Для связи Simulink-модели с другими силовыми блоками из библиотеки SimPowerSystems разработана подсистема НЭТ в виде электротехнического блока пользователя. На этот блок можно подавать сигналы, эквивалентные напряжению на зажимах фаз трансформатора и снимать сигналы, эквивалентные фазным токам первичной обмотки.

Для исследования влияния нелинейной нагрузки, которой является нагревательный элемент трансформаторного типа, на электрическую сеть общего назначения создана компьютерная модель (рис. 3). Модель состоит из электротехнического блока пользователя НЭТ, трёхфазного источника напряжения, силового трансформатора и выключателя переменного тока (коммутатора). Для снятия показаний в виде осциллограмм к выходным портам блока НЭТ подключены по схеме «звезда» измерители фазных токов первичной обмотки исследуемого трансформатора,

сигналы с которых направлены на осциллограф I . Для измерения, подаваемого на обмотки НЭТ, линейного напряжения используются измерители напряжения. Мультиметр считывает для дальнейшей визуализации три сигнала, соответствующие фазным напряжениям вторичной обмотки силового трансформатора. Сигналы, соответствующие фазным и линейным напряжениям, подаваемым на НЭТ, отображаются на осциллографе U . Блок T позволяет задавать нужное время включения НЭТ.

При моделировании в качестве силового использовался масляный трансформатор типа ТМ 100 6/0,4 Y/Y_n-0 мощностью 100 кВА. В качестве исследуемого нагревательного элемента использовались блоки НЭТ с параметрами, соответствующими мощностям от 10 до 100 кВт.

Используя разработанную модель, проведены различные исследования трёхфазных НЭТ. В частности, было исследовано влияние начальной фазы φ_0 питающего напряжения, которая в реальных условиях работы является величиной случайной, на броски тока в первичной обмотке устройства. Данные исследуемого НЭТ мощностью 40 кВт приведены в табл. 1.

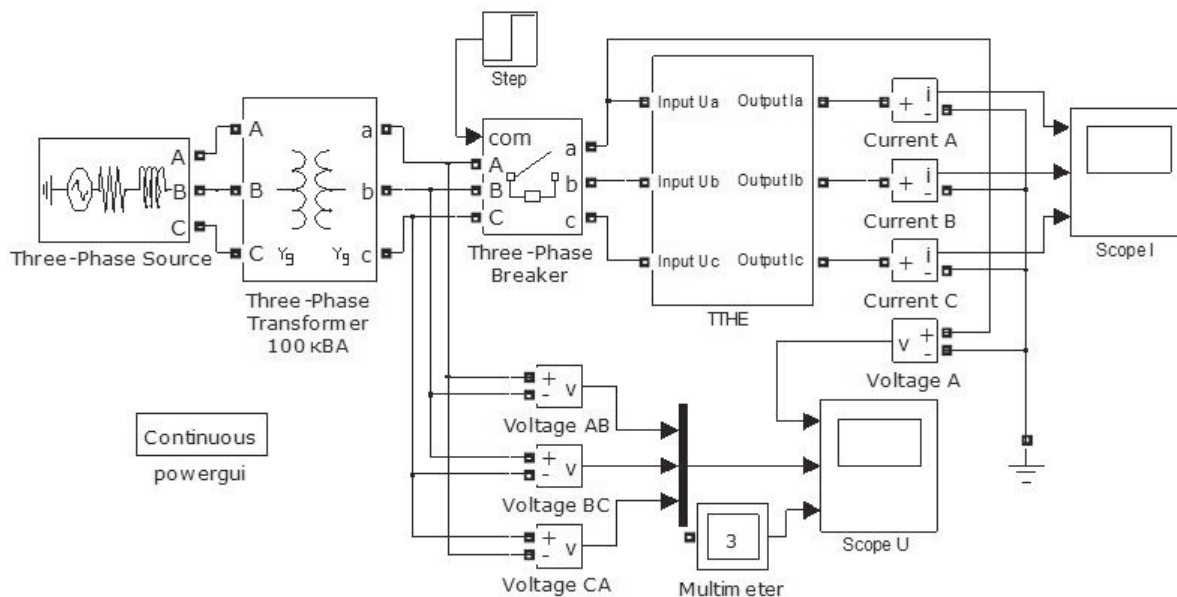


Рис. 3. Компьютерная модель для исследования влияния НЭТ на электрическую сеть

Таблица 1. Исходные данные моделируемого трансформатора

Величина, единица измерения	Значение
Мощность P , кВт	40
Линейное (фазное) напряжение питающей сети U , В	380 (220)
Число витков в первичной обмотке W_1	200
Активное сопротивление фазы первичной обмотки r_1 , Ом	0,073
Активное сопротивление фазы вторичной обмотки r_2 , Ом	$8,9 \cdot 10^{-5}$
Магнитное сопротивление рассеяния R_s , А/Вб	$7,71 \cdot 10^7$
Магнитное сопротивление потоков нулевой последовательности R_0 , А/Вб	$1,24 \cdot 10^7$

На рис. 4 видно, что нелинейность кривой намагничивания исследуемого НЭТ приводит к искажению потребляемого из сети тока, особенно в первый момент времени после включения. Форма тока в большей степени зависит от момента включения. В первый интервал времени после подачи напряжения на первичную обмотку вид токов значительно отличается от синусоидального. В дальнейшем, по мере завершения переходного процесса, форма токов улучшается. Наихудшим вариантом включения является момент времени при $\varphi_0=0$. В фазе A наблюдаются большие броски тока, превышающие номинальный в 2 раза. При этом наблюдается искажение формы фазного напряжения (рис. 4, *a*). Наиболее благоприятным является включение трёхфазного НЭТ в сеть при $\varphi_0=\pi/2$ и при $\varphi_0=\pi/6$. В последнем случае бросок тока фазы A превышает номинальный на 25 % (рис. 4, *б*).

В работе проведены исследования влияния нелинейной нагрузки, которой является НЭТ, на показатели качества электроэнергии сети ограниченной мощности и соответствие этих показателей нормам качества [5]. Одним из показателей, зависящим от нелинейного характера нагрузки, является

несинусоидальность напряжения. Эта норма характеризуется коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициентом v -й гармонической составляющей напряжения. Анализ гармонического состава кривых токов и напряжений проведён с помощью встроенного в пакет MatLab инструмента Powergui FFT Analysis Tool (быстрое преобразование Фурье).

В работе выполнено моделирование включения НЭТ мощностью 40 кВт для углов начальной фазы φ_0 в диапазоне от 0 до $\pi/6$, так как в этом интервале изменения φ_0 наблюдается наибольшее искажение формы тока фазы A . Коэффициенты искажения формы потребляемого тока k_I показаны на рис. 5, *a*. Несинусоидальные токи приводят к появлению высших гармоник и искажению формы напряжений (как фазных, так и в меньшей степени линейных) на шинах вторичной обмотки силового трансформатора. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжений показаны на рис. 5, *б*. Из графика видно, что при любом значении φ_0 коэффициенты искажений для фазных (k_{Ua} , k_{Ub} и k_{Uc}) и линейных (k_{Uab} , k_{Ubc} и k_{Uca}) напряжений входят в допустимый нормативным документом [5] предел (предельно допустимое значение для $k_I=12\%$). Так же получены коэффициенты v -й гармонической составляющей напряжения фазы A для $v=2, 3, 4-10$, табл. 2. Другие гармоники не учитывались ввиду их малого влияния на форму напряжений при рассматриваемых углах φ_0 . Из табл. 2 видно, что в исследованном спектре гармонических составляющих напряжения фазы A только коэффициент 4-й гармоники при $\varphi_0=0$ и $\varphi_0=\pi/18$ незначительно превышает предельно допустимые значения. Причём с увеличением угла φ_0 эти гармонические составляющие приходят в норму. Остальные гармоники из выделенного спектра находятся в допустимых пределах.

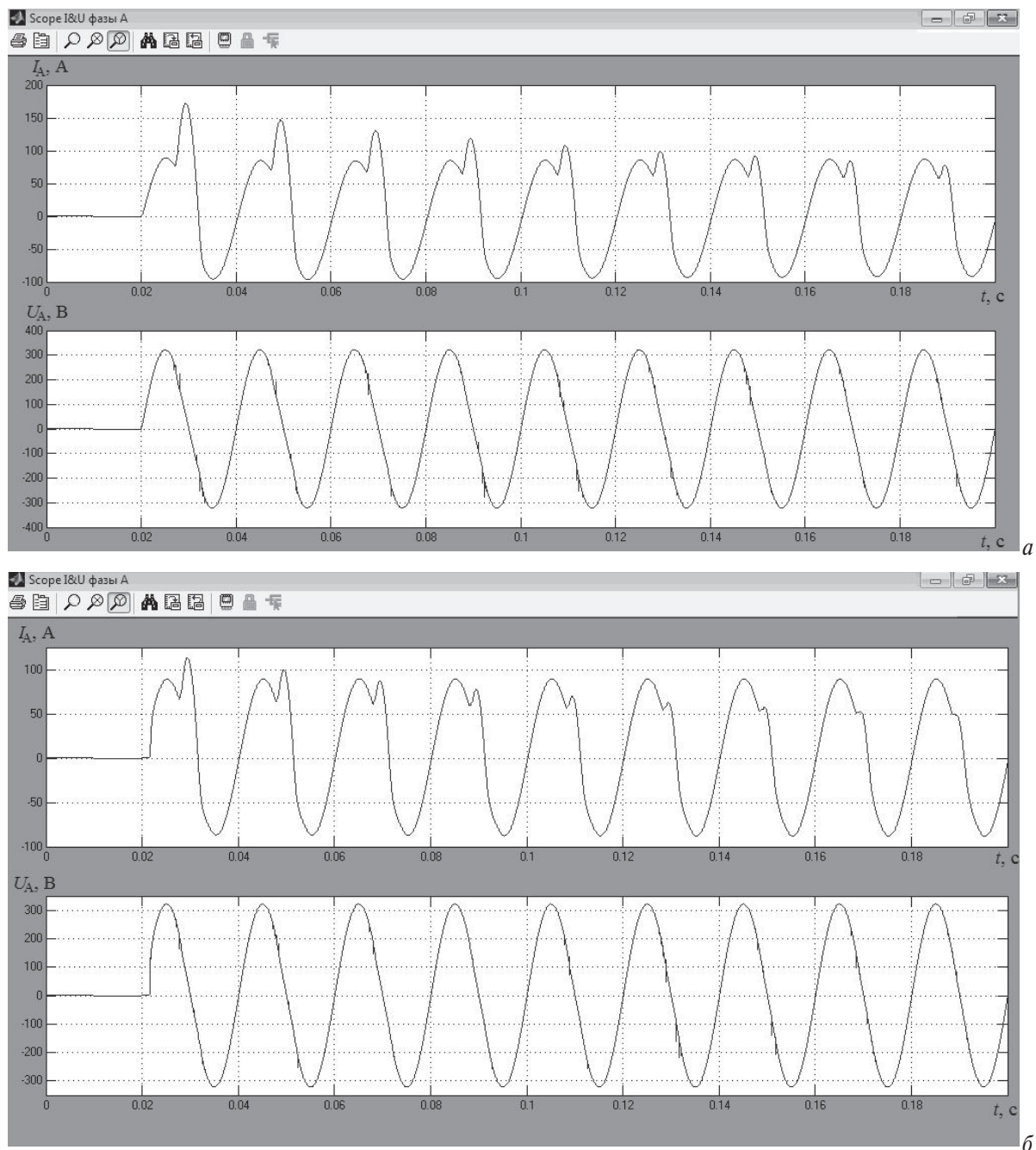


Рис. 4. Результаты моделирования процесса включения НЭТ 40 кВт на сеть ограниченной мощности 100 кВА. Момент включения: а) $\varphi_0=0$; б) $\varphi_0=\pi/6$

Таблица 2. Результаты гармонического анализа

Номер гармоники, ν	Коэффициент ν -й гармонической составляющей напряжения фазы А, %				Предельно допустимое значение [5], %
	$\varphi_0=0$	$\varphi_0=\pi/18$	$\varphi_0=\pi/9$	$\varphi_0=\pi/6$	
2	1,90	1,73	1,42	0,98	3,00
3	2,69	1,87	1,58	1,18	3,75
4	1,55	1,51	1,39	1,19	1,50
5	0,70	0,85	0,94	0,99	9,00
6	0,44	0,18	0,39	0,61	0,75
7	0,70	0,28	0,08	0,24	7,50
8	0,68	0,46	0,33	0,04	0,75
9	0,15	0,39	0,38	0,19	1,13
10	0,17	0,19	0,29	0,26	0,75

Так же в работе исследовано влияние высших гармонических составляющих на кривые фазных и линейных напряжений для НЭТ различных мощностей. На рис. 6 приведены графики зависимостей коэффициентов несинусоидальности напряжения фазы А от мощности НЭТ для наиболее значимых (с точки зрения превышения предельно допустимых норм) 2-й, 3-й, 4-й и 8-й гармонических составляющих. На графиках показаны зависимости при включении НЭТ к электрическим сетям разных мощностей в момент $\varphi_0=0$. Анализ результатов показывает, что общий коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения

не превышает предельно допустимого значения. Следует отметить, что наблюдается некоторое превышение предельно допустимых значений по ряду гармонических составляющих из рассматриваемого спектра (предельно допустимые значения на рис. 6 показаны пунктирными линиями). Эти превышения наблюдаются довольно короткое время в момент подключения. После завершения переходного процесса рассматриваемы высшие гармонические приходят в норму.

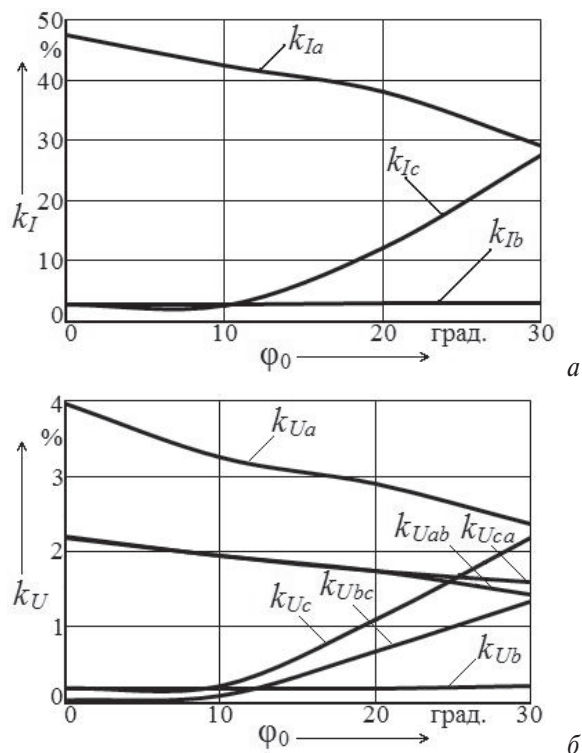


Рис. 5. Зависимости коэффициентов искажения формы тока в нагрузке (а) и напряжения (б) от угла начальной фазы

По результатам исследований можно сделать вывод, что для минимизации негативного влияния на питающую электрическую сеть и на других потребителей следует по возможности ограничивать мощность НЭТ в пределах 40 % от мощности сети. Для более мощных устройств целесообразны меры по снижению влияния нелинейной нагрузки, такие как изменение момента включения. Это особенно актуально при использовании двухпозиционного регулирования мощности НЭТ, так как усиливается влияние коммутационных процессов. Реализация этой рекомендации возможна с использованием трёхфазных бесконтактных переключателей устройств (полупроводникового коммутатора), включённых в цепь первичной обмотки НЭТ. В каждой фазе такого коммутатора используются симметричные тиристоры (симисторы), пара тиристоров, включённых встречно-параллельно.

Система управления тиристорами формирует управляющие импульсы и подаёт их в необходимый момент времени на управляющие электроды вентилей.

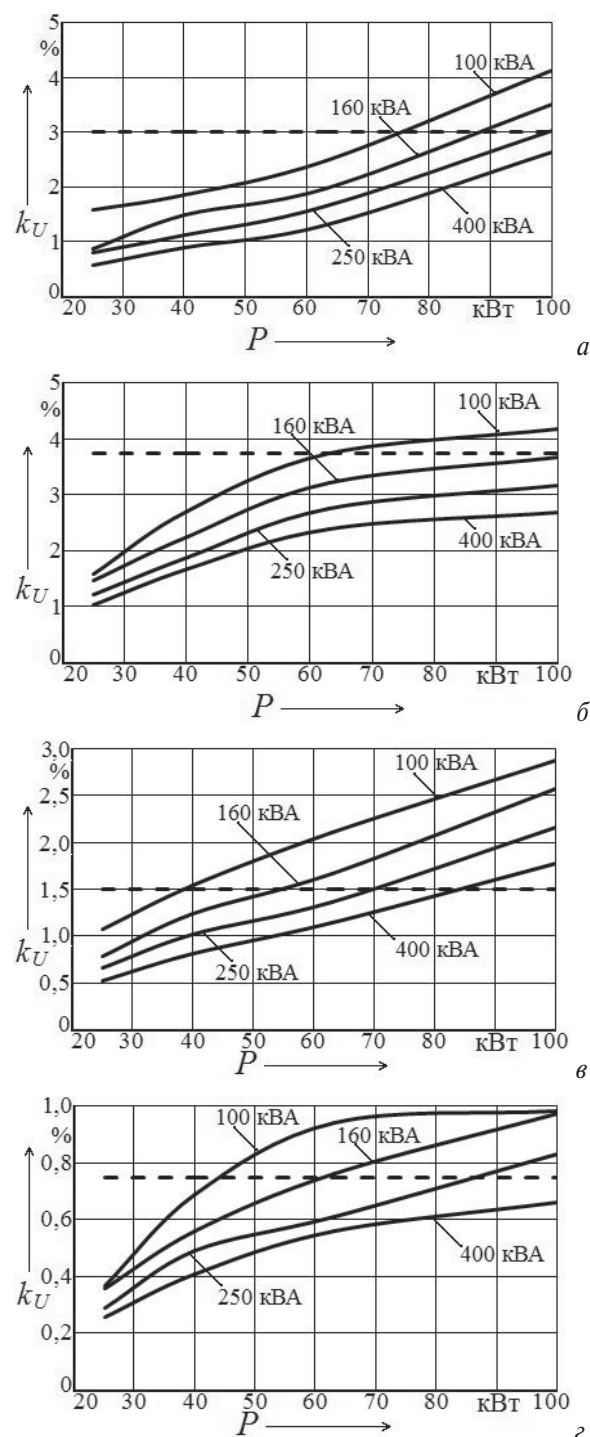


Рис. 6. Зависимости коэффициентов несинусоидальности кривой напряжения k_{Uv} v -й гармонической составляющей от мощности P НЭТ для: а) $v=2$; б) $v=3$; в) $v=4$; г) $v=8$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 144 с.
2. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Рекомендации для расчёта трансформатора с короткозамкнутой кольцевой вторичной обмоткой // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 79–84.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с., ил.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
5. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.99 г. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 32 с.; Переиздание. Август 2006 г. – М.: Стандартинформ, 2006. – 32 с.

Поступила 20.01.2012 г.

УДК 621.3:536.7:678

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛИ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

М.В. Халин, Е.И. Востриков

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

E-mail: temf@yandex.ru

Выполнен анализ существующих кабельных антиобледенительных систем, выявлены их достоинства и недостатки. Поставлены задачи исследований для широкого применения пластинчатых и объемных многоэлектродных композиционных электрообогревателей на основе бутилкаучука в антиобледенительных системах. Проведен комплекс электрофизических испытаний, который определил условия технологического регламента изготовления электрообогревателей с эффектами самостабилизации и саморегулирования. Доказана возможность длительной эксплуатации электрообогревателей во влажной и агрессивной среде и целесообразность их использования в антиобледенительных системах.

Ключевые слова:

Антиобледенительная система, многоэлектродный композиционный электрообогреватель, самостабилизация, саморегулирование, влажная и агрессивная среды.

Key words:

Anti-ice system, multi-electrode composite electric heater, self-stabilization, self-regulation, damp and aggressive environments.

Введение

Антиобледенительные системы зданий и сооружений, появившиеся сравнительно недавно, доказали свою эффективность и во всем мире используются в строительном производстве. Использование таких систем позволяет исключить образование наледи в водосточных трубах, желобах, воронках и других местах ее наиболее вероятного появления. Образование наледи приводит к уменьшению (вплоть до полного прекращения) оттока воды через водосточные желоба и трубы, что представляет серьезную опасность для жизни и здоровья людей и может привести к значительному материальному ущербу.

Основным элементом антиобледенительной системы являются нагревательные секции, назначение которых преобразовывать протекающий по ним ток в тепловую энергию. Поэтому мощность на единицу длины (удельное тепловыделение), а также площадь нагревательного элемента – их важнейшие электро-, теплофизические параметры.

Современные антиобледенительные системы базируются на четырех типах кабелей: резистивных, бронированных, зональных и саморегулируе-

мых, которые на российском рынке представлены следующими фирмами производителями «СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ» или ССТ (Россия), THERMO, KIMA Heating Cable (Швеция), CEILHIT (Испания), ENSTO, TASH (Финляндия), NEXANS Norway, AS ALCATEL (Норвегия/ Франция), DEVI (Дания) [1].

Анализ кабельных систем обогрева (табл. 1), выявил следующие недостатки:

- одинаковая теплоотдача кабеля по всей длине, что приводит к тому, что на одних участках кабель перегревается, а на других выделяемого им тепла может быть недостаточно для обеспечения удовлетворительного функционирования системы;
- малая площадь теплоотдачи кабеля, что требует использования значительной мощности для успешной работы системы;
- потеря работоспособности кабеля на всей длине секции при выходе из строя нагревательной жилы или повреждении изоляции.

Наиболее эффективными являются саморегулируемые кабели, которые в отличие от резистивных автоматически меняют мощность по длине секции в зависимости от фактических потерь те-