

## II. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.03.14

М. Ю. Залужный

### Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в системе электроснабжения энергоемких электротехнологических комплексов

*Предложена математическая модель и методика компьютерного моделирования нестационарных электромагнитных процессов в системе электроснабжения энергоемкого электротехнологического комплекса с нелинейной нагрузкой и приведены результаты исследований.*

#### Общая характеристика исследуемого вопроса

Энергосберегающие электротехнологии и вопросы научно обоснованного оптимального использования электрической энергии являются одним из приоритетных направлений технической политики стран мирового экономического содружества. На современном этапе развития отечественных электротехнических комплексов происходит переход от электротехнологий, ориентированных на дешевые энергоносители, к более эффективным и экономичным. Первостепенным требованием является снижение энергетических потерь при оптимальной энергоемкости и энергоэффективности электротехнического и электротехнологического оборудования [1–6]. Даже незначительное снижение потерь электроэнергии приведет к существенным увеличением экономических показателей. Об этом свидетельствует следующее:

- в мировой практике до четверти вырабатываемой электроэнергии используется на потребности электротехнологий;
- до 30 % этой энергии потребляется энергоемкими электротехническими комплексами в составе дуговых сталеплавильных печей и около 40,0 % этой энергии используется на разогрев и расплавление металла, а остальная преобразуется в непроизводительные потери;
- потери в электропечных и силовых трансформаторах, шинпроводах и системах достигают 12,0 %;
- непроизводительные потери электрической энергии в 2,1–2,5, а на единицу вырабатываемой продукции в 2,0–3,0 раза превышают аналогичные показатели ведущих инофирм;
- аварийность в системах электроснабжения электротехнического комплекса в составе дуговой сталеплавильной печи достигает 90 % по сравнению с системами общего назначения;
- срок службы энергоемкого электротехнического оборудования меньше в 2,5–3,1 раза.

Специфика электротехнологических режимов работы электротехнического комплекса является причиной проявления нестационарных электромагнитных явлений в электротехническом оборудовании и системах электроснабжения. Последние приводят к цело-

© М. Ю. Залужный 2009 р.

му ряду явлений, которые не учитывались на стадиях предпроектной проработки и изготовления. В результате в условиях эксплуатации электротехническое оборудование работает в режимах, превышающих требования нормативно-технической документации и государственных стандартов.

Существующие методы позволяют учитывать влияние отдельных факторов или явлений. Они основаны либо на осредненных или завышенных данных, либо на полуэмпирических коэффициентах. Расчеты электромагнитных параметров решаемой задачи выполняются разными методами в зависимости от необходимой степени точности. Наиболее приемлемые результаты могут быть получены при одновременном учете несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений. Однако такие расчеты сложны, особенно для несимметричных цепей [4–6]. Таким образом, в настоящее время актуальной является задача разработки методов исследования нестационарных электромагнитных процессов в электротехническом оборудовании и системах электроснабжения, чему посвящена данная статья.

**Математическая модель** для исследования нестационарных электромагнитных процессов, возбуждаемых несинусоидальными токами, приведена на рис. 1.

Напряжение на низковольтной стороне электропечного трансформатора с учетом электромагнитных процессов короткой сети представим в следующем виде:

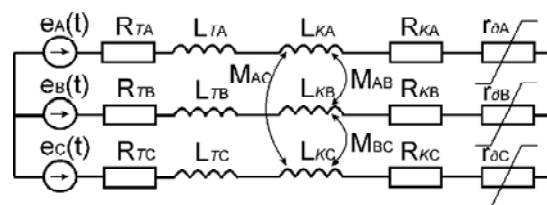


Рис. 1. Эквивалентная схема электроснабжения электротехнического комплекса в составе дуговой сталеплавильной печи:  $e$  – э. д. с. во вторичной обмотке электропечного трансформатора;  $R$  – активное сопротивление;  $L$  – индуктивность;  $r_0 = 1/g(t, T, i, Ud)$  – нелинейная нагрузка;  $M$  – взаимная индуктивность ветвей; индексы А, В, С – соответствующие фазы; Т и К – трансформатор и короткая сеть

$$\left. \begin{aligned} i_A + i_B + i_C &= 0, \\ e_A &= R_{TA}i_A + L_{TA}\frac{di_A}{dt} + M_{AB}\frac{di_B}{dt} + M_{AC}\frac{di_C}{dt} + \\ &+ R_{KA}i_A + L_{KA}\frac{di_A}{dt} + U_{\partial A}(r_{\partial A}) + u_0, \\ e_B &= R_{TB}i_B + L_{TB}\frac{di_B}{dt} + M_{AB}\frac{di_A}{dt} + \\ &+ M_{BC}\frac{di_C}{dt} + R_{KB}i_B + L_{KB}\frac{di_B}{dt} + U_{\partial B}(r_{\partial B}) + u_0 \\ e_C &= R_{TC}i_C + L_{TC}\frac{di_C}{dt} + M_{AC}\frac{di_A}{dt} + M_{BC}\frac{di_B}{dt} + \\ &+ R_{KC}i_C + L_{KC}\frac{di_C}{dt} + U_{\partial C}(r_{\partial C}) + u_0 \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $e_A = U_m \sin(\omega t)$ ,  $e_B = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$ ,  $e_C = U_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$  – фазные э. д. с.;  $u_0$  – напряжение между нулевыми точками нагрузки и электротепного трансформатора;

$U_{\partial} = \frac{i}{g_{\partial}}$  – мгновенное значение напряжения на нелинейной нагрузке;  $g$  – проводимость дуговой промежутка;  $i$  – мгновенное значение тока.

Для моделирования нестационарных электромагнитных процессов в качестве нелинейной нагрузки используем уравнение Кассии, которое запишем в канонической форме [7]

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left( \frac{i^2}{U_d^2 g} - g \right), \quad (2)$$

где  $U_d$  – действующее напряжение;  $\theta$  – постоянная дуги.

Определим мгновенное напряжение смещения нулевой точки путем сложения левых и правых частей системы уравнений (1):

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{1}{3} [e_A + e_B + e_C - R_{TA}i_A - R_{TB}i_B - \\ &- R_{TC}i_C - \frac{di_A}{dt}(L_{TA} + L_{KA}) - \frac{di_B}{dt}(L_{TB} + L_{KB}) - \\ &- \frac{di_C}{dt}(L_{TC} + L_{KC}) - M_{AB} \left( \frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} \right) - \\ &- M_{AC} \left( \frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) - M_{BC} \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) - \\ &- U_{\partial A}(r_{\partial A}) - U_{\partial B}(r_{\partial B}) - U_{\partial C}(r_{\partial C})]. \end{aligned} \quad (3)$$

Для исследования потерь активную и полную мощность потерь в одной фазе удобно представить в следующем виде:

$$P = (R_T + R_K + r_{\partial}) \sum_{v=1}^N I_v^2, \quad (4)$$

$$S = U_d I_d, \quad (5)$$

где  $v$  – порядковый номер гармоники;  $U_d, I_d$  – действующие значения напряжения и тока, соответственно.

Кэффициенты несинусоидальности и несимметрии будем рассчитывать по следующим выражениям:

$$k_f = \left( \sqrt{\sum_{v=2}^N I_v^2} \right) \cdot \left( \sqrt{\sum_{v=1}^N I_v^2} \right)^{-1} \cdot 100\%, \quad (6)$$

$$k_n = (I_N / I_P) \cdot 100\%, \quad (7)$$

где  $I_N$  и  $I_P$  – ток обратной и прямой последовательности.

Этот метод расчета может быть применен при разных формах кривой напряжения, несинусоидальности тока и при несимметрии нагрузки. Особенно он эффективен при определении влияния токов высших гармоник на добавочные потери.

Предварительные исследования нестационарных электромагнитных процессов в электротехническом комплексе показали, что удовлетворительная точность для практики достигается при учете одиннадцати гармоник.

**Имитационное моделирование** с использованием современной вычислительной техники и программного обеспечения, позволяет более эффективно исследовать влияние несинусоидальности на нестационарные электромагнитные процессы и рассматривать большее количество возможных вариантов нагрузки. Структурная схема имитационной модели показана на рис. 2. Особенностью этой модели является возможность одновременного исследования нестационарных электромагнитных процессов практически в любом месте электротехнического комплекса, что не всегда возможно в условиях эксплуатации оборудования.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: ПЭК – параметры электрического контура, включающие в себя активные и реактивные сопротивления, частоту сети, амплитудное значение напряжения; НУ – начальные условия; РТКД – расчет температурного коэффициента дуги; АВГС – алгоритмы вычисления гармонического состава; ГЧОИ – графическое и числовое отображение информации.

Параметры имитационной модели отражают реальный электротехнологический комплекс в составе дуговой сталеплавильной печи, что позволяет использовать ее для анализа нестационарных электромагнитных процессов в электротехнических комплексах.

Исследования будем проводить в четырех режимах: 1 – включение (во всех фазах ток синусоидален);

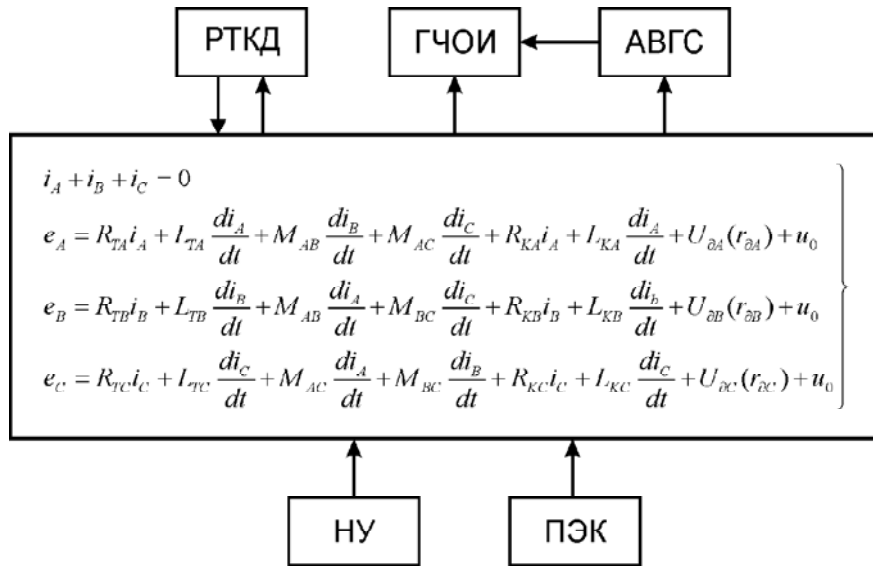


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели

2 – формирование несинусоидальности в фазе А ( $kf = 25\%$ ); 3 – формирование несинусоидальности в фазах А ( $kf \approx 25\%$ ) и В ( $kf \approx 25\%$ ); 4 – несинусоидальность в трех фазах ( $kf = 25\%$ ).

**Результаты моделирования и их анализ**

Временные зависимости потерь и коэффициента несимметрии в электротехническом комплексе приведены на рис. 3 и рис. 4.

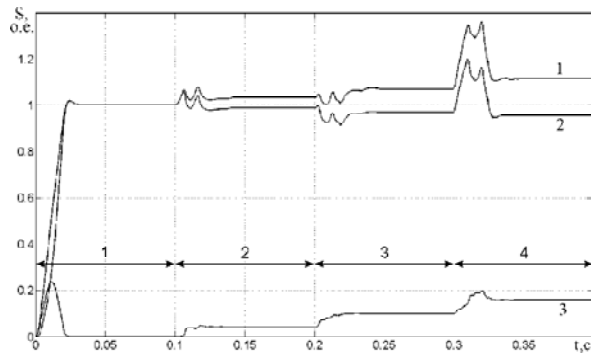


Рис. 3. Усредненные по трем фазам потери при различных режимах

На рис. 3 приняты следующие обозначения: 1 – потери в результате моделирования с учетом всех гармоник; 2 – потери, вызванные только первой гармоникой; 3 – потери, вызванные высшими гармониками.

Увеличение потерь в малых интервалах времени на рис. 3 обусловлено переходными процессами, вызванными переходом на следующий режим моделирования, что приводило к изменению гармонического состава тока во всех фазах. Высшие гармоники в одной фазе (при несинусоидальности 25 %) приводят к уве-

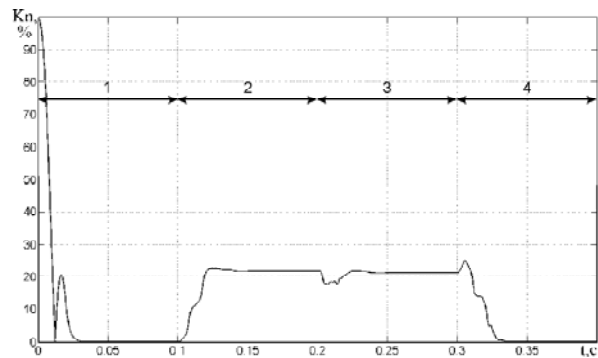


Рис. 4. Зависимость коэффициента несимметрии тока от режима

личению потерь – на 6 %, в двух фазах – на 12 % и во всех фазах – на 18 %. В свою очередь, вклад первой гармоники уменьшается на 2 %, 4 % и 6 % в соответствующих режимах.

На рис. 4 показана зависимость коэффициента несинусоидальности от режима моделирования, из которой видно, что появление несинусоидальности в системе электроснабжения приводит к несимметрии токов.

**Выводы**

1. Предложенная математическая модель исследования нестационарных электромагнитных процессов в системе электроснабжения энергоемкого электротехнологического комплекса позволяет получить зависимость изменения потерь от характера нагрузки.

2. Общие потери увеличиваются на 12 % при несинусоидальности тока 25 %. При этом потери от первой гармоники уменьшаются на 6 %, а высшие гармонические составляющие увеличивают их на 18 %.

3. При схеме соединения вторичных обмоток электропечного трансформатора в «звезду» несинусоидальность в одной из фаз приводит к несимметрии

токов и несинусоидальности в других.

### Перечень ссылок

1. Вагин Г. Я. Основные направления экономии энергии на металлургических предприятиях / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, С. А. Шалаев – М. : Промышленная энергетика. – 1995. – № 9. – С. 12–15.
2. Энергетика України / Міністерство енергетики України. – К. : Міненерго України, 1998. – 34 с.
3. Борисов Б. П. Электроснабжение электротехнологических установок / Б. П. Борисов, Г. Я. Вагин – К. : Наук. Думка, 1985. – 248 с.
4. Гудим В. І. Електромагнітна сумісність електропостачальних систем дугових сталеплавильних печей. / В. І. Гудим // Праці III Міжнародної науково-технічної конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенер-

гетиці». – Львів, 1994. – С. 63–67.

5. Зиновкин В. В. Анализ повреждаемости трансформаторов, питающих энергоёмкие резкопеременные потребители промпредприятий / В. В. Зиновкин, А. П. Васильковский, Д. В. Зозуля, А. П. Лютый // Труды научн-техн. конф. «Трансформаторостроение». – Запорожье: ВИТ, 1995. – С. 138–145.
6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
7. Рейгольд Р. Эксплуатационные режимы электро-энергетических систем и установок / Р. Рейгольд; пер. с нем.; под ред. К. С. Демирчяна. – Л. : Энергия, 1980. – 578 с.

Поступила в редакцию 23.03.09 г.

После доработки 13.04.09 г.

*Запропонована математична модель і методика комп'ютерного моделювання нестационарних електромагнітних процесів в системі електропостачання енергоємного електротехнологічного комплексу з нелінійним навантаженням і приведені результати досліджень.*

*A mathematical model and method of computer design of non-stationary electromagnetic processes in the power supply system of power-intensive electrical engineering complex with the nonlinear loading are offered and the results of researches are presented.*

УДК 621.355.1(088.8)

В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая

## Метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрической установки

*Предложен метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрических установок с применением системы промежуточных накопителей энергии, позволяющей повысить эффективность использования энергии фотопреобразователей в неблагоприятных условиях их работы.*

### Введение

Вследствие присущей фотоэлектрическим установкам (ФЭУ) нестабильности генерируемой энергии, вызванной совокупностью как внешних, так и внутренних факторов, возникает необходимость в резервировании энергии для энергоснабжения потребителей в периоды неблагоприятных условий работы, когда выработка электроэнергии ФЭУ снижается или полностью отсутствует.

Проблема резерва электроэнергии особенно остро проявляется при использовании работающих вне централизованной сети энергообеспечения автономных фотоэлектростанций малой и средней мощности. Традиционно в таких случаях в качестве резервного источника электроэнергии используются химические источники тока (ХИТ), входящие в состав ФЭУ. Однако в силу своих внутренних особенностей ХИТ не допускают снижения уровня накопленной в них энергии ниже критического значения, при этом восполнение

израсходованной энергии осуществляется за счет части энергии, вырабатываемой ФЭУ. Но в реальных условиях работы существует вероятность продолжительных периодов с низким уровнем освещенности, когда текущие значения напряжения и тока вырабатываемой ФЭУ энергии недостаточны для зарядки ХИТ, и тогда только энергоёмкость ХИТ определит продолжительность непрерывного энергоснабжения потребителей.

Наглядно режимы работы фотобатареи (ФБ) совместно с ХИТ можно проиллюстрировать с помощью типичной вольтамперной характеристики ФБ (см., например, [1]), приведенной в упрощенном виде на рис. 1. Устойчивое энергоснабжение потребителей, по мнению авторов цитируемой работы, обеспечивается ФБ при уровнях освещенности, соответствующих режиму работы ФБ в области 1, расположенной выше линии ОА – прямой максимальной мощности ФБ. При уровнях освещенности, соответствующих области 2, расположенной ниже прямой максимальной мощности, ФБ

© В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая 2009 г.