

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Исследование нестационарных электромагнитных процессов в электротехническом оборудовании и специализированных электротехнологических комплексах представляет довольно сложную научно-прикладную задачу. Это обусловлено необходимостью учета особенностей возбуждающих токов и напряжений, несимметрии и резкопеременного характера нагрузки, нелинейные взаимосвязи между отдельными параметрами и другое. Наиболее достоверные результаты могут быть получены при физическом моделировании. Исследования выполняются на масштабных моделях, в которых сохраняются конструктивные особенности проектируемого объекта и тем самым обеспечиваются взаимосвязи между внешними возбуждающими и внутренними электромагнитными параметрами [1]. Этот метод дорогостоящий, поскольку требует наличия специализированных источника питания, измерительной и коммутирующей аппаратуры, а также испытательных помещений и подготовленного персонала [1-3]. Особую актуальность принимают вопросы моделирования нестационарных электромагнитных процессов в электротехническом оборудовании и системах электроснабжения электротехнических комплексов с резкопеременным характером нагрузки, таких как дуговые сталеплавильные печи, приводы прокатных станов, вставок и линий постоянного тока и других. Очевидно, что в настоящее время актуальными усматриваются разработка менее дорогостоящих и более эффективных методов исследования электромагнитных процессов, результаты которых позволят обеспечить эффективное функционирование электротехнических комплексов.

Целью настоящей работы является разработка имитационной модели нестационарных электромагнитных процессов в системах электротехнического комплекса с различными схемами соединения обмоток электропечного трансформатора.

Модель отображает основные электромагнитные процессы, протекающие в электросталеплавильном комплексе, и содержит блоки, отображающие электропечной трансформатор, короткую сеть, нелинейный дуговой промежуток который позволяет формировать несинусоидальность и несимметрию нагрузки. В последнем используется модель электродугового процесса Касси [4].

Эквивалентные схемы математических моделей, которые использовались при имитационном моделировании электромагнитных процессов, при различных схемах соединения обмоток электропечного трансформатора, показаны на рис. 1.

На рис.1 приняты следующие обозначения:

$e(t)$  – э.д.с. во вторичной обмотке электропечного трансформатора;  $R$  – активное сопротивление;  $L$  – индуктивность;  $r_{\partial} = 1/g(t, T, g, i, Ud)$  – модель нелинейной нагрузки;  $M$  – взаимная индуктивность ветвей; индексы: «Т» и «К» – обозначают принадлежность параметра трансформатору и короткой сети, соответственно; А, В, С – обозначают соответствующие фазы.

Математическую модель взаимосвязей между внешними возбуждающими и внутренними электромагнитными параметрами для соединения вторичной обмотки электропечного трансформатора в звезду представляем в следующем виде:

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

где  $u_0$  – напряжение между нулевыми точками нагрузки и электропечного трансформатора;  
 $U_{\partial} = i/g_{\partial}$  – мгновенное значение напряжений на нелинейной нагрузке.

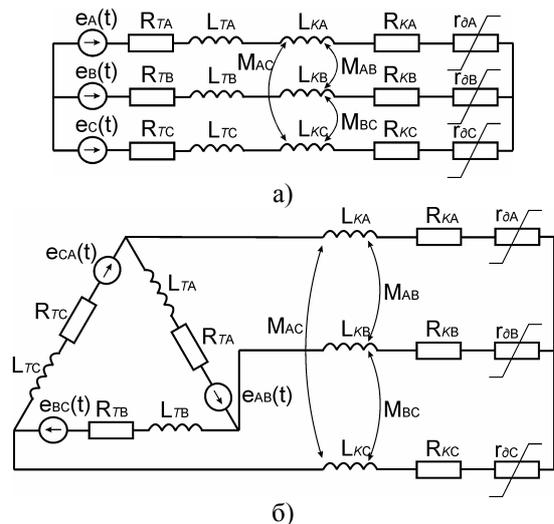


Рис.1 Эквивалентная схема математической модели электротехнического комплекса с нелинейной нагрузкой, соединение вторичной обмотки в звезду а) и треугольник б).

Структурная схема компьютерной модели приведена на рис. 2, на котором приняты следующие обозначения: СДУ – система дифференциальных уравнений; ПЭК – параметры контура, представляющие сочетания активных и реактивных сопротивлений, частоты, напряжения; НУ – начальные условия; ПВЗН – параметры вероятностных значения напряжения; РТКД – температурные коэффициенты дуги по Касси; АВГС – алгоритмы вычисления гармоник; ГЧОИ – графическое и числовое отображение результатов моделирования.

Обобщающим параметром отображающим, влияние резкопеременной нагрузки на электромагнитные процессы, являются приращение потерь электроэнергии.

В качестве примера на рис. 3 показаны зависимости приращения потерь от несимметрии и несинусоидальности возбуждающего тока. Из рис.3 видно, что несинусоидальность и несимметрия возбуждающего тока приводят к существенному увеличению добавочных потерь. В условиях реальной эксплуатации это приводит к перегревам активных и неактивных деталей электротехнического оборудования и отдельных звеньев систем электроснабжения электротехнических комплексов.

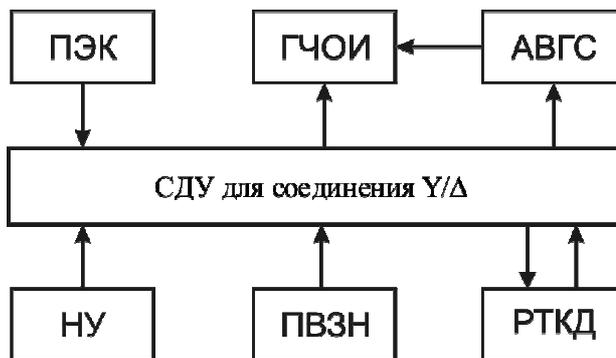
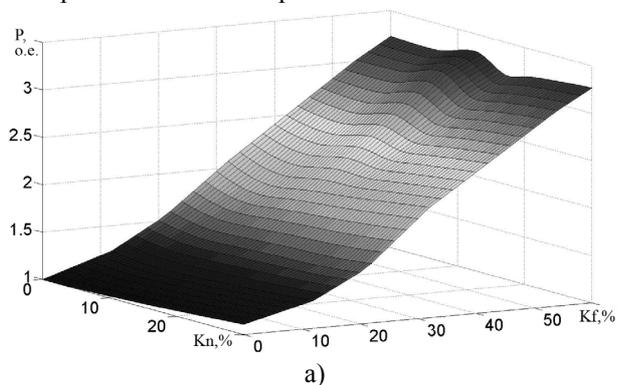


Рис. 2 Структурная схема компьютерной модели нестационарных электромагнитных процессов при соединении обмоток электропечного трансформатора в Y/Δ.

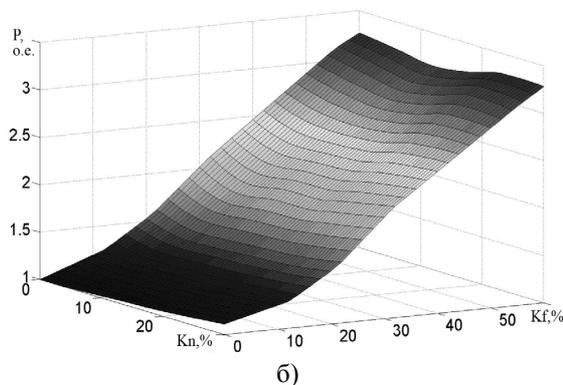


Рис. 3 Приращение потерь в зависимости от коэффициентов несимметрии и несинусоидальности возбуждающего тока в короткой сети модели при соединении вторичной обмотки трансформатора в звезду а) и треугольник б).

**Анализ полученных результатов** позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Разработанные математическая и компьютерная модели нестационарных электромагнитных процессов в системах электротехнологических комплексов с резкопеременным характером нагрузки позволяют исследовать влияние несинусоидальности и несимметрии тока при различных соединениях вторичных обмоток электропечного трансформатора.

2. Несинусоидальность тока в одной из фаз приводит к увеличению несимметрии (до 25%) при схеме соединения вторичных обмоток электропечного трансформатора в треугольник по сравнению со звездой.

3. Добавочные потери в электротехнологическом комплексе при работе дуговой сталеплавильной печи в режиме «расплав» и, в значительной степени в короткой сети, возрастают до 30% по сравнению с номинальными синусоидальными токами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зиновкин В.В. Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в массивных конструкционных сталях / Зиновкин В.В., Залужный М.Ю. Праці Інституту електродинаміки НАН України. – К.: 2006. – №1 (13). – С. 96-103.

2. Зиновкин В.В. Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в электротехническом оборудовании систем с резкопеременными нагрузками /В.В Зиновкин, М.Ю Залужный // Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» – Тольятти: ТГУ. – 2007. – С. 101–105.

3. В.В. Зиновкин, М.Ю. Залужный. Моделирование добавочных потерь в электрооборудовании и системе электротехнического комплекса при несинусоидальных токах. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 4 (45) частина 1. – 2007. – с 49-53.

4. Залужный М.Ю. Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в системе электроснабжения энергоёмких электротехнологических комплексов / М.Ю.Залужный – Запорожье: Електротехніка і електроенергетика. – 2009. – №2. – С. 70–73.