

УДК 621.3

А.А. Кралин<sup>1</sup>, И.В. Воротынцев<sup>1</sup>, В.В. Гуляев<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК $Y/Y_0$ ПРИ ПОФАЗНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Волжская государственная академия водного транспорта<sup>2</sup>

Рассмотрены вопросы моделирования параллельной трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток  $Y/Y_0$  при пофазном регулировании. Модели, выполненные в пакете Simulink, разработаны на базе метода симметричных составляющих и комплексных схем замещения трансформатора.

*Ключевые слова:* трехфазный трансформатор, параллельная работа, метод симметричных составляющих, схемы замещения, Simulink.

Параллельная работа трансформаторов целесообразна при суточных или сезонных колебаниях нагрузки, а также в случае, когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, в течение ряда лет. Параллельная работа трансформаторов позволяет при снижении нагрузки отключать часть трансформаторов, уменьшая расход энергии. При этом проще решается проблема резервирования, так как в случае выхода из строя какого-либо трансформатора остальные могут полностью или частично принять на себя его нагрузку.

Основной трудностью, возникающей при параллельной работе трансформаторов при пофазном регулировании, является обеспечение равномерного распределения нагрузки между ними.

Отличительной чертой пофазного регулирования являются несимметричные режимы [1–3] работы трансформатора, которые определяются несимметричностью междуфазных первичных напряжений, а также несимметричностью чисел витков первичных обмоток. Следствием является несимметрия вторичных напряжений, что определяет качество энергии потребителя.

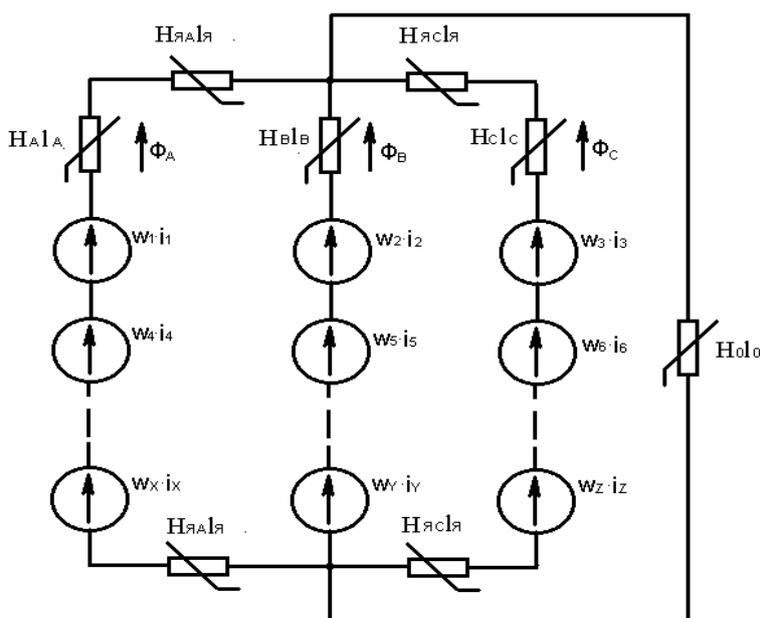


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи трансформатора

Исследование параллельной работы трансформаторов целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink.

Для составления моделей в Simulink необходимо иметь математическое описание электромагнитной системы трехфазного трехстержневого трансформатора.

Схема замещения магнитной цепи (рис. 1.) состоит из следующих элементов ( $w_1i_1-w_xi_x$ ), ( $w_2i_2-w_yi_y$ ), ( $w_3i_3-w_zi_z$ ) - намагничивающие силы обмоток на стержнях магнитопровода; ( $\Phi_A-\Phi_C$ ) соответственно магнитные потоки фаз;  $H_{AlA} \div H_{ClC}$ ;  $H_{ЯAlЯ} \div H_{ЯClЯ}$  - падения магнитных напряжений на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков,  $H_{0l0}$  - падение магнитного напряжения от потока нулевой последовательности.

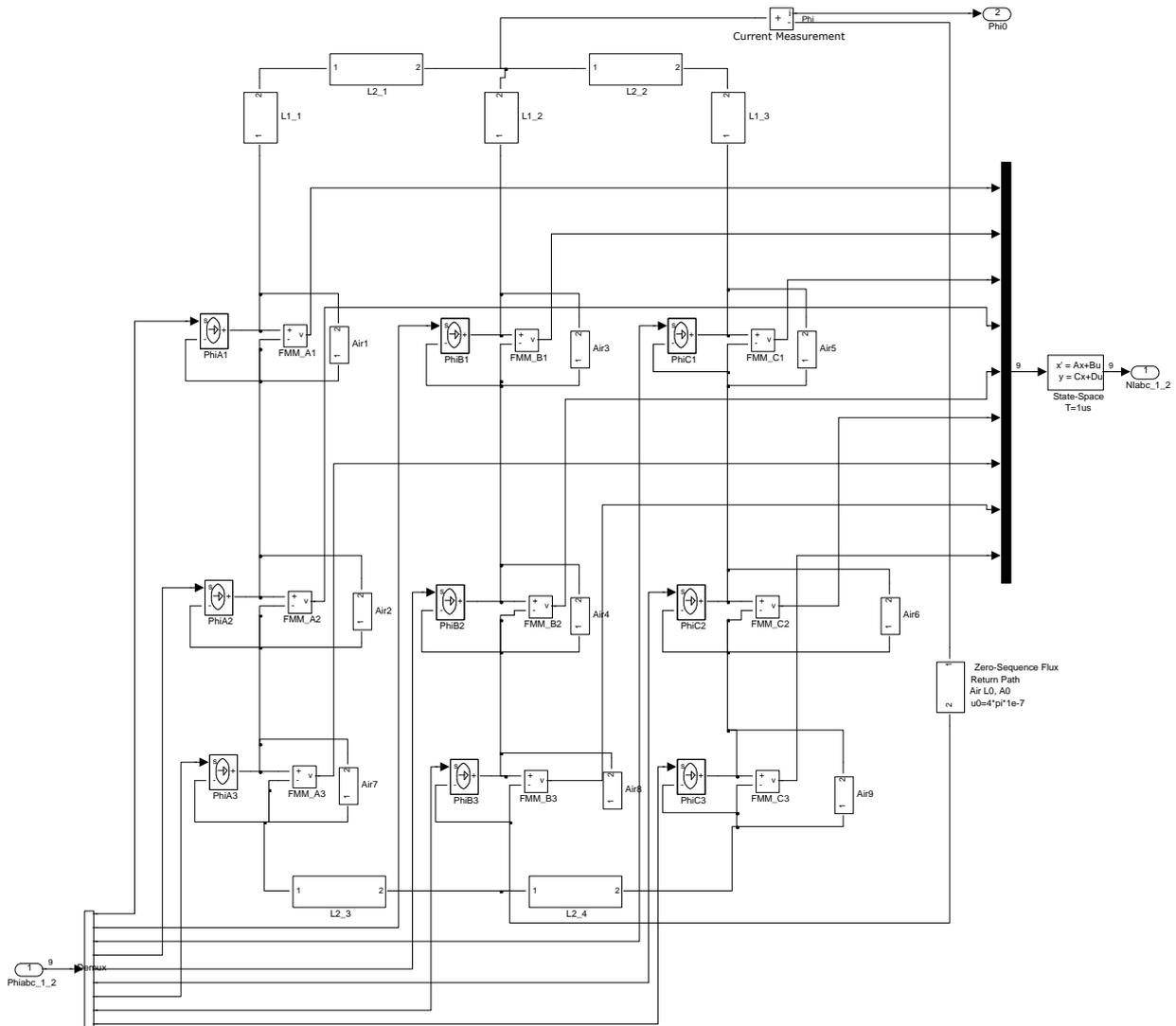


Рис. 2. Модель магнитной системы

В соответствии с приведенной схемой замещения уравнения магнитного состояния трехфазного многообмоточного трансформатора будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 w_1i_1 + w_4i_4 + \dots + w_xi_x - H_{AlA} - H_{ЯAlЯ} - H_{0l0} &= 0; \\
 w_2i_2 + w_5i_5 + \dots + w_yi_y - H_{BlB} - H_{0l0} &= 0; \\
 w_3i_3 + w_6i_6 + \dots + w_zi_z - H_{ClC} - H_{ЯClЯ} - H_{0l0} &= 0;
 \end{aligned}$$

Величина потока нулевой последовательности:

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = \Phi_0.$$

Магнитные потери учитываются с помощью активных сопротивлений, включенных параллельно соответствующим обмоткам.

Нелинейные свойства материала магнитопровода учитываются с помощью кусочно-линейной интерполяции заданной табличной функции основной кривой намагничивания электротехнической стали. Модель магнитной цепи, выполненная в пакете Simulink, представлена на рис. 2 [3].

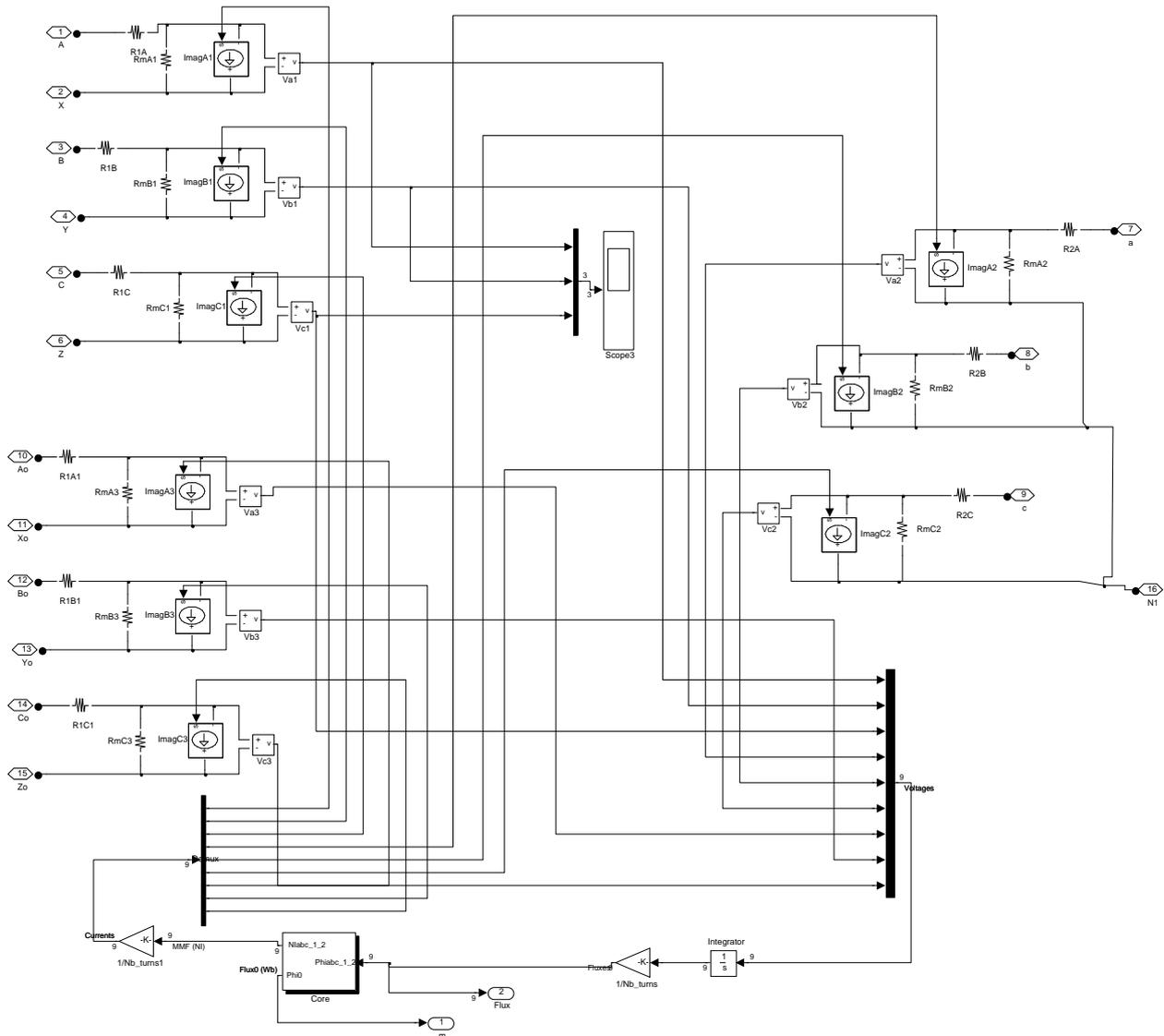


Рис. 3. Модель электрической системы трансформатора

В дополнение к системе нелинейных алгебраических уравнений составлена модель электрической системы (обмоток) трансформатора по следующим выражениям:

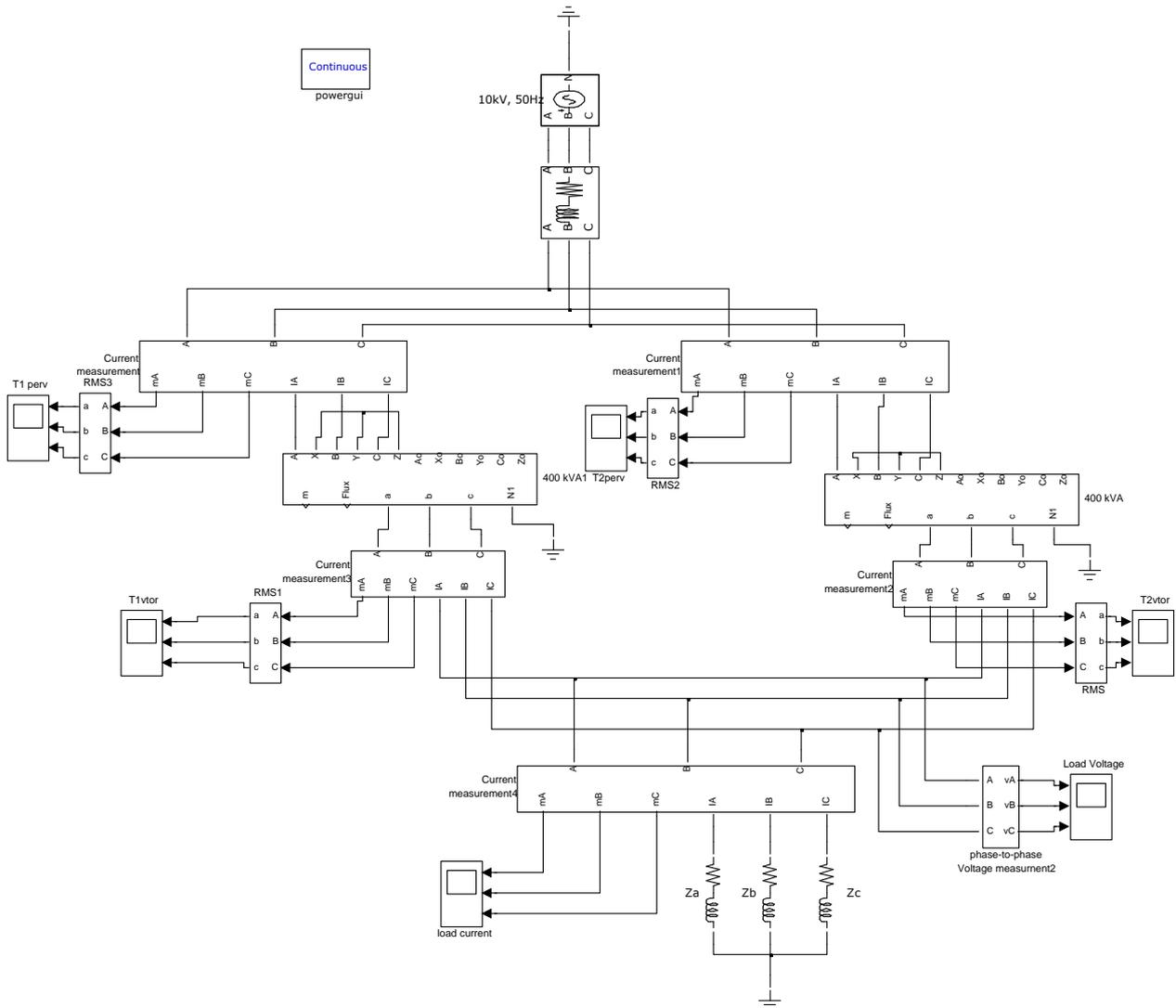
$$U_1 = L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_A}{dt} + R_1 i_1;$$

$$U_2 = L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + R_2 i_2;$$

$$U_Y = L_{SY.Y} \frac{di_Y}{dt} + w_Y \frac{d\Phi_Y}{dt} + R_Y i_Y;$$

где  $U_n$  – напряжение соответствующей обмотки;  $L_{Sm,m}$  – собственные индуктивности рассеяния обмоток;  $R_n$  – активные сопротивления обмоток;  $w_n$  – число витков обмоток (рис. 3).

Представленные выше уравнения представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения электромагнитных связей трехфазного многообмоточного трансформатора. Модель параллельной работы трансформаторов представлена на рис. 4.



**Рис. 4. Модель параллельной работы двух трансформаторов**

С помощью разработанной модели были проведены исследования параллельной работы двух трехфазных трансформаторов ТС-400/10 с напряжениями короткого 4,6% и 5,5% соответственно. В результате проведенного моделирования измерены первичные и вторичные напряжения и токи трансформаторов, уравнительные токи, суммарные потери мощности в режиме холостого хода и под нагрузкой.

**Выводы**

1. Вследствие неравенства напряжений КЗ при параллельной работе трансформаторов имеет место неравномерное распределение нагрузки. Использование установленной мощности параллельно включенных трансформаторов составляет 91,8 %.
2. При пофазном регулировании вследствие неравенства коэффициентов трансформации возникают уравнительные токи, которые вызывают неравномерное распределение

нагрузки. Различие коэффициентов трансформации на  $\pm 5\%$  вызывает уравнительный ток в обмотках до 55% от номинального фазного тока трансформатора.

#### Библиографический список

1. Алтунин, Б.Ю. Исследование несимметричных режимов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, И.А. Карнавский // Промышленная энергетика. 2013. №12. С. 13–16.
2. Алтунин, Б.Ю. Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, В.В. Гуляев // Вестник волжской государственной академии водного транспорта. 2012. № 32. С. 195–198.
3. Кралин, А.А. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink [Электронный ресурс] / А.А. Кралин, Б.Ю. Алтунин // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362>

Дата поступления  
в редакцию 15.12.2014

А.А. Kralin<sup>1</sup>, I.V. Vorotyncev<sup>2</sup>, V.V. Gulyaev<sup>2</sup>

#### RESEARCH OF PARALLEL OPERATION OF THREE-PHASE TRANSFORMERS WITH Y/Y0 WINDINGS CONNECTION AT PHASE BY PHASE REGULATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Volga state academy of water transport<sup>2</sup>

**Purpose:** The research of parallel operation three-phase transformers with Y/Y0 winding connection.

**Design/methodology/approach:** Models are made in Simulink by means of structural scheme.

**Findings:** Model allows us to study electromagnetic processes of parallel operation of three-phase transformers at phase by phase control. Models consist of two parts: magnetic and electrical.

*Key words:* three-phase transformer, parallel operation, the method of symmetrical components, equivalent circuits, Simulink.