

## Моделирование режимов параллельной работы трехфазных распределительных трансформаторов

*А.А. Кралин, М.Н. Охотников*

*Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева*

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы моделирования режимов параллельной работы распределительных трансформаторов, входящих в состав трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности. Модели выполнены в пакете Simulink. Представлена структурная модель параллельной работы двух трехфазных трансформаторов, с помощью которой произведено исследование электромагнитных процессов при пофазном регулировании.

**Ключевые слова:** трехфазный трансформатор, параллельная работа трехфазных трансформаторов, моделирование, Simulink.

Параллельная работа трехфазных распределительных трансформаторов при авариях, а также необходимом ремонте трансформаторного оборудования, позволяет легче решать проблему резервирования электроснабжения потребителей. В случае параллельной работы трансформаторов в периоды малых нагрузок существует возможность отключить один из работающих трансформаторов, уменьшив тем самым потери электроэнергии.

Обеспечение равномерного распределения нагрузки при параллельной работе трансформаторов является весьма актуальной.

В ходе выполнения НИР проведено исследование режимов параллельной работы существующих серийно выпускаемых распределительных трансформаторов с опытным трансформатором, лежащим в основе разрабатываемого трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности с ключами однонаправленного тока (ТТРНМ ОТ) (рис. 1). Анализ данных режимов позволяет определить параметры трансформаторно-тиристорного оборудования, дать рекомендации по оптимальному распределению нагрузки [1].

ТТРНМ ОТ содержит регулируемый опытный трансформатор ТСЗН-400/10 и тиристорное переключающее устройство (ТПУ), которое выполняет автоматическое или ручное переключение трех ответвлений каждой фазы обмотки ВН в диапазоне  $\pm 5\%$ .

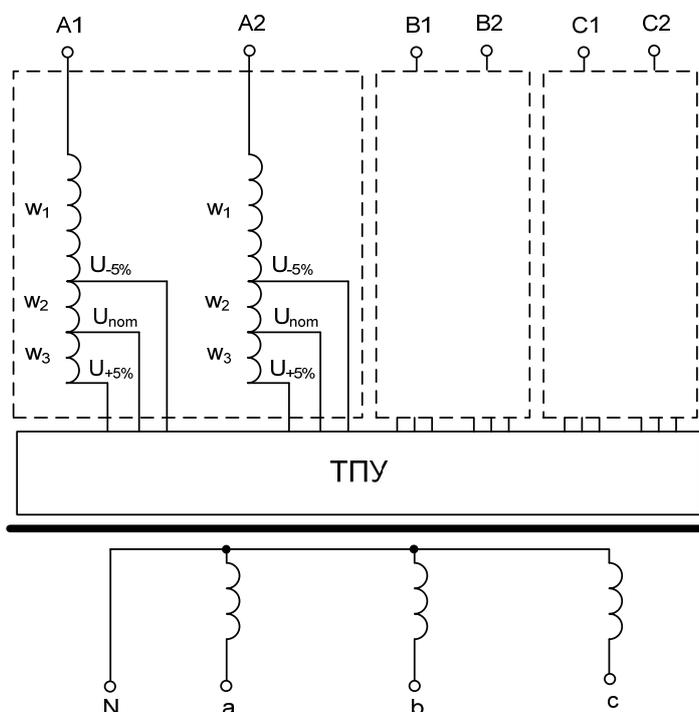


Рис. 1. Электрическая схема трансформатора ТСЗН-400/10

Серийные трансформаторы имеют устройство ПБВ с ручным переключением в диапазонах  $\pm 2 \times 2,5\%$ . В связи с различными характеристиками ПБВ и ТПУ возникают как симметричные, так и несимметричные режимы параллельной работы трансформаторов [2].

Симметричные режимы работы имеют место при одинаковых коэффициентах трансформации, несимметричные - при различных коэффициентах трансформации. Несимметричные режимы возникают при пофазном регулировании коэффициента трансформации в одной или двух фазах [1,2].

Исследование режимов работы указанных трансформаторов целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с

использованием мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink [3,4].

Для составления моделей в Simulink необходимо иметь математическое описание электромагнитной системы трехфазного трехстержневого трансформатора [5-7].

Основные допущения при разработке нелинейных математических моделей трансформаторов общеприняты [8-10]. Системы уравнений в матричной форме записи при нулевых начальных условиях будут иметь следующий вид:

$$w \cdot I(p) = H(p) \cdot l \quad (1)$$

$$U(p) = p \cdot L \cdot I(p) + p \cdot w \cdot \Phi(p) + R^d \cdot I(p) \quad (2)$$

где  $w$  вектор содержащий количества витков соответствующих обмоток,  $I(p)$  вектор токов,  $H(p) \cdot l$  – падения магнитного напряжения на участках магнитопровода,  $\Phi$  - магнитный поток,  $l$  - длина соответствующего участка магнитопровода,  $U(p)$  - напряжение обмотки;  $L$  – матрица собственных индуктивностей и индуктивностей рассеяния пары обмоток,  $R^d$  диагональная матрица активных сопротивлений обмоток.

Уравнения, представленные выше, являются нелинейными дифференциальными уравнениями трехфазного многообмоточного трансформатора. Модель параллельной работы трансформаторов, в основе которой лежат уравнения (1) –(2) представлена на рис.2.

В результате проведенного моделирования измерены первичные и вторичные напряжения и токи трансформаторов, уравнительные токи, суммарные потери мощности в режиме холостого хода.

Одним из несимметричных режимов является отклонение числа витков обмотки ВН во всех фазах ТСЗН-400/10 на  $\pm 5\%$ , а у серийного трансформатора ТС-400/10 установка коэффициента трансформации во всех фазах в номинальное положение. Расчеты и моделирование показывают, что

величина уравнивающих токов в этом режиме составляет 50-55% от номинального значения тока.

При использовании пофазного регулирования коэффициент трансформации ТСЗН-400/10 изменяется независимо в каждой фазе. При этом также возникает уравнивающий ток и дополнительные потери.

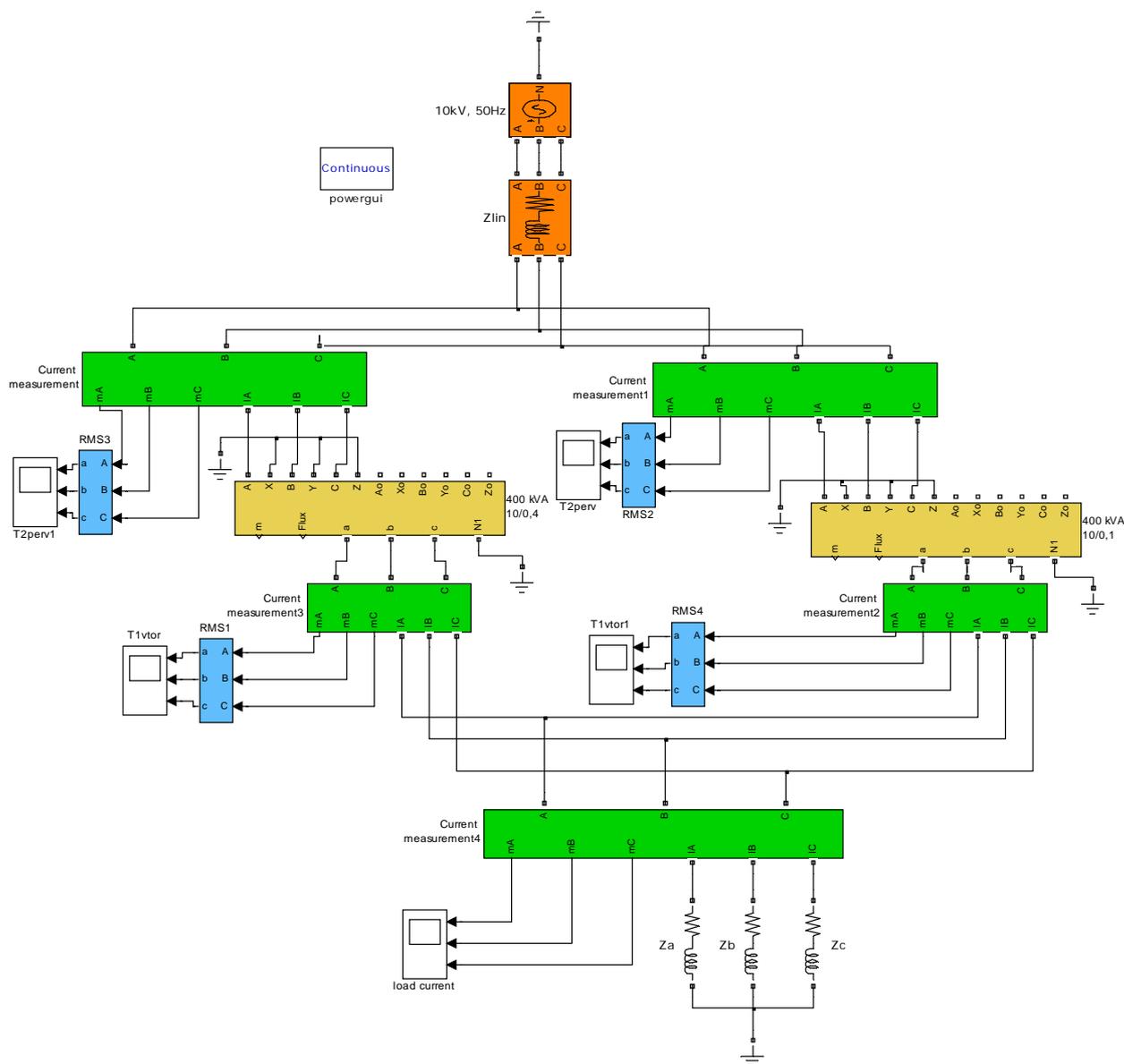


Рис. 2.- Модель параллельной работы двух трансформаторов

По результатам моделирования установлено, что при изменении коэффициента трансформации в одной фазе на  $\pm 5\%$  максимальная величина

уравнительного тока составляет 32-36% от номинального тока обмотки НН, а при изменении коэффициента трансформации в двух фазах 45-50%.

### Литература

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., Туманов И.М. Математическое моделирование тиристорных устройств РПН трёхфазных трансформаторов// Электротехника, 1996. – №6. – С.22-25.
3. Иванушкин, Ф.Н. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов: Монография / Ф.Н. Иванушкин, В.А. Сарапулов, П. Шимчак. – Щецин: ЩГУ, 2000.–310с.
4. Гультияев, А.К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows. – СПб.: КОРОНА принт,1999.- 288 с.
5. 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.
6. Кралин А.А. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362/.
7. Bhuyan K. Surge Modelling of Transformer Using Matlab-Simulink/ Bhuyan K, Chatterjee S // India Conference (INDICON), december 2009 Annual IEEE pp 1-4.
8. Хватов О.С. Математическое описание алгоритма управления топливоподачей дизель-генераторной электростанции переменной

скорости вращения // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL:  
ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1869/.

9. Титов В.Г. Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL:  
ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1909/.
10. Singh B. Integrated three-leg VSC with a zig-zag transformer based three-phase four-wire DSTATCOM for power quality improvement / Singh B, Jayaprakash P. , Somayajulu T.R., Kothari D.P., Chandra A., Al-Haddad K. // Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, pp 796-801.

### References

1. Altunin B.Yu., Kralin A.A., Gulyaev V.V. Vestnik volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta, 2012. № 32. pp.195-198.
2. Altunin B.Yu., Tumanov I.M. . Elektrotehnika. 1996. №6. pp.22-25.
3. Ivanushkin, F.N. Strukturnoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem i ikh elementov [Structural modeling of electromechanical systems and their elements]. F.N. Ivanushkin, V.A. Sarapulov, P. Shimchak. Shchetsin: ShchTU, 2000. 310 p.
4. Gul'tyaev, A.K. MATLAB 5.2. Imitatsionnoe modelirovanie v srede Windows [Simulation modeling for Windows]. SPb. KORONA print. 1999. 288 p.
5. Altunin B.Yu., Kralin A.A., Karnavskiy I.A. Promyshlennaya energetika, 2013. № 12. pp. 13-16.
6. Kralin A.A. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2014, №2 URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362
7. Bhuyan K. Surge Modelling of Transformer Using Matlab-Simulink/ Bhuyan K, Chatterjee S // India Conference (INDICON), december 2009 Annual IEEE pp 1-4.



8. Khvatov, O.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1869>
9. Titov, V.G. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2013, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1909](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1909)
10. Singh B. Integrated three-leg VSC with a zig-zag transformer based three-phase four-wire DSTATCOM for power quality improvement / Singh B, Jayaprakash P., Somayajulu T.R., Kothari D.P., Chandra A., Al-Haddad K. // Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, pp 796-801.