

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ РАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕОДИНАКОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ТРАНСФОРМАЦИИ

*А. С. Серебряков, д.т.н., профессор Нижегородский филиал МИИТ, Д. А. Семенов, аспирант, преподаватель кафедры «Электрификация и автоматизация сельскохозяйственного производства» ГОУ ВПО «Нижегородский государственный инженерно-экономический институт»*

**Аннотация.** Рассмотрена работа параллельно включенных трансформаторов в идеальных условиях и проанализировано, в какой степени ухудшается использование трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации.

**Ключевые слова.** Повышения надежности, коэффициенты трансформации, уравнивающий ток, ток нагрузки, загрузка трансформаторов.

Трансформаторы могут включаться на параллельную работу с целью обеспечения резервирования и повышения надежности электроснабжения потребителей. Если вместо одного трансформатора, рассчитанного на максимальную мощность нагрузки, установить два или несколько трансформаторов, имеющих ту же суммарную мощность, то при малых нагрузках часть параллельно работающих трансформаторов можно отключить и тем самым и уменьшить потери электроэнергии и увеличить КПД системы электроснабжения. Включение на параллельную работу может производиться и в том случае, когда Мощность потребителей в течение нескольких лет постепенно увеличивается и один ранее установленный

трансформатор не может обеспечить увеличение мощности потребителей.

При эксплуатации параллельно включенных трансформаторов возникает проблема распределения нагрузки между ними пропорционально их номинальным мощностям. Параллельную работу трансформаторов считают идеальной, если в режиме любой нагрузки каждый трансформатор загружен пропорционально его номинальной мощности и полная мощность нагрузки равно арифметической сумме всех мощностей параллельно работающих трансформаторов. При включении на параллельную работу одинаковых по мощности и по конструктивному исполнению трансформаторов равномерное распределение нагрузки между ними достигается автоматически в силу симметрии параллельно включенных элементов (рис.1).

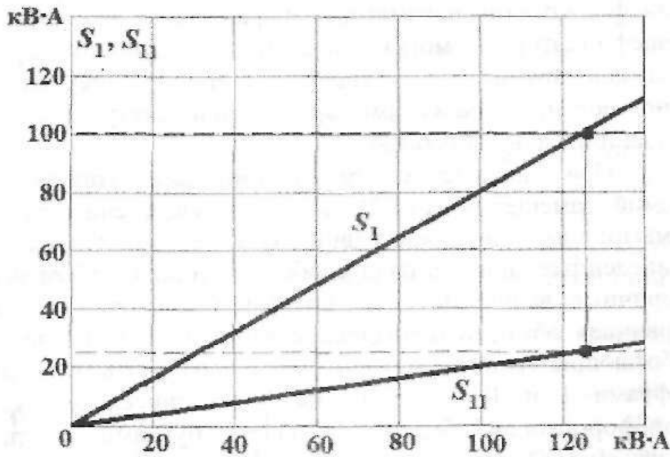


рис. 1.

На рис.1 приведен график распределения мощности нагрузки между двумя параллельно работающими трансформаторами в идеальных условиях. Мощности трансформаторов  $S_1=100$  кВ·А и  $S_{11}=25$  кВ·А.

Напряжения короткого замыкания трансформаторов  $u_{к1\%} = u_{к11\%} = 5,5 \%$ , составляющие напряжения короткого замыкания  $u_{к1a} = u_{к11a} = 2,4 \%$ ,  $u_{к1p} = u_{к11p} = 4.95 \%$

Из рис.1 видно, что мощность нагрузки распределяется между параллельно работающими трансформаторами прямо пропорционально их номинальным мощностям. При нагрузке 100 кВ·А нагрузку в 80 кВ·А берет первый трансформатор, а нагрузку в 20 кВ·А берет второй. При номинальной нагрузке 125 кВ·А нагрузку в 100 кВ·А берет первый трансформатор, а нагрузку в 25 кВ·А - второй, то есть, оба трансформатора в этом случае работают с номинальной нагрузкой.

В реальных условиях эксплуатации трансформаторов параметры параллельно включенных трансформаторов могут отличаться друг от друга. Проанализируем, в какой степени ухудшается использование трансформаторов при отступлении от условий идеальной работы.

При анализе будем пользоваться упрощенной схемой замещения (рис.2), то есть будем считать, что намагничивающие токи равны нулю и трансформаторы приведенные, причем, ради удобства, чтобы не обозначать вторичные величины со штрихами, будем считать, что первичная обмотка приведена к вторичной. Параллельно работающие трансформаторы будем обозначать римскими цифрами I и II, а величины, относящиеся к этим трансформаторам, будем обозначать буквами с этими индексами. Поскольку в приведенных трансформаторах первичные токи равны вторичным, то не будем в каждом трансформаторе делать между ними различие, а будем обозначать только принадлежность тока к данному трансформатору, то есть будем обозначать ток первого трансформатора  $I_I$ , второго -  $I_{II}$ , а ток в нагрузке -  $I$ .

Однолинейная схема включения для двух

параллельно работающих трансформаторов приведена на рис. 2,а. Схема замещения, соответствующая двум параллельно работающим однофазным трансформаторам или двум одноименным фазам трехфазного трансформатора приведена на рис. 2, б.

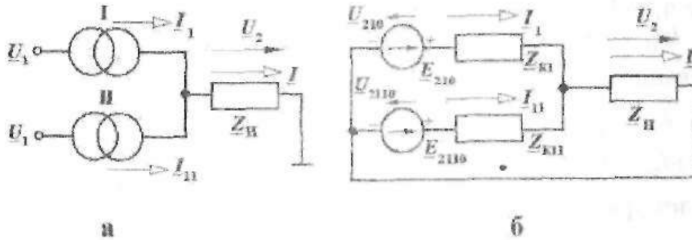


Рис. 2. Схема включения (а) и схема замещения (б) для двух параллельно работающих трансформаторов

Трансформаторы в схеме замещения на рис.2,б представлены источниками напряжения, ЭДС которых равна номинальному напряжению на выводах вторичной обмотки (напряжению в режиме холостого хода), а внутреннее сопротивление - сопротивлению короткого замыкания. Чтобы в замкнутом контуре, образованном источниками  $E_{210}$ ,  $E_{211}$  и малыми сопротивлениями короткого замыкания  $Z_{K1}$  и  $Z_{K11}$  не возник уравнивающий ток, необходимо, чтобы вторичные номинальные напряжения всех трансформаторов имели одинаковые значения и совпадали по фазе, то есть, чтобы трансформаторы принадлежали к одной группе соединений обмоток и имели одинаковые коэффициенты трансформации.

Проанализируем, в какой степени ухудшается использование трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации.

Будем считать, что напряжения короткого замыкания удовлетворяют идеальным условиям, то есть

они обратно пропорциональны мощностям параллельно работающих трансформаторов. Однако коэффициенты трансформации неравны. Пусть  $n_I < n_{II}$ . Следовательно,  $U_{I0} < U_{II0}$ . В этом случае в замкнутом контуре, образованном сопротивлениями короткого замыкания  $\underline{Z}_{K1}$  и  $\underline{Z}_{K11}$  (рис.2, б) под действием разности напряжений  $\Delta U = U_{I0} - U_{II0}$  даже при отсутствии внешней нагрузки возникает уравнивающий ток

$$\underline{I}_y = \frac{U_1:n_1 - U_1:n_{11}}{\underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{K11}} = \frac{U_1 \left( \frac{n_{11} - n_1}{n_1 n_{11}} \right)}{\underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{K11}}, \quad (1)$$

который нагружает вторичные и, соответственно, первичные обмотки трансформатора. Уравнивающий ток за счет падений напряжений изменяет напряжение на вторичных обмотках трансформаторов, понижая его на первом и повышая на втором, в результате чего устанавливается некоторое вторичное напряжение  $U_{I0} < U_2 < U_{II0}$ . При включении нагрузки  $\underline{Z}_H$  в обмотках трансформатора кроме уравнивающего тока возникает ток нагрузки. Уравнивающий ток, складываясь геометрически с током нагрузки, обуславливает непропорциональную загрузку трансформаторов.

Для анализа соотношений токов составим для схемы замещения (рис.2,б) уравнения по законам Кирхгофа:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_{11} - \underline{I} = 0, \quad (2)$$

$$\underline{Z}_{K1} \underline{I}_1 + \underline{Z}_H \underline{I} = \underline{U}_{10}, \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{K11} \underline{I}_{11} + \underline{Z}_H \underline{I} = \underline{U}_{110}, \quad (4)$$

Запишем уравнения (2)-(4) в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ \underline{Z}_{K1} & 0 & \underline{Z}_H \\ 0 & \underline{Z}_{K11} & \underline{Z}_H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_{11} \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}_{10} \\ \underline{U}_{110} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Решение системы уравнений (5) дает следующие выражения для токов:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{Z}_H(\underline{U}_{10} - \underline{U}_{110}) + \underline{Z}_{K11}\underline{U}_{10}}{\underline{Z}_{K1}\underline{Z}_{K11} + \underline{Z}_{K1}\underline{Z} + \underline{Z}_{k11}\underline{Z}}, \quad (6)$$

$$\underline{I}_{11} = \frac{\underline{Z}_H(\underline{U}_{110} - \underline{U}_{10}) + \underline{Z}_{K1}\underline{U}_{110}}{\underline{Z}_{K1}\underline{Z}_{K11} + \underline{Z}_{K1}\underline{Z} + \underline{Z}_{k11}\underline{Z}}, \quad (7)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{Z}_{K1}\underline{U}_{110} + \underline{Z}_{K11}\underline{U}_{10}}{\underline{Z}_{K1}\underline{Z}_{K11} + \underline{Z}_{K1}\underline{Z} + \underline{Z}_{k11}\underline{Z}}, \quad (8)$$

На рис. 3 приведены графики распределения нагрузки при активно-индуктивной нагрузке ( $\cos\varphi = 0,8$ ;  $\sin\varphi = 0,6$ ) и разнице коэффициентов трансформации в 2 %. Как видно из рис.3,а, ( $n_1 < n_{11}$ ) при загрузке первого трансформатора на 100 кВ·А второй трансформатор загружается только на 17 кВ·А, а мощность нагрузки составляет 116,7 кВ·А вместо возможных 125 кВ·А.

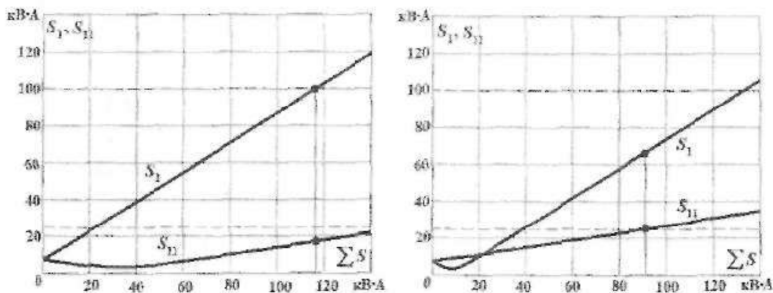


Рис. 3 Распределение нагрузки между двумя параллельно работающими трансформаторами при активно-индуктивной нагрузке: а)  $n_1 < n_{11}$  б)  $n_1 < n_{11}$ .

Таким образом, при неравенстве коэффициентов трансформации при полной загрузке одного трансформатора второй оказывается недогружен. При попытке загрузить второй трансформатор до номинальной мощности первый трансформатор будет перегружаться, что недопустимо.

Таким образом, полная мощность в нагрузке не достигает значения, равного сумме установленных мощностей. Такое положение вызвано тем, что токи в трансформаторах имеют разные фазы и в нагрузке они складываются не арифметически, а геометрически. При этом их геометрическая сумма, а следовательно, и геометрическая сумма мощностей оказывается меньше арифметической.

Учитывая сказанное, на практике при параллельной работе трансформаторов допускают в общем случае различие коэффициентов трансформации не более 0,5 % их среднего значения, а для трансформаторов с коэффициентом трансформации  $p < 3$  не более 1 %. При таком различии в коэффициентах трансформации разность

вторичных ЭДС невелика и уравнивающий ток незначителен.

### **Список используемой литературы:**

1. Серебряков, А. С. Трансформаторы. Учебное пособие. - Княгинино: НГИЭИ, 2010. - 300 с.
2. Серебряков, А. С. MATHCAD и решение задач электротехники. Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М: Маршрут, 2005. - 240 с.

## **THE RESEARCH OF PARALLEL WORK OF THE TRANSFORMATORS WITH DIFFERENT INDEXES OF TRANSFORMATION**

**A. S. Serebryakov**, the doctor of technical sciences, N. Novgorod department MIIT;

**D. A. Semenov**, the post-graduate student, the teacher of the chair «Electrification and automatization of agricultural production» the NGIEI

**Annotation.** The work of parallel switched transformers in ideal conditions is considered. The level of disproving of using of the transformers with different indexes of transformation is analyzed.

**The keywords.** Increasing of reliability, indexes of transformation, equal current, loading current, transformer loading.