

УДК 583.83

И. В. ХОМЕНКО, кандидат технических наук, доцент  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков

### АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*В статье рассмотрены основные закономерности изменения нагрузки распределительной сети. Проведен анализ электромагнитных процессов силового трансформатора в нормальном режиме, а также в режимах холостого хода и короткого замыкания. Установлены зависимости между электрическими и магнитными параметрами силового трансформатора.*

**Ключевые слова:** трансформатор, нормальный режим, режим короткого замыкания, режим холостого хода.

*У статті розглянуті основні закономірності зміни навантаження розподільчої мережі. Проведено аналіз електромагнітних процесів силового трансформатора у нормальному режимі, а також у режимах холостого ходу і короткого замикання. Встановлені залежності між електричними і магнітними параметрами силового трансформатора*

**Ключові слова:** трансформатор, нормальний режим, режим короткого замикання, режим холостого ходу.

#### Введение

Для надежного и эффективного управления режимом электрической сети необходимо четко представлять физику и взаимосвязь процессов происходящих в ее основных элементах. Для распределительных сетей такими элементами являются силовые трансформаторы, линии электропередач (воздушные или кабельные), электрические нагрузки. Необходимо отметить, что параметры сети и параметры режима связаны между собой и зависят от характера электропотребления или характера изменения нагрузки. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что среди приведенных элементов распределительной сети особое значение уделяется трансформаторному оборудованию. Трансформаторы располагаются в узлах электрической сети и связывают сети разного класса напряжения. При решении основных задач электроэнергетики по обеспечению надежности и бесперебойности электроснабжения, качества электроэнергии, эффективности всех производственных процессов этому оборудованию отводится первостепенное значение. Достаточно отметить, что по требованиям надежности к трансформаторному оборудованию предъявляются самые высокие требования. Все это в конечном итоге и определяет актуальность исследований режимов работы силового трансформатора, как элемента распределительной электрической сети.

Линейная модель трансформатора, разработанная в статьях [1, 2], может быть использована для качественного и количественного анализа режимов работы силовых (нелинейных) трансформаторов, которые эксплуатируются в распределительных сетях. Как правило, в таких сетях используются трехфазные двух- или трехобмоточные трансформаторы напряжением до 150 кВ и мощностью до 63 МВА.

В процессе эксплуатации нагрузка таких трансформаторов имеет резко неравномерный характер. Обычно специалисты выделяют суточную, недельную и годовую неравномерность нагрузки [3]. Отмечая случайный характер нагрузки в тоже время можно выделить ряд закономерностей:

1) В ночное время нагрузка уменьшается, а днем – увеличивается, причем днем, как правило, выделяются 2 максимума нагрузки – утренний и вечерний. Временной интервал между ними в течении года изменяется (увеличивается летом и уменьшается зимой), что обусловлено продолжительностью светового дня.

2) Нагрузка в рабочие дни больше, чем в праздничные или выходные. Количественные соотношения между их величинами определяется процентным соотношением между бытовой и производственной составляющей.

3) В зимний период, как правило, нагрузка увеличивается, в летний – уменьшается. Исключения составляют территории летнего отдыха и сельхозрайоны. Максимум зимнего потребления в основном определяется продолжительностью светового дня и минимальной температурой окружающего воздуха. Другие факторы, к которым можно отнести температуру теплоносителя, солнечную активность и ветровую нагрузку, оказывают влияние в меньшей степени. Вместе с тем в последние годы специалисты отмечают резкое увеличение нагрузки в летний период, что обусловлено увеличением объемов кондиционирования воздуха и работой холодильного оборудования. Все это в итоге может привести к появлению двух устойчивых максимумов нагрузки – зимнего и летнего, что в конечном итоге может поставить вопрос о смещении ремонтной площадки для энергетиков в весенне-летний период.

### Основная часть

Рассмотрим симметричный установившийся режим работы трехфазного вухобмоточного силового трансформатора. Анализ проведем для одной фазы приведенного трансформатора (трансформатор с коэффициентом трансформации  $n = 1$ ). Модель трансформатора представлена на рис. 1. В настоящее время нагрузка трансформаторов в распределительных сетях Украины составляет 25–50 %. В таких условиях когда перевозбуждение незначительно электромагнитные процессы силового трансформатора могут быть представлены линейными уравнениями второго закона Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток:

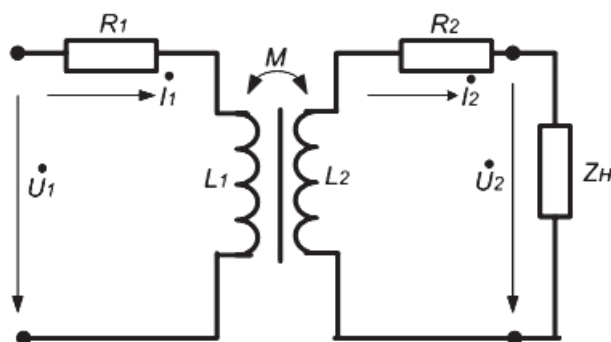


Рис.1. Схема нелинейного трансформатора

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_{2m} = \dot{I}_1 (R_1 + j\omega L_1), \quad (1)$$

$$\dot{E}_{1m} = \dot{I}_2 (R_2 + j\omega L_2) + \dot{U}_2$$

где  $\dot{E}_{1m} = -j\omega M \dot{I}_1$  – ЭДС взаимной индукции во вторичной обмотке, созданная током первичной обмотки,

$\dot{E}_{2m} = -j\omega M \dot{I}_2$  – ЭДС взаимной индукции в первичной обмотке, созданная током вторичной обмотки.

Электромагнитные процессы, описываемые линейной моделью силового трансформатора, могут быть представлены следующим образом. Под воздействием приложенного синусоидального напряжения  $\dot{U}_1$ , в первичной обмотке протекает ток  $\dot{I}_1$ . Этот ток приводит к появлению в магнитопроводе трансформатора основного синусоидального реактивного магнитного потока  $\Phi_1$ . Функционально магнитопровод усиливает и концентрирует магнитное поле первичной обмотки трансформатора. Основным магнитный поток приводит к появлению ЭДС самоиндукции  $\dot{E}_1 = -j\omega L_1 \dot{I}_1$  в первичной

обмотке трансформатора, которая уравнивает приложенное напряжение  $\dot{U}_1$ . Кроме того, этот поток приводит к появлению ЭДС взаимоиנדукции во вторичной обмотке трансформатора  $\dot{E}_{1m} = -j\omega M \dot{I}_1$ . При подключенной нагрузке потребителей под действием этой ЭДС во вторичной обмотке возникает ток  $\dot{I}_2$ . Нагрузочный ток  $\dot{I}_2$  создает свой реактивный магнитный поток,  $\Phi_2$  который взаимодействует с потоком  $\Phi_1$  частично вытесняя его в масло трансформатора и размагничивая магнитопровод. Магнитный поток  $\Phi_2$  наводит ЭДС самоиндукции во вторичной обмотке  $\dot{E}_2 = -j\omega L_2 \dot{I}_2$  и ЭДС взаимоиנדукции в первичной обмотке  $\dot{E}_{2m} = -j\omega M \dot{I}_2$ . Так как первичная обмотка подключена к источнику бесконечной мощности в соответствии с принципом саморегуляции трансформатора ток  $\dot{I}_1$  увеличится пропорционально току  $\dot{I}_2$ . Физической основой принципа саморегуляции трансформатора является природа взаимодействия потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , причем в нормальных режимах эксплуатации трансформатора результирующий поток остается практически постоянным. Активные падения напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора равны соответственно  $\dot{I}_1 R_1$  и  $\dot{I}_2 R_2$ . Нагрев трансформатора обусловлен активными потерями в его обмотках и магнитопроводе, причем в большей степени нагреваются его обмотки. Нагрузочные потери (потери в обмотках трансформатора) определяются  $\frac{P_{кз} \cdot S^2}{S_{ном}^2}$ , а потери в стали определяются потерями холостого хода. Напряжение у потребителей определяется величиной  $\dot{U}_2$ . Векторная диаграмма электромагнитных процессов трансформатора в нормальном режиме представлена на рис. 2.

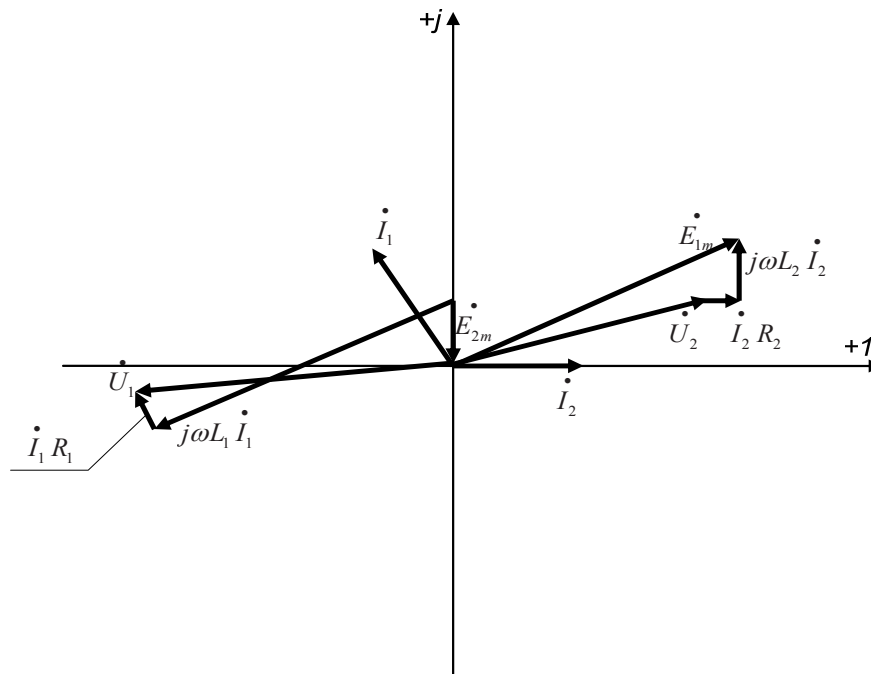


Рис. 2. Нормальный режим

Общая теория трансформации построена на предположении постоянства величин  $\mu$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  и  $M$  в процессе эксплуатации силовых трансформаторов. В реальных условиях работы трансформатора под нагрузкой эти величины связаны между собой и непостоянны, что определяет сложный нелинейный характер математического описания процессов

реального трансформатора [4]. Качественный и количественный анализ процессов происходящих в силовом трансформаторе удобно рассматривать для предельных режимов их работы. Этими режимами являются режимы холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ).

Наш анализ основан на двух принципиальных положениях:

– передача энергии из первичной обмотки во вторичную осуществляется электромагнитным полем, силовые линии которого замыкаются по магнитопроводу и маслу трансформатора;

– взаимодействие первичных и вторичных магнитных потоков в магнитопроводе практически полностью регулирует процесс передачи электроэнергии, определяя индуктивные характеристики обмоток трансформатора.

В режиме ХХ к первичной обмотке трансформатора приложено номинальное напряжение  $\dot{U}_1$ . Под действием этого напряжения по обмотке протекает ток ХХ или ток намагничивания  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 = \dot{I}_{xx}$ . Под действием этого тока в магнитопроводе возникает магнитный поток  $\dot{\Phi}_1 = \lambda \dot{F}_1 = \lambda \omega_1 \dot{I}_1$ , а индуктивность первичной обмотки равна соответственно:

$$L_1 = \frac{\omega_1 \dot{\Phi}_1}{\dot{I}_1} = \lambda \omega_1^2, \quad (2)$$

где  $\lambda = \frac{1}{\sum \frac{l_i}{\mu_i s_i}}$  – магнитная проводимость,  $l_i, \mu_i, s_i$  – длина, магнитная проницаемость и сечение  $i$ -го участка магнитной цепи.

Магнитный поток  $\dot{\Phi}_1$ , замыкается практически по всему сечению и длине магнитопровода, что определяет значительную проводимость  $\lambda$  и, следовательно, максимальное значение индуктивности  $L_1$ . В результате ток ХХ  $\dot{I}_{xx}$  (%) для силовых трансформаторов в распределительных сетях не превышает 2 %, что определяет незначительные тепловые потери в его обмотке. Приложенное напряжение  $U_1$  имеет две составляющие  $R_1 \dot{I}_1$  и  $j\omega L_1 \dot{I}_1$ , причем  $R_1 \dot{I}_1 \ll j\omega L_1 \dot{I}_1$ . Под воздействием потока  $\dot{\Phi}_1$ , во вторичной обмотке наводится ЭДС взаимной индукции  $\dot{E}_{1m} = -j\omega M \dot{I}_1$ , причем  $\dot{E}_{1m} = \dot{U}_2$ , а  $\dot{I}_2 = 0$  (энергия нагрузкой не потребляется). Рассмотренные электромагнитные процессы обуславливают активные потери в магнитопроводе (на вихривые токи и гистерезис) – потери ХХ  $P_{xx}$  или потери в стали. Для распределительных сетей они составляют 0,5–320 кВт. Векторная диаграмма режима ХХ трансформатора представлена на рис. 3.

Режим КЗ определяется максимальными значениями нагрузки и нагрузочного тока  $\dot{I}_2$ , а комплексное сопротивление нагрузки минимально. Практически это означает либо наброс нагрузки (существенное увеличение нагрузки у потребителей) либо аварийное КЗ. При этом напряжение у потребителей  $U_2$  падает до 0, а  $\dot{E}_{1m}$ , определяемая током  $\dot{I}_1$ , становится равной:

$$\dot{E}_{1m} = R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2. \quad (3)$$

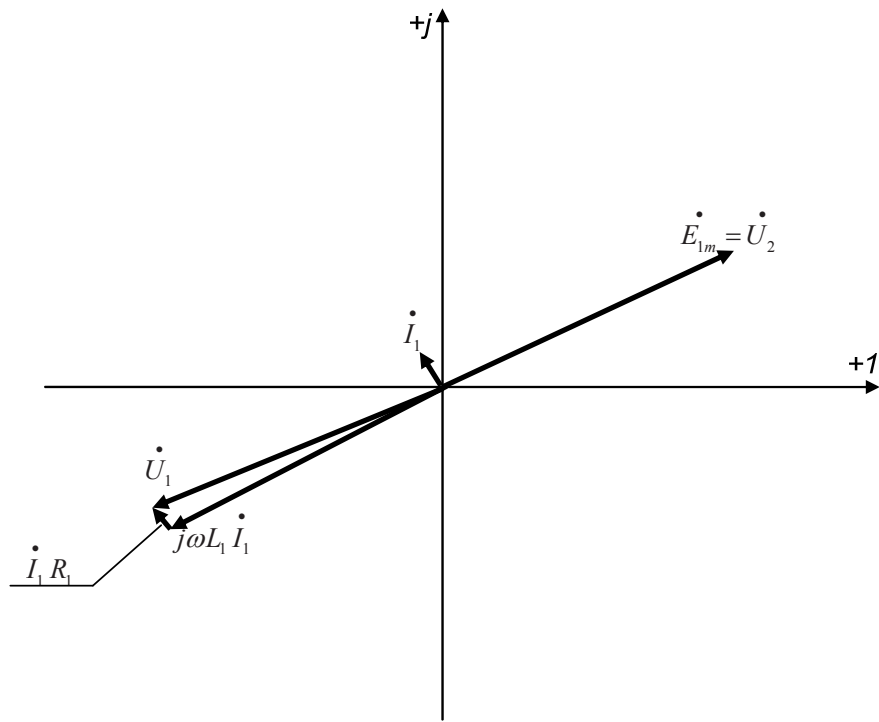


Рис 3. Режим холостого хода

Ток  $\dot{I}_2$ , создает максимальный поток  $\dot{\Phi}_2$ , который почти полностью вытесняет поток  $\dot{\Phi}_1$ , из магнитопровода в масло (воздух) трансформатора. Проводимость  $\lambda_1$  уменьшается, уменьшая величину  $L_1$ , а ток  $\dot{I}_1$  возрастает пропорционально увеличению тока  $\dot{I}_2$ . Нагрузочные потери резко возрастают (потери в меди), а потери ХХ (потери в стали) незначительны. Такой режим определяет существенный нагрев трансформаторов в распределительных сетях для которых  $P_{кз}$  составляют 2-900 кВт. Векторная диаграмма режима КЗ представлена на рис.4.

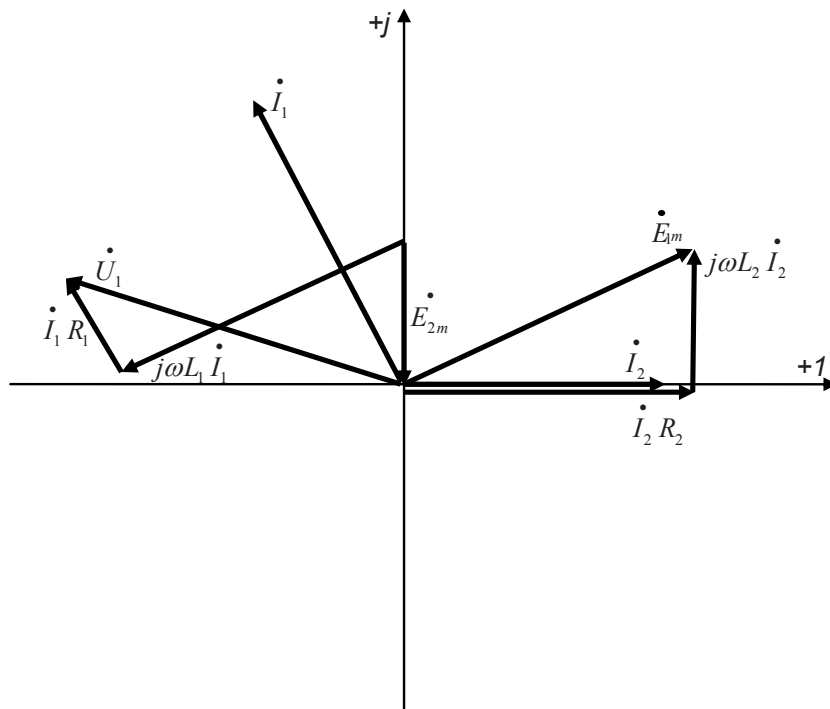


Рис 4. Режим короткого замыкания

### Выводы

Проведенный теоретический анализ электромагнитных процессов различных режимов работы силовых трансформаторов, может быть использован при диспетчерском управлении и оптимизации режимов в распределительных сетях.

### Список литературы

1. Придубков П. Я., Хоменко І. В. Математичне моделювання електромагнітних процесів ідеального трансформатора. // Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит. – №11 – 2010. – 55 – 61 с.
2. Придубков П. Я. Хоменко І. В. Про векторні й топографічні діаграми лінійного трансформатора та його схеми заміщення. // Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит. – №3. – 2011. – 67 – 73 с.
3. Веников В. А., Журавлев В. Г., Филиппова Г.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем.-М.: Энергоиздат, 1981. 464 с.
4. Бондаренко В.М. Методы и алгоритмы анализа статических и динамических режимов нелинейных цепей. Киев:1974.105 с.

## ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF DIFFERENT OPERATION MODES OF POWER TRANSFORMERS

I. V. KHOMENKO, Candidate of Engineering, Associate Professor

*The paper considers the main regular patterns of load changes in a distribution network. It analyzes electromagnetic processes of the power transformer in a normal mode as well as in the idle and short-circuit modes. It established the dependencies between electric and magnetic parameters of the power transformer.*

**Key words:** transformer, normal mode, short-circuit mode, idle mode.

### References

1. Prydubkov, P. Ya., Khomenko, I. V. (2010), "Mathematical simulation of eclectic and magnetic processes of an ideal transformer" ["Matematychnе modeliuвання elektromagnitnykh protsesiv idealnogo transformatora"], Energy Saving · Power engineering · Energy audit, No. 11, P. 55–61.
2. Prydubkov, P. Ya., Khomenko, I. V. (2011), "Regarding vector and topographic diagrams of the linear transformer and its equivalent circuits" ["Pro vektorni i topografichni diagramy liniinogo transformatora ta yogo skhemy zamishchennia"], Energy Saving · Power engineering · Energy audit , No. 3, P. 67–73/
4. Venikov, V. A., Zhuravlev, V. G., Filipova, G. A. (1981), Optimization of modes of electric power stations and power systems [Optimizatsiya rezhimov elektrostantsiy i energosistem], Energoizdat, Moscow, 464 p.
4. Bondarenko, V.M. (1974), Methods and algorithms of analysis of static and dynamic modes of nonlinear circuits [Metody i algoritmy analiza staticheskikh i dinamicheskikh rezhimov nelineynykh tsepey], Kyiv, 105 p.

Поступила в редакцию 20.05 2014 г.