

## ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СЛОЕВЫМИ ОБМОТКАМИ

Пуйло Г.В., д.т.н., проф., Трищенко Е.В.

Одесский национальный политехнический университет

Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко 1, ОНПУ, кафедра электрических машин

тел. (0482) 288-680, E-mail: puiilo@ukr.net

*Рассматривается обобщенная ММ силового трансформатора со слоевыми обмотками, обеспечивающая возможность автоматизированного синтеза, анализа и оптимизации распределительных трансформаторов с различными структурами магнитных систем и обмоток.*

*Розглядається узагальнена математична модель силового трансформатора з шаровими обмотками, яка забезпечує можливість автоматизованого синтезу, аналізу та оптимізації розподільчих трансформаторів з різними структурами магнітних систем та обмоток.*

Актуальность совершенствования современных распределительных трансформаторов обусловлена требованиями ресурсо- и энергосбережения при их производстве и эксплуатации.

В мировом трансформаторостроении эта проблема решается за счет реализации комплекса мероприятий [1], среди которых одними из наиболее эффективных являются совершенствование технических решений для магнитных систем, обмоток, изоляции, систем охлаждения и оптимизация электромагнитных и геометрических параметров трансформаторов.

Это, а также появление новых видов электротехнических сталей, привело к росту конструктивного многообразия (структур) магнитных систем и обмоток, а также к различиям в уровнях электромагнитных нагрузок в распределительных трансформаторах выпускаемых во всем мире.

Обоснованная оценка эффективности того или иного технического решения силового трансформатора затруднена не только его конструктивными различиями, но и тем, что в различных конструкциях трансформаторов для магнитных систем используются различные электротехнические стали, различные схемы размещения обмоток, а изготавливаются они на основе отличающихся технологических процессов и при различных стоимостях электротехнических, комплектующих компонентов, энергетических и трудовых затрат.

Для обоснованного выбора наиболее эффективной (оптимальной) структуры магнитной системы и обмоток трансформаторов в определенной (заданной) технико-экономической ситуации необходимо четкое технико-экономическое сопоставление вариантов трансформаторов разных конструктивных исполнений с оптимизированными параметрами в соответствии с заданными критериями. По существу – необходимо решать задачу структурно-параметрической оптимизации, при которой сравниваются структурные варианты с оптимизированными параметрами.

При традиционном подходе к решению такой задачи необходим комплекс математических моделей (ММ) учитывающих специфику структуры магнитной системы, обмоток, изоляции, свойств электротехнических материалов, системы охлаждения и т.д. для каж-

дого из таких конструктивных исполнений.

В этой ситуации суммарная мощность множества возможных технических решений (структурных вариантов) трансформатора ( $W_{ст}$ ) определяется как множеством возможных технических решений для магнитных систем ( $W_{см}$ ), так и множеством возможных технических решений для обмоток ( $W_{со}$ ), т.е. полное множество расчетных вариантов.

$$W_{ст} = \prod_{i=1}^k W_{см} \cdot \prod_{j=1}^n W_{со} \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, k}$  - число возможных технических решений для магнитных систем,  $j = \overline{1, n}$  - число возможных технических решений для обмоток.

Мощность множества  $W_{см}$  определяется множеством как возможных конструктивных исполнений магнитных систем (планарные, пространственные, витые, шихтованные, комбинированные, с различными формами сечений стержней и ярм и т.п.), так и множеством возможных видов применяемых электротехнических сталей, конструкционных материалов. Мощность множества  $W_{со}$  определяется множеством возможных технических решений для обмоток (схем размещения концентров, структур сечений витка, материала изоляции, структур главной изоляции и т.п.), а также возможными видами проводникового материала, изоляции обмоточного провода. Если предположить, что количество возможных технических решений в конкретной проектной ситуации только для магнитных систем  $W_{см} = 10^2$ , а для системы обмоток  $W_{со} = 10^3$ , то число структурных вариантов, которые надо синтезировать, и у каждого из которых необходимо оптимизировать параметры, составляют  $10^5$ .

Поэтому в современных условиях системы автоматизированного проектирования трансформаторных устройств должны основываться на таких принципах организации процесса проектирования и на таких системных математических моделях (ММ), которые позволяют существенно сокращать количество необхо-

димых расчетных вариантов еще на этапах предварительного (эскизного) проектирования и в то же время обеспечивать необходимую точность структурной оптимизации.

С этих позиций наиболее целесообразен дедуктивный принцип организации процесса проектного синтеза [3] с разделением его на два этапа: этапа предварительного синтеза и оптимизации трансформатора и этапа детального синтеза и частной оптимизации на основе результатов первого этапа и стандартизованных конструктивных элементов.

На предварительном этапе процесс синтеза и оптимизации эффективно реализуется на основе обобщенных ММ, обеспечивающих синтез технических решений трансформаторов с требуемыми функциональными параметрами для заданных конструктивных решений (структур) магнитных систем, обмоток и других особенностей.

Первой особенностью такой ММ является то, что в ней в качестве управляемых переменных выбраны такие параметры, как отношение потерь ( $\xi$ ), отношение стоимостей обмоток и магнитных систем ( $X$ ) и индукция в стержне ( $B_c$ ), которые обеспечивают в результате реализации этапа предварительного синтеза получение вариантов с оптимальными по условиям ресурсо- и энергосбережения уровнями расхода активных материалов, потерь и удовлетворяющих основным функциональным требованиям. На этом же этапе легко контролируется совместимость заданных технических требований.

Для сокращения размерности оптимизационной задачи на предварительном этапе проектного синтеза в ММ различных типов магнитных систем в качестве переменных используются только их основные геометрические параметры – площадь сечения стержня  $S_{st}$ , высота  $H$  и ширина  $F$  окна магнитной системы, а для учета конструктивного исполнения – коэффициент заполнения площади сечения стержня магнитопровода активной сталью  $\phi_0$  и показатели эффективности использования свойств стали в данной конструкции – удельные потери  $\alpha_0$  и удельная намагничивающая мощность  $\beta_0$ .

Для обмоток силовых распределительных трансформаторов применяются слоевые обмотки из круглого и прямоугольного провода. Однако структура обмотки может быть различной. В зависимости от вида применяемой изоляции, уровня тепловой нагрузки, механических условий, числа обмоток, число концентров обмоток в окне может быть различным, что по существу требует свою ММ для каждого структурного вида и существенно усложняет ММ и процесс, как синтеза, так и анализа вариантов трансформатора.

С этой целью разработана обобщенная ММ обмоток, которая позволяет существенно снизить размерность оптимизационной задачи и учитывать необходимое количество концентров обмоток, а также порядок их размещения в окне путем замены реальных обмоток одной эквивалентной обмоткой.

Эквивалентная обмотка должна соответствовать следующим требованиям:

1. Мощность (полная) эквивалентной обмотки должна быть равна сумме типовых мощностей реальных обмоток.

2. Суммарная площадь сечения проводников эквивалентной обмотки в окне трансформатора должна быть равной сумме поперечных сечений в окне реальных обмоток.

3. Потери в эквивалентной обмотке должны быть равны сумме потерь в реальных обмотках при номинальных токах.

4. Количество вертикальных поверхностей охлаждения реальных обмоток учитывается суммарным коэффициентом эффективности охлаждения. Принимается, что эквивалентная обмотка условно имеет такое же число эффективных охлаждающих поверхностей ( $N_m$ ), что и сумма реальных обмоток.

Поскольку для обмоток существенным является структура витка, форма катушек (концентров), то разработаны базисные ММ эквивалентной обмотки для различных форм сечений стержней (прямоугольной, круглой, эллипсоидной) существующих пространственных и планарных типов магнитопроводов.

Ниже приведены основные зависимости для главных размеров  $n$  - обмоточного трансформатора со слоевыми обмотками, полученные на основе приведения реальных обмоток к одной эквивалентной:

Из условия равенства типовых мощностей эквивалентной и реальных обмоток следует:

$$I_m \cdot w_m = \sum_{i=1}^n I_i \cdot w_i, \quad (2)$$

где  $n$  - число концентров трансформатора,  $I_i$  - номинальный ток  $i$  - той обмотки,  $w_i$ ,  $w_m$  - номинальные числа витков соответственно  $i$  - той и эквивалентной обмоток;

Общий размер изоляционных промежутков поперек "окна" (рис. 1).

$$l_q = 2 \cdot (a_{on} + \sum_{i=2}^n a_{i(i-1)}) + a_{11}, \quad (3)$$

где  $\sum_{i=2}^n a_{i(i-1)}$  - ширина охлаждающего канала между

обмотками  $i$  или  $(i-1)$ , мм;  $a_{in}$  - изоляционный промежуток между стержнем и  $n$  - ой обмоткой;  $a_{11}$  - изоляционный промежуток между 1-ми обмотками разных фаз в „окне” трансформатора.

Масса эквивалентной обмотки

$$G_k = 0.5 \cdot \pi \cdot m \cdot \gamma \cdot L_m \cdot K' \cdot \phi_c \cdot (H - l_0) \cdot (F - l_q) \cdot 10^6, \quad (4)$$

где  $K'$  - коэффициент, учитывающий наличие регулировочных витков в реальных обмотках;  $(F - l_q)$  - радиальный размер эквивалентной обмотки;  $(H - l_0)$  - высота эквивалентной обмотки;  $l_0$  - суммарный размер изоляции от обмотки до ярм,  $L_m$  - средняя длина витка эквивалентной обмотки;

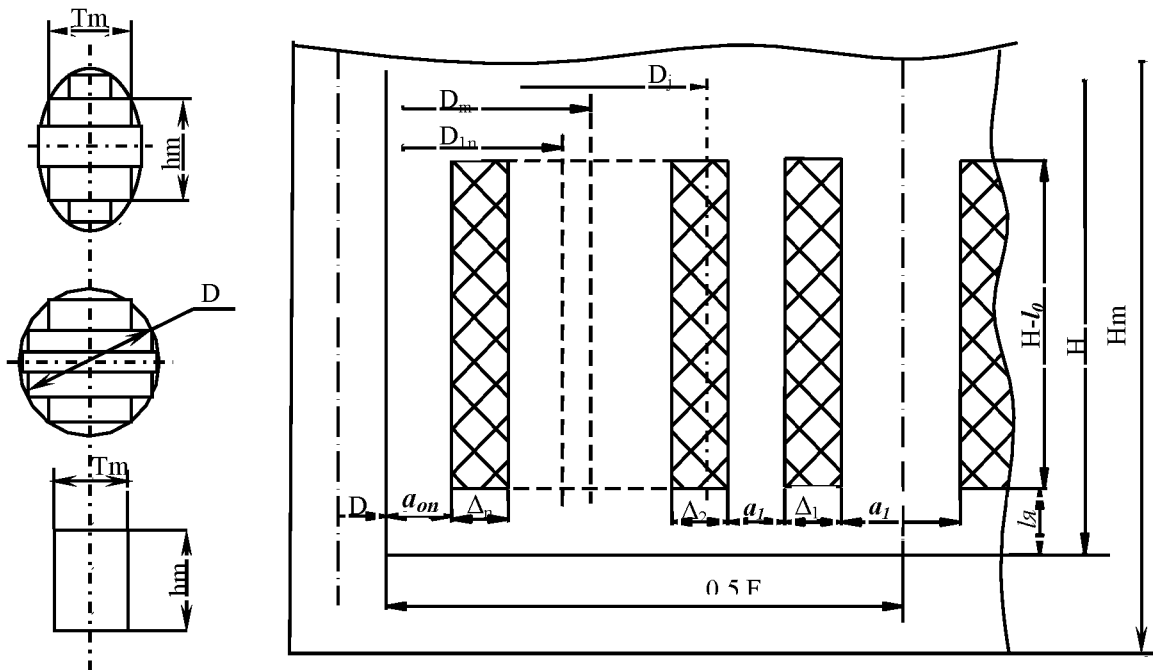


Рис. 1. Основные размеры и изоляционные расстояния трансформатора с планарной магнитной системой

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n K_{pi} \cdot s_i \cdot w_{in} \cdot L_i}{s_1 \cdot w_{1n}} \cdot \frac{j_m}{l_1 \cdot j_1}, \quad (5)$$

где  $L_i$  - средняя длина витка  $i$ -той обмотки;  $s_i$ ,  $s_1$  - сечения витков  $i$ -той и  $l$ -ой обмотки,  $w_1$  - номинальное число витков  $l$ -ой обмотки;  $j_1$  - плотность токов  $l$ -ой обмотки.

Расчетная плотность тока эквивалентной обмотки выражается следующим образом:

$$j_m = \sqrt{\frac{P_{ky} \cdot l_2}{A_{02} \cdot G_k \cdot l_1}}, \quad (6)$$

где  $P_{ky}$  - суммарные основные потери в реальных обмотках трансформатора при номинальных токах. Ширина и высота эквивалентной обмотки выражается через напряжение рассеяния между крайними концами 1 и  $n$ , приведенное к типовой мощности обмотки 1, где  $L_{1n}$  - средняя длина витка канала рассеяния между обмотками 1 и  $n$ ;  $k_R$  - коэффициент Роговского;  $a_p$  - ширина приведенного канала рассеяния между обмотками 1,  $n$ ;

$$U_{s1n} = \frac{I_1 \cdot w_{1i}^2 \cdot k_R \cdot a_p \cdot L_{1n} \cdot f \cdot 10^{-7}}{0.127 \cdot U_1 \cdot (H - l_0)}, \quad (7)$$

где  $U_1$ ,  $I_1$  - номинальные напряжения и ток первой обмотки.

Высота эквивалентной обмотки определяется следующим образом

$$(H - l_0) = \frac{S_n \cdot h}{22210^9 \cdot m \cdot f \cdot \varphi_c \cdot B_c \cdot S_{st} \cdot j_m \cdot \varphi_c \cdot (F - l_q) \cdot K}, \quad (8)$$

где  $\varphi_c$  - коэффициент заполнения проводниковым материалом эквивалентной обмотки;

Радиальный размер эквивалентной обмотки равен сумме радиальных размеров радиальных обмоток

$$(F - l_q) = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \Delta_i = \varphi_c \cdot (F - l_q) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{K_i \cdot K_{pi} \cdot d_i}{\Phi_i}, \quad (9)$$

где  $K_{pi}$  - коэффициент регулировочных витков  $i$ -той обмотки; Зная радиальный размер эквивалентной обмотки можно определить радиальный размер каждой реальной обмотки

$$\Delta_j = \frac{K_{pj} \cdot (F - l_q) \cdot d_j}{2 \cdot \Phi_j \cdot C_j \cdot m_{1j} \cdot l_6} \quad (10)$$

Проектная ММ складывается из 5-ти основных модельных блоков:

- Блока ММ магнитных систем;
- Блока ММ обмоток;
- Блока электромагнитных связей и параметров;
- Блока ММ функциональных характеристик;
- Блока ММ проектных критериев.

Блок ММ магнитных систем состоит из базы модулей ММ магнитных систем, возможных конструктивных исполнений, устанавливающих связь между параметрами магнитных систем и их структурными и конструктивными особенностями, геометрическими размерами и свойствами возможных видов электротехнических сталей.

Блок обмоток включает модули ММ устанавливающие связи между структурой, конструктивными особенностями, размещением, видом обмоточного провода, и такими параметрами как масса, основные и добавочные потери, напряжение короткого замыкания.

ММ электромагнитных связей и параметров устанавливает математические зависимости между геометрическими размерами и электромагнитными, тепловыми параметрами обмоток (напряжением рассеяния, механическими усилиями, удельной тепловой нагрузкой). ММ электромагнитных связей и парамет-

ров предназначена для формирования соотношений геометрических размеров трансформатора в соответствии с требуемой величиной напряжения короткого замыкания.

Блок ММ проектных критериев включает ММ таких проектных критериев как затраты на трансформацию электрической энергии, масса и стоимости активных материалов, сумма потерь. Опыт проектного синтеза трансформаторных устройств показывает, что в обобщенной ММ должны быть базисные модули специфических элементов конструктивных компонент магнитных систем, учитывающие их геометрические особенности (форму сечения стержня, ярм, их размещение в пространстве и т.д.), а также особенности расчета основных и добавочных потерь в стали.

Рассмотренная обобщенная проектная ММ реализована в подсистеме "Аметист-2" [4] для проектного синтеза и оптимизации силовых  $n$ - обмоточных трансформаторов со слоевыми обмотками и магнитными системами с круглой и прямоугольной формой сечения стержней. Подсистема обеспечивает эффективный проектный синтез и оптимизацию этих конструктивных исполнений трансформаторов, а также решение задач проектных исследований при анализе технических решений.

#### ВЫВОДЫ

1. В обобщенной ММ трансформатора используются показатели эффективности ( $\varphi_k, \varphi_0, \alpha_0, \beta_0$ ), использования электротехнической стали и объема, занимаемого компонентами активной части трансформатора (обмотками и магнитной системы). Каждое конструктивно – технологическое решение обеспечивает конкретные (определенные) значения этих показателей. Это позволяет при структурной оптимизации четко учитывать и сопоставлять (через критерии оптимизации) эффективность различных конструктивно – технологических решений.

2. При решении задач проектного анализа (исследовательское проектирование) обобщенная ММ создает возможность формировать варианты начального приближения (облик трансформатора) с любым совместимым сочетанием структур магнитных систем и обмоток и параметрами в зоне их оптимальных значений.

3. Обобщенная ММ трансформатора, обеспечивает быстрое определение основных геометрических размеров и агрегированных значений электромагнитных нагрузок. А также позволяет реализовывать процесс синтеза оптимального трансформаторного устройства по дедуктивному принципу – от общих исходных посылок и обобщенных показателей к степени детализации, необходимой для технической документации на производство трансформатора.

4. Обобщенная ММ позволяет на этапе предварительного анализа определять совместимость исходных технико-экономических требований и средства соответствующей их корректировки.

5. В расчетные коэффициенты критерия входят показатели – цены на электротехнические материалы, на потери холостого хода и короткого замыкания. Это

позволяет оперативно учитывать при проектном анализе динамику изменения экономических условий и обеспечивать требования ресурсо- и энергосбережения в проектируемых трансформаторах.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кустов С.С. Основные направления развития конструкций трансформаторов I - II габаритов // Электрические станции. - 1995. - №8. - С. 62-67.
- [2] Стародубцев Ю.Н., Цырлин М.Б. Основные направления совершенствования электротехнических статей. <http://www.transform.ru/fabrication/ss/osnaproblem/osnapravlen.htm>. - 2003.
- [3] Пуйло Г.В. Построение обобщенных математических моделей трансформаторных устройств // Електромашинобудування та електроустаткування. Респ. Меж від. Наук. техн. збірник. - 1996. В. 48. - С. 89-96.
- [4] Пуйло Г.В., Левин Д.М., Трищенко Е.В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками // Електротехніка і електромеханіка. - 2004. - №1. - С. 86-97.
- [5] Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В., Петриенко С.И. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами // Електротехніка і електромеханіка. - 2002. - С. 86-97.

Поступила 4.10.2004