



УДК 532.517.2:536.255:621.314.2

© 2012

П. Г. Круковский, В. А. Яцевский

Гидродинамические особенности течения и теплообмена во взаимосвязанных каналах силовых масляных трансформаторов

(Представлено академиком НАН Украины А. А. Долинским)

С помощью численного моделирования исследованы тепловые и гидродинамические процессы в системе большого количества взаимосвязанных каналов силовых масляных трансформаторов, что позволило обнаружить эффекты самоорганизации гидродинамических процессов с образованием однонаправленного течения по группам каналов. Эти особенности течения существенным образом влияют на тепловое состояние рассматриваемого оборудования.

Важнейшим фактором обеспечения высокой степени надежности и долговечности силового трансформаторного оборудования является достаточно эффективный отвод части энергии, неизбежно выделяющейся в процессе его работы в виде теплоты в основных элементах конструкции, — в магнитной системе (МС), в обмотках и других деталях активной части (рис. 1). При этом одними из наиболее важных технических параметров, определяющих надежность функционирования и ресурс традиционного силового трансформаторного оборудования, являются уровни температуры наиболее нагретых точек (ННТ) обмоток, превышение которых (более 98 °С) приводит к термической деструкции витковой изоляции. Расположение и значения температур ННТ предсказать достаточно трудно из-за сложной схемы циркуляции масла в многочисленных взаимосвязанных вертикальных и горизонтальных каналах внутри маслonaполненного бака. В связи с этим в энергетике в настоящее время достаточно широко внедряются системы мониторинга и регулирования теплового состояния трансформаторного оборудования в режиме реального времени с помощью опико-волоконных датчиков температуры, которые необходимо устанавливать в этих наиболее нагретых точках.

Применению современного подхода к обоснованному расположению таких датчиков и выявлению особенностей, присущих теплогидравлическим процессам в рассматриваемых системах, и посвящена данная работа. Из-за сложности, дороговизны и продолжительности экспериментальных исследований для решения описанных проблем в последнее время все чаще применяют методы так называемого CFD (Computational Fluid Dynamic) компьютер-

ного моделирования взаимосвязанных теплогидравлических процессов [1–3] в трансформаторном оборудовании, поскольку традиционные инженерные методы не обеспечивают необходимой точности таких расчетов. Конструкция современных высоковольтных мощных силовых трансформаторов (см. рис. 1) достаточно сложная [1–3] и состоит из большого количества неоднородных по теплофизическим характеристикам деталей сложной геометрии (до 100 отдельных узлов). Но все же основная часть конструктивных элементов имеет цилиндрическую симметрию относительно оси стержня каждой фазы трансформатора. Поэтому в настоящей работе анализ теплогидравлических процессов в каналах обмоток выполняется в двухмерной осесимметричной постановке при естественной системе конвективного охлаждения, которая является наиболее сложной для расчетного анализа положения ННТ. В мощных силовых трансформаторах применяют конструкции обмоток, в которых отдельные катушки разделены горизонтальными каналами, количество которых доходит до 400 (см. рис. 1).

В свою очередь, обмотки между собой разделены элементами маслосборной изоляции, которые образуют подсистему вертикальных каналов. Размеры как вертикальных, так и горизонтальных каналов находятся, как правило, в диапазоне 3...12 мм. Для таких трансформаторов теплоотвод через стенки маслосборного бака не может обеспечить приемлемый уровень температур, поэтому к баку присоединяют систему внешнего охлаждения масла, которая может функционировать как в режиме естественной, так и смешанной (естественной плюс вынужденной) конвекции. При этом охлажденное масло от внешних радиаторов поступает в нижнюю часть бака, поднимается за счет силы Архимеда (а также, при необходимости, и насосов) по вертикальным и горизонтальным каналам в обмотках и вокруг них, формируя, таким образом, допустимое температурное поле конструктивных элементов оборудования (см. рис. 1 и рис. 3).

Физическая и математическая модели процессов гидродинамики и теплообмена принимались следующими. Предполагалось, что в направлении оси φ цилиндрической системы координат (r, z, φ) зависимые переменные (поля температур, скоростей, давлений) не изменяются. Таким образом, в осесимметричной постановке некоторые специфические особенности обмоток реальных трансформаторов, такие как наличие дистанцирующих прокладок и прошивающих их реек, строго и корректно учесть невозможно. Но, как показали специальные расчеты на трехмерных методических тестовых моделях, влияние этих отдельных конструктивных деталей на тепловое состояние обмоток незначительное.

Математическая модель взаимосвязанных процессов гидродинамики и теплообмена в рассматриваемой системе состоит из полных уравнений Навье–Стокса (сохранения импульса) для вязкой несжимаемой жидкости, сохранения массы (уравнения неразрывности) и уравнения сохранения энергии

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + 2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{2\mu}{r} \left(\frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \right); \\ \rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &= \\ &= \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \right) + \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right); \end{aligned} \quad (1)$$

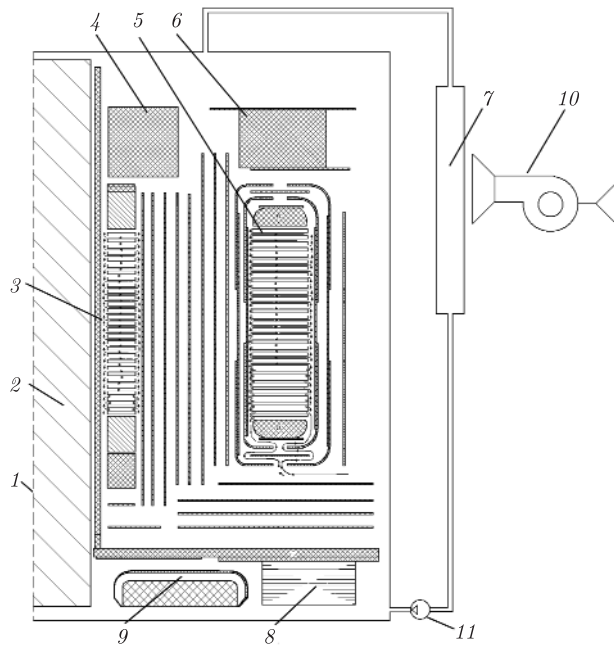


Рис. 1. Схема силового трансформатора мощностью 210 МВ·А: 1 — ось симметрии; 2 — стержень магнитной системы; 3 — обмотка низшего напряжения (НН); 4 — прессующее кольцо над обмоткой НН; 5 — обмотка высшего напряжения (ВН); 6 — прессующее кольцо над обмоткой ВН; 7 — радиатор подсистемы внешнего охлаждения; 8 — шунт под обмоткой ВН; 9 — шунт под обмоткой НН; 10 — вентилятор; 11 — масляный насос

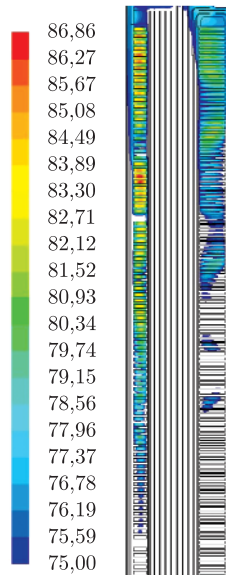


Рис. 3. Поле температур ($^{\circ}\text{C}$) в интервале 75,0–86,86 $^{\circ}\text{C}$ в области обмоток НН и ВН

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial\tau} + \frac{\partial(\rho V_r)}{\partial r} + \frac{\rho V_r}{r} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v(r, z). \quad (3)$$

Здесь V_r , V_z — компоненты вектора скорости по направлениям радиальной r и осевой z координат; P — скалярное поле давления; ρ — плотность; C_p — теплоемкость; μ — коэффициент динамической вязкости охлаждающей жидкости; g — ускорение силы тяжести; τ — время. Переносные и термодинамические характеристики охлаждающей жидкости в работе являлись функциями температуры в соответствии с экспериментальными данными, приведенными в работе [4].

Исходными данными к тепловому расчету, кроме общих детальных геометрических параметров конструкции, являются также температура окружающей среды, детальные данные по тепловым нагрузкам (тепловыделениям) отдельных катушек обмоток, а для каждой из обмоток размеры вертикальных и межкатушечных горизонтальных каналов, толщина изоляционных цилиндров и коэффициенты их теплопроводности, параметры внешней системы охлаждения для каждого вида нагрузки.

В области катушек обмоток, металлических элементов МС и стенок бака источники тепловыделения Q_v задавались по результатам предварительного электродинамического расчета. В охлаждающей жидкости (трансформаторном масле) внутри бака $Q_v = 0$, а в области теплосбрасывающей части модели внешнего контура (охлаждающие радиаторы, рис. 1) задавалась отрицательная мощность источников (таким образом моделировался сброс теплоты во внешнюю среду)

$$Q_v = -k \Delta t_{\text{МС}}^{1,2}. \quad (4)$$

Эмпирический коэффициент k и показатель степени при перепаде средней температуры масла в радиаторах над температурой окружающей среды $\Delta t_{\text{МС}}$ в уравнении (4) определялись из экспериментальных данных.

В качестве начальных условий компоненты вектора скорости охлаждающей жидкости задавались равными нулю, а температура всех элементов системы равнялась температуре окружающей среды.

На всех твердых поверхностях, контактирующих с маслом, заданы условия прилипания и непротекания, т. е. равенство нулю компонентов скорости. Уравнение энергии (3) справедливо для описания температурных полей как для жидкого охлаждающего масла, так и твердотельных деталей конструкции, для которых компоненты векторной функции скорости приравниваются нулю. При этом на границе раздела между охлаждающей жидкостью и твердотельными деталями задаются условия сопряжения, т. е. равенство температур и тепловых потоков.

На внешней поверхности маслонаполненного бака заданы смешанные условия конвективного теплообмена с внешней средой (коэффициент теплоотдачи и температура внешней среды) и лучистого теплообмена.

Система уравнений (1)–(4) решалась с помощью неявного конечнообъемного метода в программной среде ANSYS FLUENT. В компьютерной модели двухфазного силового трансформатора мощностью 210 МВ · А рассматривалась только одна фаза, состоящая из двух концентрических обмоток. В обмотке низшего напряжения было 114 катушек, разделенных горизонтальными каналами разной высоты, а обмотка высшего напряжения

состояла из 156 катушек. Расчетная область включала как бак с охлаждающей жидкостью и основными конструктивными элементами в нем, так и внешний контур охлаждения (см. рис. 1). Расчеты проводились для тепловыделений в катушках обмоток и других проводящих деталях, характерных для номинального режима функционирования рассматриваемого оборудования. Расчеты производились на четырехпроцессорном компьютере при использовании распараллеливания с помощью декомпозиции области решения.

Известно, что при конвективном теплообмене как интегральные, так и локальные характеристики теплообмена определяющим образом зависят от характера и структуры течения жидкости. Картина температурных и гидродинамических полей меняется в зависимости от режима охлаждения трансформаторного оборудования и в течение нестационарного процесса. При этом на разных этапах нестационарного процесса наблюдаются существенные как количественные, так и качественные отличия. Направление циркуляции в отдельных каналах на протяжении нестационарного процесса может неоднократно изменяться на противоположное, что было обнаружено с помощью численного моделирования.

Численное решение задачи в сопряженной постановке относительно полей температур, давлений и скоростей дает весьма сложную структуру течения не только в каналах охлаждения, но и внутри маслonaполненного бака трансформатора. Основной особенностью конвективных течений при термической гравитационной конвекции в распределенной взаимосвязанной системе большого количества каналов внутри маслonaполненного бака является одновременное присутствие локальных зон с различной картиной течения. Детальный характер и картина течения, его интенсивность определяются всей совокупностью конструктивных и режимных параметров, иными словами, картина течения определяется процессом нелинейного взаимодействия скалярных полей давлений, температур и векторного поля скоростей. Дополнительным осложняющим фактором является наличие достаточно сложной многосвязной геометрии области решения (см. рис. 1), т. е. заполненного маслом пространства внутри бака, в котором происходит циркуляция масла.

При численном моделировании была обнаружена сложная структура течения в каналах охлаждения (см. рис. 2). На рис. 2, *а* приведена качественная схема, объясняющая особенности течения в рассматриваемом случае, на рис. 2, *б* — распределение перепада полного давления посредине обмотки высшего напряжения (ВН), а на рис. 2, *в* — распределение радиальной компоненты вектора скорости обмотки ВН в зависимости от безразмерной высоты обмотки. Как видно из результатов расчета, по высоте обмотки образовалось 11 групп каналов (приблизительно по 14–15 каналов в группе), в которых характер течения охлаждающей жидкости (масла) имеет преимущественно одинаковое направление — от оси симметрии трансформатора на периферию обмотки в сторону боковой стенки бака или в противоположном направлении. Между отдельными группами каналов имеются каналы, в которых радиальная компонента вектора скорости существенно меньше, чем в центральных каналах группы (застойные зоны). С учетом весьма значительной высоты реальной обмотки (около 3 м) на рис. 2, *г* в увеличенном масштабе представлен отдельный фрагмент этого распределения радиальной компоненты векторного поля скоростей в выбранном диапазоне по высоте (четвертая группа каналов при отсчете снизу обмотки). Преимущественное течение охлаждающей жидкости из внешнего вертикального охлаждающего канала к внутреннему (даже при одинаковой их ширине) ранее качественно наблюдали в натурном эксперименте на специальных физических моделях А. Б. Швидлер и др. [5], что подтверждает возможность реализации описываемого нами характера течения масла в каналах, полученного уже в вычислительном эксперименте. Эти результаты позволяют на основании полученных де-

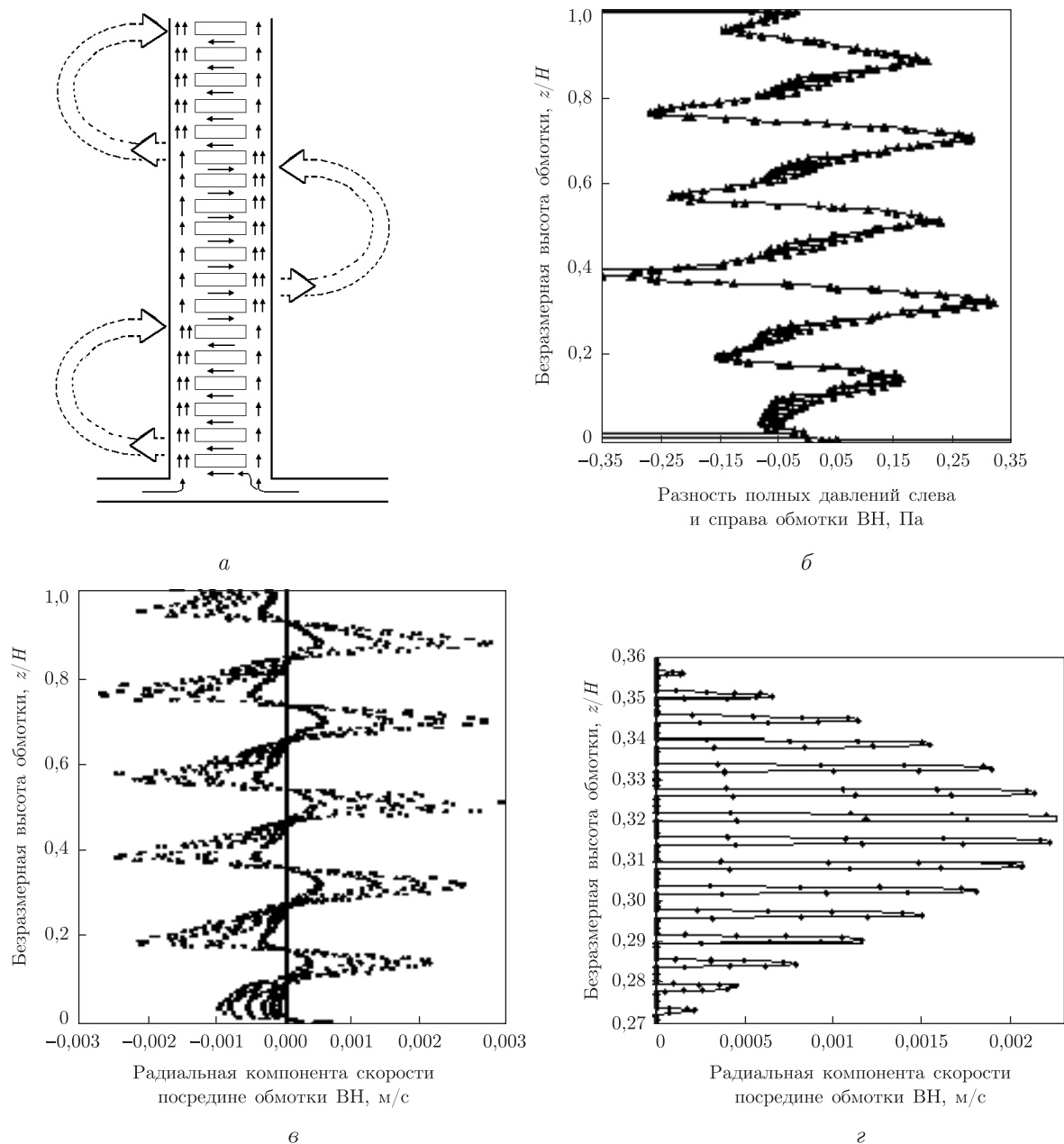


Рис. 2. Гидродинамика процессов в горизонтальных каналах: *a* — схема движения масла по каналам; *б* — распределение перепада полного давления по высоте обмотки ВН с 1-й (внизу) по 156-ю катушку (вверху); *в* — распределение радиальной компоненты вектора скорости по относительной высоте обмотки ВН; *z* — распределение радиальной компоненты вектора скорости по высоте обмотки ВН с 42-й (внизу) по 57-ю катушку (вверху)

тальных количественных полей температур, давлений и скоростей наблюдать и объяснять такое движение охлаждающего масла в каналах.

Образование зигзагообразного течения охлаждающей жидкости в горизонтальных каналах обмоток (рис. 2) можно объяснить взаимодействием полей скорости и возникающего при движении поля давления, которые в результате интенсивного тепловыделения в катуш-

ках и нагрева масла, а также влияния архимедовой силы сначала инициируют движение в одном направлении горизонтальных каналов, а после достижения определенного уровня градиента давления в результате действия закона сохранения массы возникает торможение образовавшегося коллективного движения и инверсия его направления.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в совокупности каналов формируется макроструктура течения в последовательных группах однотипных каналов (от 3 до 15 каналов в зависимости от режима охлаждения, мощности и распределения объемных тепловыделений). Направление течения в соседних группах каналов должно быть противоположным, что определяется законом сохранения массы (уравнением неразрывности).

При этом, как видно из рис. 2, *г*, максимальное значение радиальной компоненты вектора скорости в рассматриваемой группе каналов $\approx 2,2 \cdot 10^{-3}$ м/с и имеет место приблизительно в среднем канале группы. В остальных каналах группы максимальное значение скорости уменьшается приблизительно по параболическому закону. В крайних каналах величина радиальной компоненты вектора скорости на порядок меньше ($1,4 \cdot 10^{-4} \div 2,1 \cdot 10^{-4}$ м/с) по сравнению с центральным, и процесс теплопереноса в них происходит преимущественно за счет механизма теплопроводности. Качественно аналогичный характер течения наблюдается и в остальных группах каналов с одинаковым направлением радиальной компоненты вектора скорости.

На рис. 3 представлено неоднородное поле температур в интервале 75,0–86,86 °С в области обмоток НН и ВН силового трансформатора мощностью около 210 МВ · А. Поле температур в катушках обмоток при возникновении рассматриваемого характера течения теряет осевую симметрию, что связано со сквозным течением охлаждающего масла в выделенном направлении по радиусу катушек, как это представлено на рис. 3. Из анализа распределения температур в катушках обмоток можно определить зоны максимальных температур. В случае превышения максимально допустимых уровней температур необходимо разработать предложения по изменению элементов конструкции с целью их уменьшения. В горизонтальных каналах с максимальными значениями скоростей масла значения коэффициентов теплоотдачи составляют около 100 Вт/(м² · К), в то время как в крайних каналах (области застойных зон) значения коэффициентов теплоотдачи уменьшаются до ~ 50 Вт/(м² · К). В областях, примыкающих к внутреннему и наружному вертикальному охлаждающему каналу, в результате образования или разрушения пограничных слоев на боковых вертикальных поверхностях катушек разность локальных температур между поверхностью катушки и маслом минимизируется, а коэффициент теплоотдачи значительно увеличивается.

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить особенности структуры потока охлаждающей жидкости при течении в системе большого количества взаимосвязанных каналов маслonaполненных силовых трансформаторов. Установлено, что в совокупности достаточно большого количества горизонтальных межкатушечных каналов может происходить самоорганизация гидродинамических процессов с образованием однонаправленного течения по группам каналов, что существенным образом влияет на тепловое состояние рассмотренного оборудования, смещая области максимальных температур по высоте обмотки и в направлении радиальной компоненты вектора скорости.

1. Lee J. Y., Lee S. W., Woo J. H., Hwang I. S. CFD analyses and experiments of a winding with zig-zag cooling duct for a power transformer // CIGRE. Internat. Conf. on Large High Voltage Electric Systems. – Paris, 22 th – 27th August, 2010. – Report Nr. A2-310, in Proc. 43th Session, sec. A2, 2010. – P. 1–8.
2. Picher P., Torriano F., Chaaban M. et al. Optimization of transformer overload using advanced thermal modeling // Ibid. – Report Nr. A2-305, in Proc. 43th Session, sec. A2, 2010. – P. 1–10.

3. Круковский П. Г., Яцевский В. А., Конторович Л. Н. и др. Методические подходы к CFD-моделированию тепловых режимов силовых масляных трансформаторов // Промышл. теплотехника. – 2008. – 30, № 6. – С. 57–66.
4. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Пер. с венг. М. А. Бики / Под ред. Г. Е. Тарле. – Москва: Энергия, 1980. – 208 с.
5. Швидлер А. Б., Михайловский Ю. А., Чередниченко Г. Б., Клименко Л. А. Теплоотдача внутренних катушечных обмоток трансформаторов // Электротехника. – 1980. – № 7. – С. 19–21.

*Институт технической теплофизики
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 18.04.2012

П. Г. Круковский, В. А. Яцевский

Гідродинамічні особливості течії та теплообміну у взаємопов'язаних каналах силових масляних трансформаторів

За допомогою чисельного моделювання досліджено теплові та гідродинамічні процеси в системі великої кількості взаємопов'язаних каналів силових масляних трансформаторів, що дозволило виявити ефекти самоорганізації гідродинамічних процесів з утворенням однопровленої течії по групах каналів. Ці особливості течії істотно впливають на тепловий стан розглянутого устаткування.

P. G. Krukovsky, V. A. Yatsevsky

The hydrodynamic peculiarities of a flow and the heat transfer in the interconnected channels of oil power transformers

With the help of numerical simulation, we have investigated the thermal and hydrodynamic processes in a system of a great number of interconnected channels of oil power transformers, which allowed us to reveal the self-organization effects in hydrodynamic processes with the formation of a unidirectional flow in channel groups. These peculiarities of the flow substantially affect the thermal state of the considered equipment.