

*к.т.н. Кухарев А. Л.*  
(СУНИГОТ УИПА г. Стаханов, Украина,  
[alex.kuharev@mail.ru](mailto:alex.kuharev@mail.ru))

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТИРИСТОРНО-КОНТАКТОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Розглянуті схеми та алгоритми перемикання тиристорно-контакторних пристроїв регулювання напруги, що розроблені для електронічних трансформаторів. Проведено моделювання процесів розподілу струму між дугогасильним контактом та тиристорним комутатором при їх комутаціях в трансформаторному маслі.*

**Ключові слова:** *пристрій регулювання напруги, тиристорний комутатор, електрична дуга.*

*Рассмотрены схемы и алгоритмы работы тиристорно-контакторных устройств регулирования напряжения, разработанные для электропечных трансформаторов. Проведено моделирование процессов распределения тока между дугогасящим контактом и тиристорным коммутатором при их коммутациях в трансформаторном масле.*

**Ключевые слова:** *устройство регулирования напряжения, тиристорный коммутатор, электрическая дуга.*

**Постановка проблеми.** Режимы работы мощных электротехнологических установок, таких как дуговые или ферросплавные печи, требуют широкого диапазона регулирования напряжения, которое, как правило, осуществляется с помощью переключающих устройств электропечных трансформаторов. Традиционно устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) трансформаторов выполняются в виде четырех узлов: избиратель, осуществляющий выбор рабочего ответвления регулировочной обмотки обесточенными подвижными контактами, контактор, осуществляемый переключение отводов под нагрузкой с дугогашением в масле или в вакууме, токоограничивающий резистор или реактор, ограничивающий ток в замкнутом контуре регулировочной секции, а также приводное устройство [1].

В связи с большим числом переключений, достигающих нескольких сотен в сутки, частыми перегрузками и достаточно большим време-

нем горения дуги на контактах (0,03–0,06 с за одну коммутацию [2]), условия работы переключающих устройств в электропечных трансформаторах являются достаточно тяжелыми, что существенно сокращает их ресурс. При этом, поддержание их в работоспособном состоянии требует значительных эксплуатационных затрат, связанных с заменой дугогасительных контактов и трансформаторного масла.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для повышения ресурса переключающих устройств трансформаторов были предложены тиристорно-контакторные устройства (ТКУ) [3–5], в которых тиристорные коммутаторы (ТК) шунтируют дугогасящие контакты (ДК), что позволяет существенно повысить электрическую износостойкость и возможность их использования в существующих электропечных трансформаторах без серьезных конструктивных изменений последних [2].

В таких ТКУ сочетание полупроводниковых приборов с механическими контактными системами требует четкого согласования коммутаций ТК с коммутациями механических контактов, поэтому необходимым условием их надежной работы является тщательный анализ данных коммутационных процессов. Особенно важными являются процессы распределения тока между тиристорами и дугогасящими контактами при включении и выключении ТКУ, которые определяют время горения дуги на контактах и в целом эффективность тиристорно-контакторных систем в части их электрической износостойкости [6].

**Целью данной статьи** является усовершенствование методики расчета режимов работы тиристорно-контакторных устройств регулирования напряжения электропечных трансформаторов, а также моделирование процессов распределения тока между контактной и тиристорной ветвями при переключении ступеней напряжения.

#### **Материалы и результаты исследований.**

На рисунке 1 приведены схемы тиристорно-контакторных устройств, встраиваемых в однофазные электропечные трансформаторные агрегаты систем электропитания ферросплавных печей [4, 5]. Каждый трансформаторный агрегат состоит из главного (ГТ) и вольтодобавочного (ВДТ) трансформаторов с регулировочной обмоткой (РО), соединенной с первичной обмоткой ВДТ в замкнутый контур, в который включена конденсаторная батарея продольной компенсации реактивной мощности (УПК). Обмотки НН ГТ и ВДТ включены между собой последовательно и присоединены к электродам печи. Таким образом, реализуется косвенный способ регулирования напряжения, при котором устройства РПН встраиваются в цепи между отводами РО и первичной обмоткой ВДТ [1].

Отличием предложенных схем на рисунках 1.а и 1.б является способ построения ТКУ. Тиристорно-контакторное устройство на рисунке

1.а выполнено на основе контактора с мостиковым дугогасительным контактом и содержит контакты избирателя И1, И2, предызбиратель Пр, токоограничивающий реактор Р и контактор, состоящий из мостикового дугогасящего контакта ДК и основных контактов КО1, КО2. Параллельно ДК включена цепь из последовательно соединенных тиристорного ключа ТК и дополнительного контакта К<sub>д</sub>.

На рисунке 1.б ТКУ выполнено на базе контактора с двумя вакуумными дугогасительными камерами (ВДК). Между первыми выводами ВДК и выводами реактора установлены дополнительные контакты К<sub>д1</sub>, К<sub>д2</sub>, а ТК включается между соединительными точками вакуумных камер и дополнительных контактов.

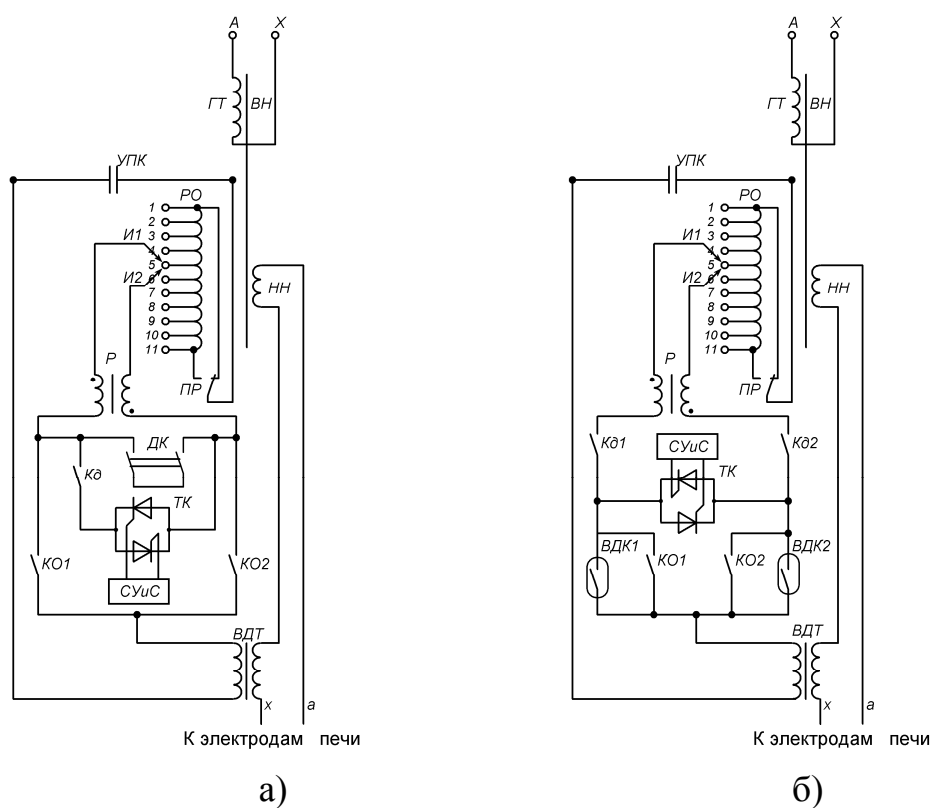


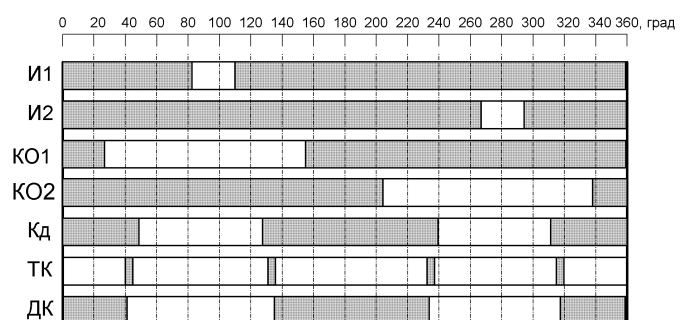
Рисунок 1 – Функциональная схема электропечных трансформаторов с ТКУ: а) – на базе контактора с дугогашением в масле; б) – на базе контактора с ВДК.

В данных ТКУ система управления и синхронизации (СУиС) обеспечивает формирование управляющих импульсов необходимой формы и длительности и подачу их на управляющие электроды синхронно перед замыканием ДК или ВДК и снятие импульсов управления перед размыканием К<sub>д</sub>.

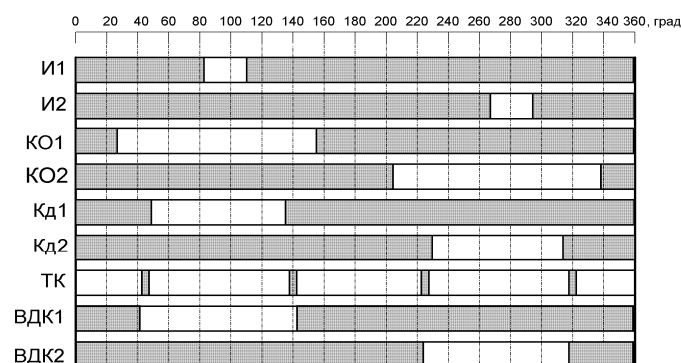
Предложенные схемотехнические решения ТКУ, как будет показано далее, позволяют сократить времена горения дуги на ДК и, тем са-

мым, повысить ресурс по электрической износостойкости устройств РПН. В электропечных трансформаторах, содержащих ВДК (рис. 2.б), коммутация тока тиристорными ключами позволяет исключить перенапряжения, возникающие при явлениях среза тока вакуумными камерами. Введение в схему дополнительных контактов  $K_{д1}$ ,  $K_{д2}$  позволяет предотвратить повреждения избирателя при отказах вакуумных камер, что имело место при эксплуатации существующих устройств РНОР-20 электропечных трансформаторов ЭОЦНК-21000/10.

Алгоритмы работы предложенных ТКУ приведены на рисунке 2.



а)



б)

Рисунок 2 – Алгоритмы переключения ТКУ:

а) – в контакторе с мостиковым ДК; б) – в контакторе с ВДК.

Как видно из рисунков, в рассматриваемых ТКУ процесс перехода из одной ступени напряжения на другую представляет собой ряд интервалов времени, в течение которых имеется определенное сочетание проводящих и непроводящих состояний ТК с различными положениями механических контактов. Рассмотрим времена между коммутациями ДК (ВДК), ТК и  $K_{д}$ .

При замыкании ДК или ВДК предварительное замыкание дополнительного контакта  $K_{д}$  и подача сигналов управления на ТК должны производиться за временной промежуток, составляющий не менее вре-

мени включения структуры тиристоров в проводящее состояние, что можно записать в следующем виде:

$$t_{вкл.кд}(t_{умн.тк}) > t_{gt}, \quad (1)$$

где  $t_{gt}$  – время включения тиристора, определяемое по каталожным данным.

При размыкании ДК или ВДК минимальное время горения дуги на контактах будет обеспечено при последующем выключении ТК через время, необходимое перехода тока в тиристорную ветвь и время, необходимое для восстановления электрической прочности контактного промежутка:

$$t_{выкл.тк} > t_{к-т} + t_{вэп}, \quad (2)$$

где  $t_{к-т}$  – время перехода тока в ТК;

$t_{вэп}$  – время, необходимое для восстановления электрической прочности контактного промежутка.

Бездуговое размыкание дополнительного контакта  $K_d$  будет обеспечено, если оно будет произведено через время  $t_{выкл.кд}$  после выключения ТК:

$$t_{выкл.кд} > t_q + \frac{T_u}{2}, \quad (3)$$

где  $t_q$  – время выключения тиристоров, определяемое по каталожным данным;

$T_u$  – период питающего напряжения.

Следует отметить, что в ТКУ наибольшие значения параметров коммутации наблюдаются при включении ТК на положение «мост» и при выключении ТК для разрыва «моста» [2]. В первом режиме действующее значение тока через тиристоры равно геометрической сумме половины тока нагрузки, протекающего через РО и циркулирующего тока, протекающего по обеим ветвям реактора. Во втором режиме напряжение, прикладываемое к тиристорам, определяется геометрической суммой напряжения ступени и падения напряжения на реакторе. Таким образом, комплексы действующих значений рабочего тока и рабочего напряжения на ТК можно определить по следующим выражениям:

$$\dot{I}_{mk} = \frac{\dot{U}_{cm}}{Z_p} + \frac{\dot{I}_{po}}{2}, \quad (4)$$

$$\dot{U}_{mk} = \dot{U}_{cm} + \frac{\dot{I}_{po}}{2} Z_p, \quad (5)$$

где  $U_{cm}$  – напряжение регулировочной ступени;

$I_{po}$  – ток регулировочной обмотки электропечного трансформатора;

$Z_p$  – сопротивление реактора.

Для анализа процессов перераспределения тока между тиристорной и контактной ветвями, а также времени горения дуги на контактах нами была разработана компьютерная модель в пакете Matlab /Simulink, структурная схема которой представлена на рисунке 3.

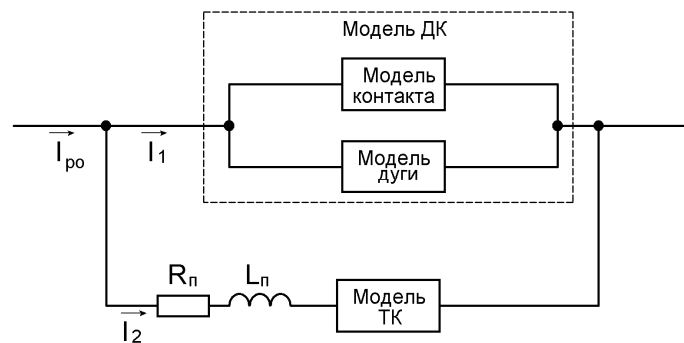


Рисунок 3 – Структурная схема компьютерной модели ТКУ

На данном этапе моделировались процессы коммутации в ТКУ, схема которого показана на рисунке 1.а. В этом ТКУ дугогасящей средой является трансформаторное масло, а ДК конструктивно представляет собой контакт мостикового типа, при размыкании которого между подвижной частью и неподвижными контакт-детальями образуется двойной разрыв. При разработке модели считалось, что коммутация контакт-деталей обоих контактов ДК происходит синхронно, и условия горения дуги на первом и втором его разрывах одинаковы. В связи с этим, модель мостикового ДК структурно выполнена в виде модели одного контакта, параллельно которой присоединена модель дуги. В качестве модели контакта использовался блок «Ideal Switch», а модель дуги была реализована в блоке «Cassie arc model», которая реализует уравнение баланса энергии электрической дуги, предложенной Касси, и основанной на допущении об однозначной зависимости сопротивления дуги от ее теплосодержания [7, 8].

В общем виде уравнение Касси имеет вид [7, 8]:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right), \quad (6)$$

где  $g$  – проводимость дуги;

$u$  – напряжение на дуге;

$\Theta$  – постоянная времени дуги;

$U_c$  – постоянная напряжения дуги.

Параметры модели дуги определялись нами по осциллограммам тока и напряжения на дуге, снятых во время экспериментальных исследований коммутационных процессов в устройстве РПН РНО-20-625/35 электропечного трансформатора ЭОЦНК-21000/10 мощностью 9200 кВА напряжением 10/0,23-0,14 кВ, установленного на печи № 6 Стахановского завода ферросплавов [2]. Постоянная напряжения дуги  $U_c$  определялась нами как суммарное напряжение на двух разрывах ДК в начальный момент разведения контактов и в нашем случае составила 27 В. Постоянная времени дуги  $\Theta$  определялась по методике [7, 8] по величине временного промежутка, соответствующего подкасательной к кривой напряжения дуги в момент его перехода через нулевое значение, и в нашем случае составила 140 мкс. Следует отметить, что появление дуги в трансформаторном масле приводит к образованию вокруг дуги газового пузыря, состоящего из водорода, ацетилена, метана и других продуктов разложения масла. В связи с этим, постоянная времени дуги, горячей в трансформаторном масле, на порядок больше, чем аналогичные значения в вакууме или элегазе [7, 8].

Структура модели ТК разрабатывалась на основе схемы тиристорного коммутатора, изготовленного совместно с Украинским научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом трансформаторостроения. Данный ТК выполнен на базе встречно-параллельно включенных тиристоров Т-353-800-32, причем в каждой параллельной ветви ТК установлено по два последовательно включенных тиристора. В качестве модели тиристоров использовались блоки «Detailed Thyristor». Также в модели учитывались активное сопротивление и индуктивность соединительных проводов  $R_{п}$ ,  $L_{п}$ . В данных расчетах суммарная индуктивность тиристорной ветви составила 3 мкГн, при этом считалось, что в процессе коммутации данная величина остается постоянной.

При моделировании параметры нагрузки устанавливались таким образом, чтобы моделируемый ток соответствовал максимальному току через ТК, рассчитанному по выражению (4) для трансформатора

ЭОЦНК-21000/10. Момент включения и выключения ДК выбирался по условию коммутации вблизи максимума тока.

На рисунке 4 показаны результаты моделирования перехода тока с ДК в тиристорную ветвь при отключении ТКУ (разрыв положения «моста»). Принятые обозначения  $I_1$ – ток ДК,  $I_2$ – ток ТК,  $U_d$ – напряжение на ДК.

Как видно из рисунка, перед разведением контактов через ДК протекает ток  $I_1=600e^{i61}$  А. В момент разведения контактов (0,018 с) напряжение на них начинает увеличиваться, что свидетельствует о развитии дугового процесса. Через 800 мкс напряжение на дуге достигает своего максимального значения 9,9 В. Под действием напряжения дуги происходит включение тиристоров, при этом напряжение на ДК уменьшается до величины падения напряжения на двух последовательно включенных тиристорах одной из параллельных ветвей ТК (около 3 В), и ток приблизительно через 800 мкс с момента максимума  $U_d$  полностью переходит в цепь ТК.

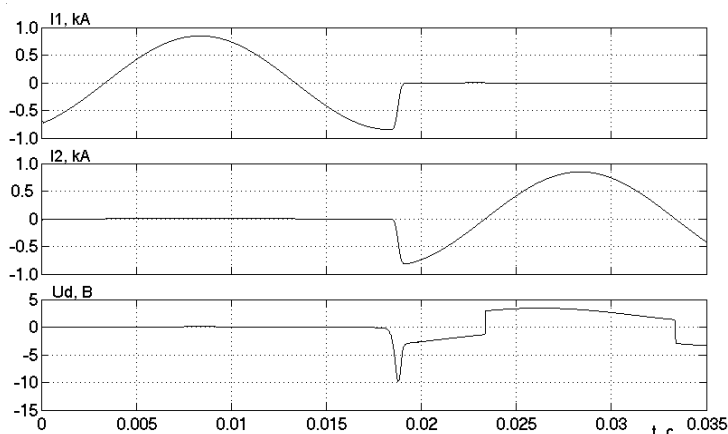


Рисунок 4 – Результаты моделирования перехода тока из ДК в тиристорную ветвь

Так как разработанная модель дуги рассчитывает суммарное напряжение на двух разрывах мостикового ДК (9,9 В), можно предположить, что максимальное напряжение на одном разрыве ДК будет в два раза меньше (примерно 5 В). При этом, как отмечено в [9], существование дуги на размыкающихся силовых контактах возможно и при малых значениях напряжения, не превышающих напряжение зажигания дуги. В нашем случае время существования дугового разряда на контактах ДК оценивалось по времени перехода тока в тиристорную ветвь, т.е. по временному промежутку от момента размыкания ДК до момента уменьшения тока ДК до нуля и составило 1600 мкс. При этом следует отметить, что примерно половину этого времени занимает процесс на-



растания напряжения на дуге, что можно объяснить значительной инерционностью термодинамических процессов образования дуги в трансформаторном масле.

Не менее важным для тиристорно-контакторных аппаратов является процесс перехода тока из тиристорной ветви в ветвь ДК при его включении на положение «мост» (рисунок 5). На данном этапе введем допущение, что замыкание ДК происходит без вибрации.

Из приведенных данных следует, что перед замыканием контактов ток протекает по ветви с тиристорами, падение напряжения на которых составляет 3,4–1,4 В. В момент замыкания контактов (0,018 с) напряжение на ТК скачкообразно уменьшается до нуля. После этого наблюдается процесс одновременного спада тока с тиристоров и нарастания тока в контактной ветви. Полное время спада тока ТК до нуля и, соответственно, время его перехода в ветвь ДК составило 1200 мкс.

Из сравнения результатов моделирования следует, что время перехода тока из ДК в тиристоры примерно в 1,3 раза превышает соответствующее время при переходе тока из ТК в контактную ветвь.

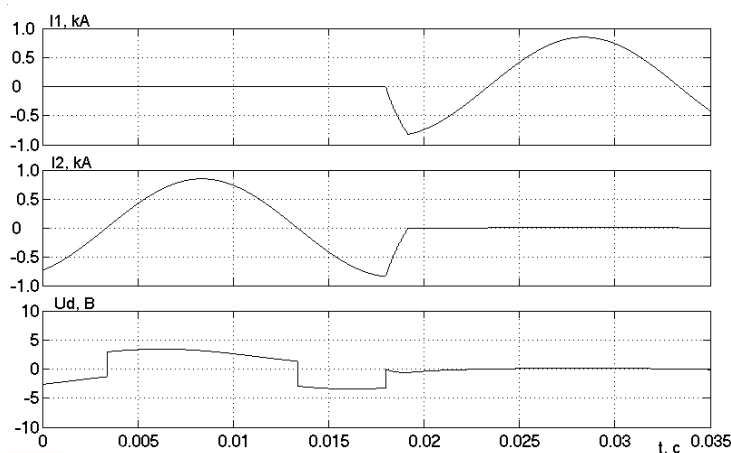


Рисунок 5 – Результаты моделирования перехода тока из тиристоров в цепь ДК

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, приведенных в [2, 6], показало их удовлетворительную сходимость.

### Выводы

1. Предложенные схемотехнические решения ТКУ для устройств РПН электропечных трансформаторов позволили совместно с Украинским научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом трансформаторостроения разработать и внедрить опытные образцы таких устройств в действующие системы электропитания ферросплавных печей Стахановского завода ферросплавов.

2. На основе анализа режимов переключения усовершенствована методика расчета ТКУ с токоограничивающими реакторами. Выведены формулы времен включения и выключения ТК для обеспечения надежной синхронизации коммутаций тиристором и механических контактов.

3. С помощью разработанной компьютерной модели тиристорно-контакторного устройства проведены исследования процессов перехода тока из тиристором в ветвь ДК при включении ТКУ и из ДК в тиристоры при его отключении с учетом процессов гашения дуги в трансформаторном масле. Время перехода тока из ДК в ветвь ТК составило 1600 мкс, а время перехода тока из тиристором в ветвь ДК составило 1200 мкс.

4. На основе полученных данных показано, что применение ТКУ позволило снизить время горения дуги на контактах при их размыкании не менее чем в 20 раз. Необходимо отметить, что при переходе тока в тиристорную ветвь напряжение на дуге достигает не более 40 % своего напряжения зажигания. В связи с этим, перспективной дальнейших исследований является анализ явления зажигания дуги при низких значениях напряжения и оценка электрической эрозии контактов в данных ТКУ.

### **Библиографический список**

1. Анишин В.Ш. Трансформаторы для промышленных электропечей. / В.Ш. Анишин, В.Г. Крайз, В.Г. Мейксон. – М.: Энергоиздат, 1982. – 295 с.

2. Кухарев А.Л. Исследование коммутационных процессов в устройствах регулирования напряжения электропечных трансформатором систем электропитания ферросплавных печей / А.Л. Кухарев, Л.А. Недвига // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2006. – № 1(13). – С. 91–95.

3. Rogers D.J. A hybrid diverter design for distribution level on-load tap changers / D.J. Rogers, T.C. Green // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Atlanta, 12-16 Sept. 2010. – IEEE, 2010. – P. 1493 – 1500.

4. Пат. 18730 Украина, МПК6 H02P13/00, H01F29/00, G05F1/16. Тиристорно-контакторний пристрій для перемикання відводів регулювальної обмотки трансформатора під навантаженням / Кухарев О. Л.; заявитель и патентообладатель Кухарев Олександр Леонідович. – №и200605962; заявл. 30.05.06; опубл. 15.11.06, Бюл. №11. – 4с.

5. Пат. 18729 Украина, МПК6 H01F29/00, H02P13/00. Пристрій для перемикання відводів регулювальної обмотки трансформатора під навантаженням / Кухарев О. Л.; заявитель и патентообладатель Ку-

харев Олексій Леонідович. – №и200605960; заявл. 30.05.06; опубл. 15.11.06, Бюл. №11. – 3с.

6. Алферов Д.Ф. Изучение перехода тока между диодным блоком и вакуумной дугогасительной камерой / Д.Ф. Алферов, Д.В. Евсин, В.П. Иванов // IX Симпозиум «Электротехника 2030 год» Перспективные технологии электроэнергетики. Московская обл., 29-31 мая 2007 г.: Электронный сборник докладов. – 5.16 – 9с.

7. Белкин Г.С. Адаптивные методы определения коммутационных характеристик выключателей / Г.С. Белкин // Электротехника, 2003. – №11. – С. 12–18.

8. Koshizuka T., Shinkai T., Udagawa K., Kawano H. Circuit Breaker Model using Serially Connected 3 Arc Models for EMTP Simulation [Электронный ресурс]: International Conference on Power Systems Transients (IPST2009). Kyoto, Japan June 3-6, 2009. – Режим доступа: <http://www.ipst.org/TechPapers/2009/papers/118.pdf>.

9. Хольм Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 464с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Лущиком В.Д.**