

**Keywords:** power system, renewable energy sources. the reliability of electricity supply.

#### References

1. Azaryan A.A., Vilkul Yu.G., Complex resource and power keeping geotechnologies of booty and processing of mineral raw material, hardwares of their monitoring with the control and optimization of mining productions system. – Mineral, Krivij Rig, 2006. – 250 p. (Ukr)
2. Boiko S.M., Karlik Y.P., Petrinenko A.A., Ribins'kij S.V. The possibility of using wind turbines to produce electrical energy at the dump pits. Kremenchuk, Elektrotehnicni i energozberigayuchi sistemi. Vol. 2, 2012, – pp. 101-103. (Ukr)
3. Boiko S.M. The possibility of using wind turbines to produce electrical energy in underground mines. – Vinnitsa, Visnik Vinnic'kogo politehnicnogo institutu, Vol. 2, 2012. – pp. 97-99. (Ukr)
4. Sinchuk I.O., Boiko S.M., Melnik O.E. Renewable and alternative energy resources. Kremenchuk: PP Scherbatih O.V., 2015 – 270 p. (Ukr)
5. Tsyipkin Ya.Z. Bases of theory of the student systems. it is M.: Science, 1970. - 252 p. (Rus)
6. Bayir R. Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors / R. Bayir, O. F. Bay: IJSIT Lecture Note of International Conferense on Intelligent Knowledge Systems, Vol. 1, – № 1, 2004 – 150 p.

УДК 621.311.4.031

О.Н. СИНЧУК<sup>1</sup>, С.Н. БОЙКО<sup>2</sup>, Д.А. МИХАЙЛИЧЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

<sup>2</sup> Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

### СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*В статье рассмотрен потенциал альтернативных источников энергии предприятий горно-добывающего комплекса. Обоснована актуальность разработки и реализации в практику работы предприятий горно-добывающего комплекса электромеханических ветроэнергетических комплексов, в качестве дополнительных источников питания в составе системы электроснабжения, с целью обеспечения условия бесперебойности и надежности электроснабжения электроприемников и уменьшение себестоимости добычи полезных ископаемых. Для реализации энергоэффективности электроснабжения, обоснован и предлагается для практической реализации ее структурная схема. Для эффективного управления системой электроснабжения предложено использование нейроконтролера. Библ. 6, рис. 5.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, надёжность электроснабжения.

Надійшла 15.04.2015

Received 15.04.2015

УДК 621.314.22.2

Ф.П. ГОВОРОВ, д-р техн. наук, В.Ф. ГОВОРОВ, О.В. КОРОЛЬ

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В КВАЗИУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

*В статье рассмотрены вопросы повышения надежности работы вольтодобавочных трансформаторов с электронным управлением, которые используются в качестве активных элементов ESS, и выполняют функции автоматической коррекции параметров режима электрических сетей. На основе анализа электромагнитных процессов разработаны схемные и математические модели трансформатора в квазиустановившихся режимах, а также определены условия надежной работы электронных элементов в этих условиях. Предложены пути повышения надежности работы трансформаторов с включением тиристоров в цепи его первичной обмотки. Библ. 4, рис. 3.*

**Ключевые слова:** вольтодобавочный трансформатор, тиристор, надежность, электродвижущая сила, напряжение, ток угол сдвига.

**Постановка задач.** Как известно [1], важнейшими элементами интеллектуальных энергетических систем (ESS), определяющими возможность и условия эффективного функционирования ESS, являются силовые активные элементы (АЭ). Степень их совершенства в значительной степени определяет эффективность функционирования ESS, в целом. Поэтому, обеспечение условий надежной и экономической работы активных элементов, является важной задачей повышения эффективности работы ESS.

Важное место среди АЭ занимают устройства силовой электроники, выполненные на базе вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) с электронным управлением. Их применение в электрических сетях среднего и низкого напряжения в сочетании с применением плавного либо плавно-ступенчатого способа управления в состоянии значительно расширить функциональные возможности ESS, эффективность и качество функционирования электрических сетей и, подключенных к ним, потребителей. Однако, в силу особенностей схемы присоединения ВДТ к сети имеет место ряд особенностей его работы совместно с электронными управляющими элементами. Это относится к характеру изменения ЭДС и токов в его обмотках. Их наличие обуславливает снижение надежности и экономичности работы ВДТ и, подключенных к ним, потребителей. Изложенное делает необходимым исследование особенностей работы ВДТ с электронными управляющими элементами и определение условий их надежной и экономичной совместной работы.

**Анализ публикаций.** Исследованием работы ВДТ в той или иной постановке задачи в различные годы занимались Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Липковский К.А., Новский В.А. и др. [2-4]. В целом, указанные исследования посвящены, в большинстве своем, исследованиям статических режимов ВДТ. В это же время наличие особенностей квазиустановившихся режимов ВДТ и их существенное влияние на надежность и качество работы ESS требуют проведения дополнительных их исследований.

**Расчетно-теоретическое исследование работы ВДТ с тиристорным ключом на первичной стороне.** Работа ВДТ с тиристорным ключом в сочетании с наиболее распространенным время-импульсным способом управления и естественным гашением тиристоров, характеризуется наличием ряда особенностей, связанных с изменением величины и длительности протекания токов в обмотках в зависимости от режимов работы и параметров цепи первичной и вторичной обмоток. В рассматриваемых условиях, очевидным является тот факт, что если длительность протекания тока  $I_1$  превышает угол  $\pi$ , то при углах регулирования вентилей  $\alpha < \pi - \beta$ , где  $\beta$  - угол включенного состояния тиристора, подача управляющего напряжения на включаемый тиристор произойдет в момент, когда напряжение на тиристоре равно нулю, либо имеет обратную полярность, последний отключится. В то же время, отсутствие тока в предшествующий полупериод, создает возможность для успешного включения другого из группы встречно-параллельно включенных тиристоров в последующий полупериод, независимо от соотношения между  $\alpha$  и  $\beta$ . В результате трансформатор переходит в режим одностороннего подмагничивания, который характеризуется включением одного из группы встречно-параллельно включенных тиристоров и значительным увеличением первичного тока  $I_1$ . При этом, в следствии насыщения магнитной системы, увеличится длительность протекания тока  $I_1$  в первичной обмотке и возврат трансформатора в нормальный режим станет возможным уже при другом угле  $\alpha' > \alpha$ .

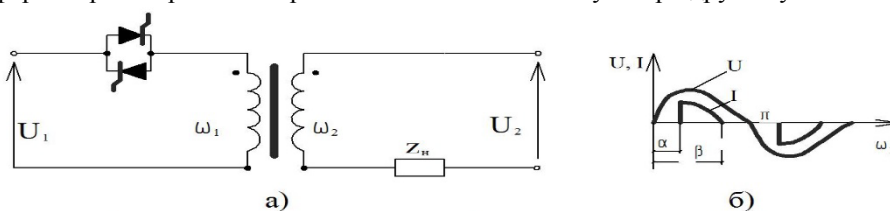


Схема (а) и характер измерения тока  $I$  в цепи первичной обмотки (б) ВДТ с тиристорным управлением

Рисунок 1

Соответственно, при  $\alpha > \pi - \beta$  на участке полупериода, равном  $\pi - \beta$  тиристоры находятся в состоянии малой проводимости ( $r_T = 1 \div 10$  кОм) и трансформатор работает в режиме холостого хода (ХХ) с питанием по вторичной цепи. Работа ВДТ этом режиме определяется величиной напряжения  $U_2$ , модулем и фазой сопротивления вторичной цепи  $Z_{2п}$ . Измерения ЭДС и токов в обмотках ВДТ при  $\alpha < \pi - \beta$  и  $\alpha > \pi - \beta$  свидетельствуют о значительном (до четырех крат) увеличении напряжения на тиристорах, при  $\alpha > \pi - \beta$ , и многократном (до ста крат) увеличении тока  $I_1$ , при  $\alpha < \pi - \beta$ . В связи со снижением технико-экономических показателей ВДТ, появлением в обмотках импульсов напряжения и тока большой величины, работа трансформатора в рассмотренных условиях является аварийной.

В соответствии с изложенным, условие надежной работы ВДТ с тиристорами в цепи первичной обмотки может быть записано в виде:  $\alpha \geq \pi - \beta + \gamma$ , где:  $\gamma$  - угол удержания вентилей. При этом, угол включения вентилей  $\alpha = \pi - \beta + \gamma$  является критическим ( $\alpha_{кр}$ ). При уменьшении угла включения вентилей

до величины  $\alpha < \alpha_{кр}$  или увеличении длительности протекания тока  $\beta$  в цепи первичной обмотки до величины  $\beta > \pi + \alpha - \gamma$  трансформатор переходит в один из аварийных режимов: дроссельный или одностороннего подмагничивания.

Основные количественные соотношения, характеризующие работу ВДТ в этих режимах получены использованием схемы замещения рис. 2 а. Процессы в схеме замещения описываются системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= i_1 r_{1\Pi} + L_{\sigma 1\Pi} \frac{di_1}{dt} + L_M \frac{di_0}{dt} \\ U_2' &= i_2' r_{2\Pi} + L_M \frac{di_0}{dt} \\ i_0 &= i_1 + i_2' \end{aligned} \quad (1)$$

После эквивалентных преобразований схема рис. 2а преобразуется в более простой вид исходя из следующих допущений (рис. 2б),:  $Z_H \approx r_H$ ;  $R_H = (r_2' + r_H) \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2$ ;

$$U_{\mathcal{E}} = \frac{U_2' x_m^2}{R_H'^2 + x_m^2}; \quad Z_{\mathcal{E}} = \frac{R_H' x_m}{R_H' + x_m} = \frac{R_H' x_m^2 + R_H'^2 x_m}{R_H'^2 + x_m^2}.$$

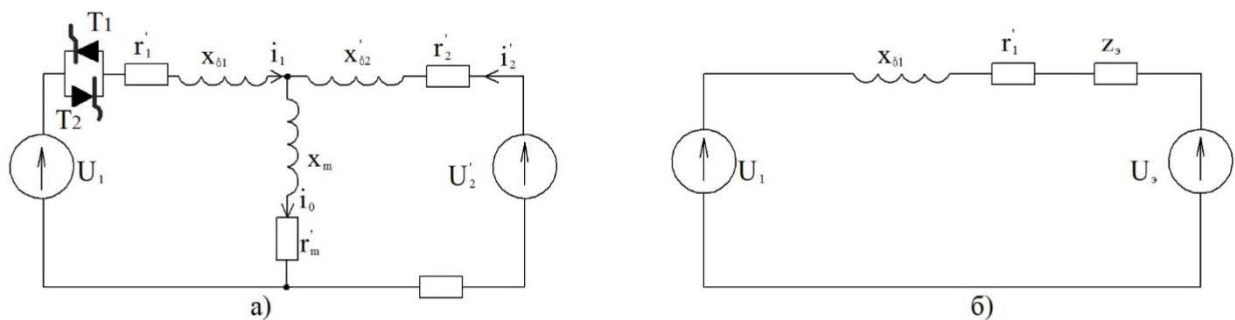


Рисунок 2

Для оценки влияния режимов работы и параметров ВДТ на значение угла включения вентилей  $\alpha$  в квазиустановившихся режимах достаточным является частное решение (1) в виде:

$$I_1 = \frac{\left[ \pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2 + U_2' R_H' x_m \right]}{(R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}) + (R_H'^2 x_m + x_{\sigma 1}^2 x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1}^2)} \quad (2)$$

Откуда

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{(R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}) - \left[ \pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2 \right] \times (R_H'^2 x_m + x_{\sigma 1}^2 x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1}^2)}{\left[ \pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2 \right] \times (R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}) + U_2' R_H' x_m (R_H'^2 x_m + x_{\sigma 1}^2 x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1}^2)} \quad (3)$$

Как следует из (3)  $\alpha_{кр}$  является знакопеременной функцией параметров  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $R_H$ ,  $x_m$ ,  $r_{1\Pi}$ ,  $x_{\sigma 1}$  и изменяется с изменением режимов работы ВДТ, величины нагрузки и состояния магнитной системы. При этом в режиме встречного включения при  $U_1 (R_H'^2 + x_m^2) \geq U_2' x_m^2$  угол  $\alpha_{кр} > 0$ , что соответствует опережающему току  $I_1$ . В режиме малых нагрузок ( $R_H' \rightarrow \infty$ ) сопротивление нагрузки не влияет на характер тока  $I_1$  и значение  $\alpha_{кр}$  определяется значением  $x_m$  (состоянием магнитной системы)

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{x_m}{r_{1\Pi}} \quad (4)$$

При ненасыщенной магнитной системе  $x_m \gg r_{1\Pi}$  и  $\alpha_{кр} \approx 0$ . С увеличением насыщения  $\alpha_{кр} \gg 0$ . Соответственно, при больших нагрузках, когда  $R_H' \rightarrow 0$ , влияние намагничивающего контура на характер изменения тока  $I_1$  уменьшается и  $\alpha_{кр}$  определяется главным образом параметрами первичной цепи

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1П}} \quad (5)$$

При номинальных нагрузках в зависимости от характера соотношения  $R'_н > r_{1П}$  следует рассматривать работу ВДТ при насыщенной и ненасыщенной магнитной системе.

В первом случае сопротивление намагничивающего контура  $x_m$  значительно больше сопротивления нагрузки, его влиянием в первом приближении можно пренебречь и рассматривать схему в виде последовательно соединенных  $U_1, U_2, R'_н, x_m, r_{1П}, x_{\sigma 1}$  (см. рис. 2 б).

В этом случае

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1П} + R'_н} \quad (6)$$

Во втором случае, сопротивление намагничивающего контура соизмеримо с сопротивлением нагрузки  $R'_н$  и оказывает существенное влияние на характер тока  $I_1$ . Пренебрегая влиянием параметров первичной цепи ( $r_{1П}, x_{\sigma 1}$ ), схему замещения можно рассматривать в виде параллельно соединенных сопротивлений  $x_m$  и  $R'_н$ . Угол включения, при этом, определится, как

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{R'_н}{x_m} \quad (7)$$

Таким образом, критический угол включения тиристоров  $\alpha_{кр}$  не является постоянным, а изменяется с изменением режимов работы и параметров ВДТ. Значения  $\alpha_{кр}$  при различном сочетании режимов работы и параметров ВДТ могут быть определены по (3). При этом, поскольку тиристор заперт,  $r_{1П} \approx 0$  и значение критического угла возврата определяется, практически параметрами вторичной цепи

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{R'_н}{x_m} \quad (8)$$

В соответствии с изложенным, в связи со значительным изменением сопротивления  $x_m$  намагничивающего контура при кратковременной потере импульсов либо увеличении длительности прохождения тока  $I_1$  до  $\beta_{кр} = \pi - \alpha + \gamma$ , трансформатор переходит в режим одностороннего подмагничивания.

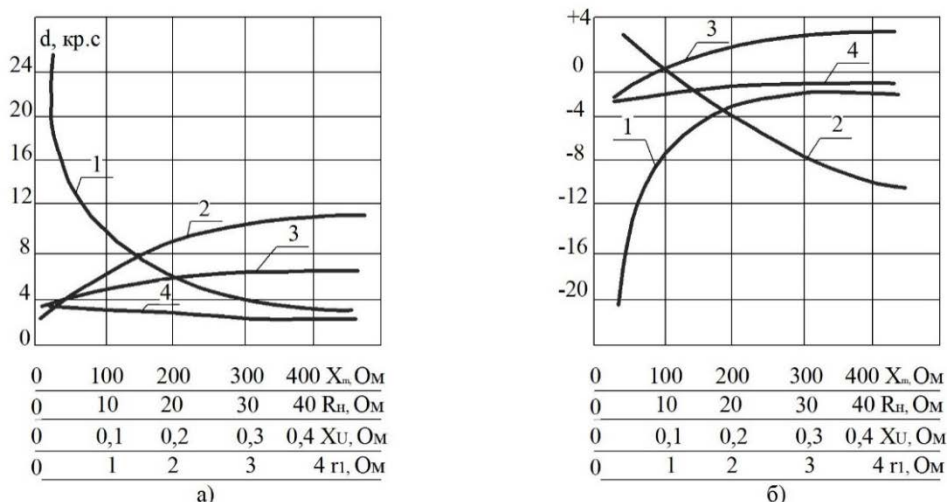
Графические зависимости  $\alpha_{кр} = f(R'_н, x_m, r_{1П}, x_{\sigma 1})$ , полученные в результате расчета по (3), приведены на рис. 2. Кривая  $\alpha_{кр} = f(x_m)$  характеризует зависимость критического угла от состояния магнитной системы и может быть использована для определения значений критического угла возврата  $\alpha'_{кр}$ . Как следует из рис. 3, значение критического угла возврата увеличивается с увеличением насыщения магнитной системы и стремится в предельном случае к  $+\pi$ , при согласном включении ВДТ, и к  $-\pi$  - при встречном. Различие в характере кривых  $\alpha = f(x_m)$  для различных режимов можно объяснить различным характером взаимодействия токов  $I_1$  и  $I_0$ . В режиме согласного включения ток  $I_0$  сдвинут относительно тока  $I_1$  на угол близкий к  $+\pi/2$  обуславливает сдвиг последнего на угол  $\phi_1$ , в сторону отставания. Соответственно, в режиме встречного включения сдвиг тока  $I_0$  составляет угол, близкий к  $-\pi/2$  и влияние сказывается на сдвиге тока  $I_1$  в сторону опережения.

В режиме встречного включения, сопротивление  $R'_н$  включено последовательно с эквивалентным сопротивлением первичной цепи и его влияние выражается в уменьшении индуктивной составляющей результирующего тока, поскольку при последовательном соединении  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$

Аналогично объясняется характер кривых  $\alpha_{кр} = f(x_{\sigma 1})$  с той лишь разницей, что в режиме согласного включения  $x_{\sigma 1}$  оказывается включенным последовательно с эквивалентным сопротивлением вторичной цепи, увеличивая реактивную составляющую тока  $I_1$ . По той же причине, в режиме встречного включения, сопротивление  $x_{\sigma 1}$  вызывает уменьшение критического угла включения  $\alpha_{кр}$  в связи с подключением его параллельно с сопротивлением намагничивающего контура  $x_{\sigma 1}$ . Наличие точки с  $\alpha_{кр} = 0$  и изменение знака  $\alpha_{кр}$  объясняется влиянием сопротивления  $r_{1П}$ . Точке  $\alpha_{кр} = 0$  соответствует значение  $x_{\sigma 1}$  равно

$$x_{\sigma 1} = \sqrt{\frac{x_m^2 - r_{1П}^2}{\sin \phi_1}} \quad (9)$$

при котором ток  $I_1$  находится в противофазе с током  $I_0$ . Дальнейшее увеличение  $x_{\sigma 1}$  приводит к тому, что ток  $I_1$  оказывается сдвинутым на угол, больший  $\pi$  по отношению к току  $I_0$  и влияние  $I_0$  можно рассматривать, как сдвиг тока  $I_1$  в сторону отставания.



Графические зависимости критического угла включения тиристоров  $d_{кр}$  от сопротивления намагничивающего контура  $x_m$  (1), сопротивления нагрузки  $R_n$  (2), сопротивления рассеяния (3), активного сопротивления первичной обмотки  $r_1$  (4) для режима согласного (а) и встречного (б) включения ВДТ

Рисунок 3

**Выводы:** Проведенные исследования свидетельствуют, что для обеспечения надежной и экономичной работы ВДТ в квазиустановившихся режимах необходим учет наличия и характера изменения критического угла отпирания тиристоров с изменением нагрузки, режимов работы и параметров ВДТ. Последнее требует применения специальных схем управления с синхронизацией управляющего напряжения от тока и напряжения тиристоров.

#### Список литературы

1. Назаров В.В. Концепция Smart Grid и реальная энергетика // Энергетика и электрофикация, 2013, №6, с. 12-15.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях // Наукова Думка, 1985, с. 268 с.
3. Новский В.А., Голубев В.В., Козлов А.В., Бойко П.С. Быстродействующее уравнивание трехфазной четырехпроводной системы с помощью трансформаторно-ключевых преобразователей // Техн. електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 7-12.
4. Липківський К.О. Оптимізація розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги // Праці ІЕД НАНУ. – 2006. - №2(14). – С. 98-99.

**P.P. GOVOROV, V.P. GOVOROV, O.V. KOROL**  
**O.M. Beketov National University of Urbun Economy in Kharkiv**  
**RESEARCH WORK BOOSTER TRANSFORMERS WITH ELECTRONIC CONTROL IN A**  
**QUASI STEADY-STATE MODES**

The paper deals with improving the reliability of booster transformers with electronic control, which are used as active elements of ESS, and perform the automatic correction mode parameters of electric networks. Based on the analysis of electromagnetic processes designed circuit and transformer mathematical models in quasi-steady conditions, as well as the conditions identified reliable operation of electronic components in these conditions. Ways of improving the reliability of transformers connected thyristors in the chain of its primary winding. References 4, figures 3.

**Key words:** booster transformer, thyristor, reliability, electromotive force, voltage, current shift angle.

#### References

1. Nazarov V. V. Smart Grid concept and the real power // Energetika i elektrofikatsiya, 2013, №6, p. 12-15. (Rus)
2. Shydlovski A.K., Kuznetsov V.G. Improving the quality of energy in electric networks // Naukova Dumka, 1985, p. 268 p. (Rus)
3. Novitsky V.A., Golubev V/V., Kozlov A.V., Boiko P.S. High-speed three-phase four trim system using the transformer-core transducers // Tech. elektrodinamika. Themes. vipusk " Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist." - 2007 - Part 3 - S. 7-12. (Rus)
4. Lypkivsky K.O. Optimizing the design characteristics of the executive structures of discrete voltage

**П.П. ГОВОРОВ**, д-р техн. наук, **В.П. ГОВОРОВ**, **О.В. КОРОЛЬ**  
**Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВОЛЬТОДОДАВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ЕЛЕКТРОННИМ**  
**УПРАВЛІННЯМ В КВАЗІСТАЛОМУ РЕЖИМІ**

*У статті розглянуті питання підвищення надійності роботи вольтододавальних трансформаторів з електронним управлінням, які використовуються в якості активних елементів ESS, і виконують функції автоматичної корекції параметрів режиму електричних мереж. На основі аналізу електромагнітних процесів розроблені схемні та математичні моделі трансформатора в квазіусталених режимах, а також визначено умови надійної роботи електронних елементів в цих умовах. Запропоновано шляхи підвищення надійності роботи трансформаторів із включенням тиристорів в ланцюзі його первинної обмотки. Бібл. 4, рис. 3.*

**Ключові слова:** вольтододавального трансформатор, тиристор, надійність, електрорушійна сила, напруга, струм кут зсуву.

Надійшла 16.04.2015

Received 16.04.2015

УДК 621.316.11

**В.А. ПОПОВ**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., **П.Я. ЭКЕЛЬ**<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
**В.В. ТКАЧЕНКО**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **С. БАНУЗАДЕ САХРАГАРД**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

<sup>2</sup> Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Ave. Dom Jose Gaspar

<sup>3</sup> Iranian NIK Energy

**УЧЕТ ФАКТОРА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ**  
**КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ ВАРИАНТОВ ИНТЕГРАЦИИ**  
**ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В**  
**РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ**

*В работе предложен подход для комплексной оценки влияния распределенной генерации на такие показатели эффективности работы распределительных сетей как потери электрической энергии, режим напряжений и надежность электроснабжения с использованием процедуры Беллмана-Заде для многокритериального сравнения альтернатив. Обоснован метод дифференциации весов частных целевых функций на основе оценки энтропии. Особое внимание уделено особенностям анализа надежности при различных вариантах подключения генерирующих источников к электрическим сетям.*

**Ключевые слова:** распределенная генерация, надежность электроснабжения, многокритериальное принятие решений, энтропия информации.

**1 Введение**

Одним из важнейших аспектов реформирования энергетики на современном этапе является смещение акцентов в пользу развития малой генерации. Украина, как никакая другая страна мира, заинтересована в кардинальном повышении эффективности своей энергетической отрасли [1], что делает необходимым, чтобы даже те единичные проекты, которые сегодня реализуются в сфере применения распределенной генерации, были технически обоснованны и экономически эффективны. Очевидно, что указанные источники даже относительно небольшой мощности оказывают воздействие на потери электрической энергии, режим напряжений, надежность электроснабжения.

Расчет потерь электрической энергии, в принципе, не вызывает затруднений. Это реализуется как в процессе непосредственного моделирования режимов электрических сетей, так и на основе специальным образом адаптированных расчетных методов, ориентированных на использования обобщенных показателей (величины потребления электроэнергии или максимальной нагрузки) [2].