

## The Control of Fluxes of Electric Power in Networks by Means of Phase-switching Booster Transformers

**Govorov F.P., Govorov V.F., Romanova T.I.**

A.N. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy  
Kharkiv, Ukraine

**Abstract:** Problems of increasing the efficiency of the operation of electrical networks based on the utilization of booster transformers (BT) with electronic control, applied on the base of active elements in smart electric grids of power systems and giving the function of automatic correction of the parameters of the network, assuring the conditions of optimal common operation are studied in the paper. The mathematic model of the processes in the electric networks with booster transformer has been developed; the opportunity of control by means of the phase-switching BT for power fluxes in the networks has been established. It has been shown that for the groups of switching the windings 1-5 of BT occurs additional consumption of power from the supply network, but for the groups 7-11 its recuperation to the load network. Respectively, switching the windings of BT to the group 1-5 assures the shift of load current to the direction of lag, but in the case of switching to the group 7-11 – towards the outrunning. Wherein, for the groups of switching 10-11 and 1-2 one can observe the increasing of the voltage at the output of BT, but for the groups 7-8 and 4-5 it is decreasing. Based on the analysis of the results of research the diagram and constructive models of the transformer have been proposed. The quasi-stationary and transient regimes were investigated and the conditions of reliable operation at these the regimes have been determined. The ways for increasing the efficient common operation for the transformer and network in the case of switching the thyristors into the circuit of the primary winding of the transformer have been proposed.

**Keywords:** booster transformer, thyristor, active power, reactive power.

### Dirijarea fluxurilor de energie electrică în rețele prin intermediul transformatoarelor de rapel de recomutare a fazelor

**Govorov F.P., Govorov V.F., Romanova T.I.**

Universitatea Națională a Economiei Municipale A.N. Bechetov din Harkov  
Harkiv, Ucraina

**Rezumat.** Sunt examinate problemele sporirii eficienței funcționării rețelelor electrice în baza aplicării transformatoarelor de rapel cu dirijare electronică. Utilizarea acestor echipamente în calitate de elemente active a rețelelor electrice inteligente a sistemelor energetice asigură exercitarea funcțiilor de corectare automată a parametrilor regimurilor rețelei și asigură condiții cumulate optime de funcționare a rețelelor electrice. S-a elaborat modelul matematic al proceselor în rețelele electrice cu transformator de rapel. S-a demonstrat, că pentru grupele 1-5 ale transformatorului are loc consum de putere suplimentar din rețeaua de alimentare, iar la conectarea în schema ce corespunde grupele 7-11 se observă recuperarea puterii din circuitul sarcinii. Respectiv, conectarea înfășurărilor transformatorului cu adaos de tensiune în grupul 1-5 asigură defazajul curentului de sarcină în partea întârzierii, iar la conectarea în grupul 7-11 în direcția avansării. Pentru schemele grupurilor de comutare 10-11 și 1-2 se observă creșterea tensiunii la ieșirea transformatorului, iar pentru grupurile 7-8 și 4-5 micșorarea tensiunii. În baza analizei rezultatelor cercetărilor sunt propuse modele de prezentare a schemelor echivalente și realizare constructivă a transformatoarelor. Sunt studiate procesele din caracteristice pentru aceste scheme în regimuri tranzitorii și quasi-staționare, care au servit ca bază pentru determinarea condițiilor de funcționare fiabilă în aceste regimuri. Sunt propuse căile de sporire a eficienței funcționării transformatoarelor împreună cu rețeaua electrică la utilizarea tiristoarelor în circuitul înfășurării primare a transformatorului.

**Cuvinte-cheie:** transformator de rapel, tiristor, putere activă, putere reactivă.

### Управление потоками электрической энергии в сетях с помощью фазопереключающих вольтодобавочных трансформаторов

**Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Романова Т.И.**

Харьковский Национальный Университет Городского Хозяйства имени А.Н. Бекетова  
Харьков, Украина

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы повышения эффективности работы электрических сетей на основе применения вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) с электронным управлением, при использовании их в качестве активных элементов интеллектуальных электрических сетей энергетических систем ESS и

придания им функций автоматической коррекции параметров режима сетей, обеспечивающей условия их оптимального совместного функционирования. Разработана математическая модель процессов в электрических сетях с вольтодобавочным трансформатором, установлена возможность управления с помощью фазопереключаемых ВДТ потоками мощности в сетях. Показано, что для групп соединения обмоток ВДТ 1-5 имеет место потребление дополнительной мощности из питающей сети, а при группах 7-11 – ее рекуперация из нагрузочной сети. Соответственно, включение обмоток ВДТ в группу 1-5 обеспечивает сдвиг нагрузочного тока в сторону отставания, а при включении в группу 7-11 – в сторону опережения. При этом, для групп соединения 10-11 и 1-2 наблюдается увеличение напряжения на выходе ВДТ, а для групп 7-8 и 4-5, его уменьшение. На основе анализа результатов исследований предложены схемные и конструктивные модели трансформатора, а также исследованы процессы в них в квазиустановившихся и переходных режимах, на основе которых определены условия их надежной работы в этих режимах. Предложены пути повышения эффективности работы трансформаторов совместно с сетью при включении тиристоров в цепь первичной обмотки трансформатора.

**Ключевые слова:** вольтодобавочный трансформатор, тиристор, активная мощность, реактивная мощность.

### Введение

В последнее время в мире большую актуальность приобретают вопросы энергоэффективности. В первую очередь это касается энергетической отрасли, для которой первоочередной является необходимость управления потоками мощностей. Однако, существующие методы и технические средства управления режимами сетей ориентированы на применение индуктивно-емкостных накопителей энергии, которые обеспечивают комплексное решение вопросов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в условиях высокого уровня корреляции графиков напряжения и реактивной мощности. Та же часть потребителей, которая работает в условиях слабой корреляции графиков напряжения и реактивной мощности, требует разработки методов и технических средств, обеспечивающих управление потоками мощностей в этих условиях. Широкие возможности для этого открывает применение фазопереключаемых вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ). Поэтому оценка возможности использования фазопереключаемых ВДТ для управления потоками активной и реактивной мощности в сетях является актуальной задачей большой важности.

Применение фазопереключаемых ВДТ для управления режимами электрических сетей рассмотрено в [1, 2]. В связи с формированием концепции развития интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid) работа по совершенствованию ВДТ особенно интенсифицировалась в последние годы. Реализация концепции, интеллектуальных энергетических систем Smart Grid породила ряд вопросов. Один из

них касается недостаточности технического обеспечения мероприятий. К сожалению, со времени последней кампании автоматизации распределительных сетей, проходившей около 50 лет назад, существенных изменений не произошло. Еще тогда была отмечена невозможность решения задачи, без применения технических средств автоматического управления и регулирования, которые выполняют функции активных элементов (АЭ) Smart Grid. Однако, задача по их созданию до сих пор не решена. Указанная проблема остается актуальной и по сей день. Поэтому, разработки, посвященные созданию активных элементов Smart Grid, актуальны и являются важным направлением повышения их эффективности.

Как отмечено в [1] активные элементы являются важнейшими элементами интеллектуальных энергетических систем, определяющими возможность и условия их эффективного функционирования. Степень их совершенства в значительной степени определяет эффективность функционирования Smart Grid, в целом. Поэтому, обеспечение условий надежной и экономической работы активных элементов Smart Grid, является важной задачей повышения эффективности их работы.

В настоящее время все большее место среди АЭ занимают устройства силовой электроники, выполненные на базе 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 Smart Grid, 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 особенностям электромагнитных процессов в сетях, характеру изменения ЭДС и токов в обмотках ВДТ. 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 в составе Smart Grid и определение условий их надежной и экономичной совместной работы.

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. [3, 4]. Их работы посвящены, в большинстве своем, исследованиям статических режимов ВДТ. В то же время наличие особенностей квазиустановившихся режимов ВДТ и их существенное влияние на надежность и качество работы Smart Grid требуют проведения дополнительных их исследований.

Как установлено ранее, величина, характер и направление, передаваемой ВДТ электромагнитной мощности зависит от электрических параметров сети и магнитных ВДТ. Поэтому требование к расчетной модели определило необходимость одновременного описания процессов в электрических и магнитных цепях. Наиболее полно рассмотренным условиям соответствует применение вектора Пойнтинга.

В соответствии с [5] получим:

$$-\oint_S \Pi dS = \frac{dW_{эм}}{dt} + \int_V \gamma E^2 dV, \quad (1)$$

где  $\Pi = [E \times H]$  - вектор Пойнтинга;  $E$ ,  $H$  - векторы напряженностей электрического и магнитного полей;  $S$  - поверхность обмотки, в которую втекает электромагнитная мощность  $P_{эм}$  (рис. 1).

Правая часть (1) представляет мощность, расходуемую на увеличение электрической и магнитной энергии поля в объеме  $V$

$$\frac{dW_{эм}}{dt} = \int_V \frac{d}{dt} \left( \frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) dv = \frac{d}{dt} (w_э + w_м) \quad (2)$$

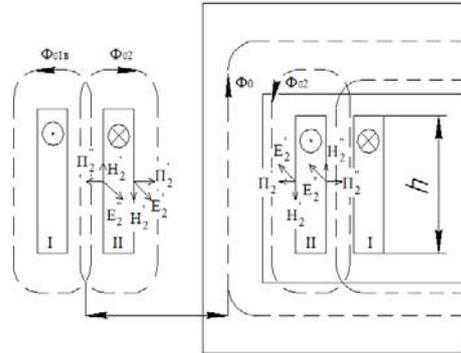


Рис. 1. Картина вектора Пойнтинга в ВДТ.

Для усредненного по объему  $V$  электромагнитного поля имеем

$$W_{эм} = \frac{1}{2} (D \cdot E + B \cdot H) V = \frac{1}{2} (w_э + w_м) V \quad (3)$$

где  $D$ ,  $B$  - векторы электрического смещения и магнитной индукции соответственно;  $w_э$ ,  $w_м$  - объемные плотности энергии электрического и магнитного полей;  $V = l \cdot S$  - объем, в котором существует магнитное поле;  $l$ ,  $S$  - длина и площадь поверхностей, ограничивающих объем  $V$ ;  $\epsilon$ ,  $\mu$  - диэлектрическая и магнитная проницаемости.

На основании закона сохранения заряда и электромагнитной индукции [6] имеем

$$D = -\frac{1}{S_D} \int_0^t i dt; \quad E = \frac{e}{l_e};$$

$$B = -\frac{1}{S_B} \int_0^t e dt; \quad H = \frac{i}{l_H}$$

где  $l_e$ ,  $l_H$  - осредненные длины силовых линий потоков векторов  $E$  и  $H$ ;  $S_d$ ,  $S_b$  - осредненные площади потоков векторов смещения  $D$  и магнитной индукции  $B$ .

С учетом (3) при условии  $V \approx l_e S_D \approx l_H S_B$  получим

$$W_{\text{ЭМ}} = -\frac{1}{2T} \int_0^T \left( \int_0^t i \, edt \right) + e \left[ \int_0^t idt \right] \quad (4)$$

Учитывая гармонический характер параметров режима

$$i = \sum_{\nu} I_{\text{mv}} \sin \nu \omega t;$$

$$e = \sum \pm E_{\text{mv}} \sin(\nu \omega t + \delta_{\text{EV}})$$

получим выражение для мгновенной электромагнитной энергии ВДТ

$$w_{\text{ЭМ}} = \sum_{\nu} -\frac{\pm E_{\text{mv}} I_{\text{mv}}}{2} \left[ \begin{array}{l} t \cdot \cos \delta_{\text{EV}} - \\ -\frac{1}{2\omega\nu} \sin(2\nu\omega t + \delta_{\text{EV}}) \end{array} \right]$$

где  $+E_{\text{mv}}$  - соответствует режиму согласного включения обмоток, а  $-E_{\text{mv}}$  - встречного.

Второй член правой части (3.1) представляет собой потери мощности в проводящей среде, равные мощности, поглощенной в виде тепла в объеме  $V$ . Поэтому, применительно к условиям рассматриваемой задачи запишем

$$\int_V \gamma E^2 dv = \int [E \times H] dS_D = \frac{i \cdot r}{h} \cdot \frac{l}{2\pi R} S_D = i^2 r \quad (5)$$

где  $R, l$  - радиус и длина обмоточного провода;  
С учетом гармонического характера параметров режима

$$\int_V \gamma E^2 dV = \sum_{\nu} -\frac{\pm E_{\text{lmv}} I_{\text{lmv}}}{2} \cdot \left[ \cos \delta_{1\nu} - \cos(2\omega t + \delta_{1\nu}) \right] \quad (6)$$

Первое слагаемое разности (6) представляет поток активной мощности  $\Pi'_{1a} = P_{\text{ЭМ1}}$ , передаваемой магнитному полю в межобмоточном пространстве первичной обмоткой  $P_{\text{ЭМ1}} = \sum_{\nu} E_{1\nu} I_{1\nu} \cos \delta_{1\nu}$  в режиме согласного включения, либо вторичной  $\Pi''_{2a} = P_{\text{ЭМ2}}$ , ( $P_{\text{ЭМ2}} = \sum_{\nu} E_{2\nu} I_{2\nu} \cos \delta_{2\nu}$ ) - в режиме встречного включения. Часть этой мощности

$$\Pi''_{2a} = P_{\text{ЭМ12}}, \quad (P_{\text{ЭМ12}} = \sum_{\nu} E_{1\nu} I_{2\nu} \cos \delta'_{2\nu}) -$$

передается встречной обмотке в режиме согласного включения, либо первичной  $\Pi''_{1a} = P_{\text{ЭМ2}}$ , ( $P_{\text{ЭМ2}} = \sum_{\nu} E_{2\nu} I_{1\nu} \cos \delta_{1\nu}$ ) - в режиме встречного включения.

Другая часть мощности  $\Pi'_{1a} = \Delta P_{c1}$  ( $\Delta P_{c1} = \sum_{\nu} E_{1\nu} I_{01\nu}$ ) в режиме согласного включения, либо  $\Pi''_{2a} = \Delta P_{c2}$  ( $\Delta P_{c2} = \sum_{\nu} E_{2\nu} I_{02\nu}$ ) - в режиме встречного включения, расходуется на покрытие потерь в стали. Соответственно, активная электрическая мощность  $P_1$  поступающая из питающей сети в первичную обмотку в режиме согласного включения, либо  $P_2$  - поступающая из нагруженной сети во вторичную обмотку в режиме встречного включения, представляют собой суммы активных мощностей, сообщаемых магнитному полю ВДТ и мощностей, расходуемых на компенсацию электрических потерь в обмотках

$$P_i = \pm P_{\text{ЭМ}i} + \Delta P_{\text{mi}} = \sum_{\nu} (\pm E_{i\nu} I_{i\nu} \cos \delta_{i\nu} + I_{i\nu}^2 r_i) \quad (7)$$

Таким образом, в отличие от обычных силовых трансформаторов [7], вектор Пойнтинга в ВДТ обладает свойством дуальности, изменяя свою величину и направление в зависимости от режимов работы и параметров  $Z_{1п}, Z_{2п}$  ВДТ. Этому соответствует изменение направления векторов Пойнтинга  $\Pi'_1, \Pi''_1$  и  $\Pi'_2, \Pi''_2$  с изменением режимов работы ВДТ. Однонаправленностью обладает только часть активной мощности ВДТ, идущая на покрытие потерь в меди и стали.

Второе слагаемое (6) представляет собой поток реактивной мощности  $Q_{\text{ЭМ1}}$ , передаваемой первичной обмотке ( $Q_{\text{ЭМ1}} = \sum_{\nu} E_{1\nu} I_{1\nu} \sin \delta_{1\nu}$ ), в режиме согласного, либо вторичной ( $Q_{\text{ЭМ2}} = \sum_{\nu} E_{2\nu} I_{2\nu} \sin \delta_{2\nu}$ ) в режиме встречного включения. Части этих мощностей ( $\Delta Q_1 = \sum_{\nu} E_{1\nu} I_{2\nu} \sin \delta_{2\nu}$ ) в режиме согласного включения либо  $\Delta Q_2 = \sum_{\nu} E_{2\nu} I_{1\nu} \sin \delta_{1\nu}$  - в режиме встречного включения, передаются во вторичную обмотку, в первом случае, либо в первичную - во втором. Другая часть мощности ( $\Delta Q_{01} = \sum_{\nu} E_{1\nu} I_{01av}$ ), в режиме согласного либо ( $\Delta Q_{02} = \sum_{\nu} E_{2\nu} I_{012av}$ ) - в режиме встречного включения, расходуется на намагничивание стали. В результате,

реактивная электрическая мощность  $Q_1$ , поступающая из питающей сети в первичную обмотку, в режиме согласного включения, либо  $Q_2$  - поступающая из нагрузочной сети во вторичную обмотку в режиме встречного включения, представляют собой суммы реактивных мощностей, сообщаемых магнитному полю ВДТ  $\Delta Q_{\text{ЭМ}i}$  и мощностей, расходуемых на компенсацию магнитных потерь  $\Delta Q_{\text{М}i}$

$$Q_i = \pm Q_{\text{ЭМ}i} + \Delta Q_{\text{М}i} = \sum \pm E_{iv} I_{iv} \sin \delta_{iv} + I_{iv}^2 x_{\sigma iv} \quad (8)$$

В отличие от обычных трансформаторов у ВДТ в режиме встречного включения имеет место отдача реактивной мощности в сеть. Таким образом, ввиду существенного отличия составляющих фаз поля  $E$  и  $H$ , вектор Пойнтинга в ВДТ является комплексной величиной.

$$\oint_S \text{PdS} = R_e \oint_S \text{PdS} + I_m \oint_S \text{PdS} = \frac{1}{2} \left( E_m \times H_m^* \right) = \frac{1}{2} \left( E_m \times H_m \right) \quad (9)$$

где,  $R_e \oint_S \text{PdS} = P$ ,  $I_m \oint_S \text{PdS} = Q$  - активная и реактивная мощности, протекающие через поверхность обмотки.

С изменением режимов работы и параметров ВДТ изменяется величина и фаза составляющих поля  $E$  и  $H$ , а с ними и величина и направление передачи мощностей  $P$  и  $Q$ .

Для выявления общих закономерностей функционирования ВДТ в составе распределительных электрических сетей (РС) предположено, что к узлу сети подключена группа из трех однофазных ВДТ (рис. 2).

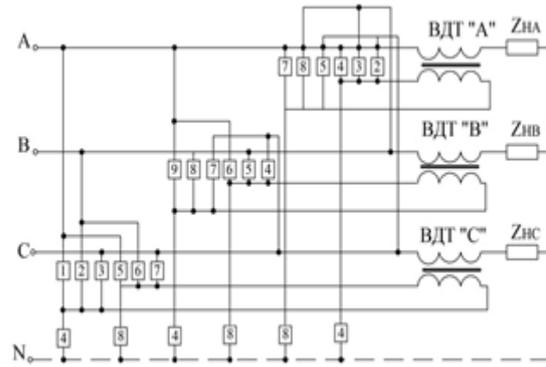


Рис.2 Схема подключения ВДТ.

В условиях подключения первичной обмотки ВДТ через управляемые ключи 1-9 к любому из фазных, либо линейных напряжений, причем, в отличие от известных схем в начале каждого полупериода с углом  $\lambda \approx 0$  включается группа ключей, обеспечивающая режим, вольтовычета, а далее, с переменным углом, зависящим от величины входных напряжений  $U_A, U_B, U_C$ , выключается группа тиристоров, обеспечивающая режим требуемой по величине и фазе вольтодобавки, обеспечивает сдвиг ЭДС на зажимах вторичной обмотки на угол  $\pi \cdot n_T / 6$ . В результате получим:

$$u_A = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Avm} \sin(v\omega t + \psi_{uvA} - \pi n_T / 6) = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Av} e^{j(v\omega t + \psi_{uvA} - \pi n_T / 6)}$$

$$u_B = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Bvm} \sin(v\omega t + \psi_{uvB} - \pi n_T / 6 - 2\pi v / 3) = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Bv} e^{j(v\omega t + \psi_{uvB} - \pi n_T / 6 - 2\pi v / 3)}$$

$$u_C = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Cvm} \sin(v\omega t + \psi_{uvC} - \pi n_T / 6 - 4\pi v / 3) = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Cv} e^{j(v\omega t + \psi_{uvC} - \pi n_T / 6 - 4\pi v / 3)} \quad (10)$$

где  $v$  - номер гармоники;  $\psi_{uvk}$  - фазовый сдвиг  $v$ -ой гармоники напряжения  $k$ -ой фазы;  $n_T = 1-12$  - группа соединения обмоток ВДТ.

В рассматриваемых условиях РС с ВДТ представлена в виде трехфазной системы напряжений и токов различных частот и, в общем виде, последовательностей. С учетом питания вторичной обмотки ВДТ от источника тока, значение тока нагрузки получено в виде

$$i_{ie}^{\wedge} = \frac{u_e + e_{2e}}{Z_{ie}} = Z_{nev}^{-1} \left\{ \begin{aligned} & U_{km} \sin[\omega t - (K-1)2\pi/3] + \\ & + \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{p=0}^2 E_{2evm}^p \sin \begin{bmatrix} v\omega t + \psi_{E2ev} - \\ - \pi n_T / 6 - \\ - (K-1)2\pi/3 \end{bmatrix} \cdot S_{e\delta v} \end{aligned} \right\} = \sum \sum I_{HKv} e^{j(v\omega t + \psi_{Iiev})} S_{e\delta v} \quad (11)$$

Соответственно, выражение для тока  $i_{lk}$ , потребляемого первичной обмоткой ВДТ имеет вид:

$$i_{lk} = \frac{(i_{nk} + i_{0k})W_{2k}}{W_{lk}} e^{j\pi n_T/6} = \left\{ \begin{aligned} & U_{km} \sin[\omega t - (K-1)2\pi/3] + \\ & + \frac{\sum_{v=1}^{\infty} \sum_{p=0}^2 E_{2kvm}^p \sin \begin{bmatrix} v\omega t + \psi_{E2kv} - \\ - \pi n_T / 6 - (K-1) \cdot \\ \cdot 2\pi v / 3 \end{bmatrix} S_{kp v}}{Z_{nk v}} + \\ & + \sum_{p=0}^2 I_{0kvm} \sin(v\omega t + \psi_{Iokv} - \pi n_T / 6) \end{aligned} \right\} \cdot \frac{W_{2k}}{W_{lk}} e^{j\pi n_T/6} = \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{p=0}^2 I_{lkvm}^p e^{j(v\omega t + \psi_{ilkv})} S_{kp v} \quad (12)$$

Выражение для тока  $i_{ck}$ , потребляемого из сети, имеет вид (13).

Выражения (11) – (13) позволяют определять значения токов ВДТ для различного сочетания параметров и режимов ВДТ. Расчеты, выполненные для различных групп соединения ВДТ, свидетельствуют о том, что с изменением числа витков и группы соединения обмоток изменяется модуль и фаза тока  $i_{lk}$ , в первичной обмотке ВДТ, а также ток сети  $i_{ck}$ , что является подтверждением возможности использования ВДТ для управления потоками активной и реактивной мощности в сетях, а также

рекуперации части мощности из нагрузочной сети в питающую.

$$i_{ck} = i_{nk} + i_{lk} = \left\{ \begin{aligned} & U_{km} \sin[\omega t - (K-1)2\pi/3] + \\ & + \frac{\sum_{v=1}^{\infty} \sum_{p=0}^2 E_{2kvm}^p \sin \begin{bmatrix} v\omega t + \psi_{E2kv} - \\ - \pi n_T / 6 - (K-1) \cdot \\ \cdot 2\pi v / 3 \end{bmatrix} S_{kp v}}{Z_{nk v}} \times \\ & \times \left( 1 + \frac{W_{2k}}{W_{lk}} \right) e^{j\pi n_T/6} + \\ & + \sum_{v=0}^{\infty} I_{0kvm} \sin(v\omega t + \psi_{Iokv} - \pi n_T / 6) \end{aligned} \right\} \cdot \frac{W_{2k}}{W_{lk}} e^{j\pi n_T/6} = \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{p=0}^2 I_{ckvm}^p e^{j(v\omega t + \psi_{ilckv})} S_{kp v} \quad (13)$$

где  $i_{lk}$ ,  $i_{nk}$ ,  $i_{ck}$  – токи первичной обмотки ВДТ, нагрузки и сети, соответственно;  $\psi_{E2Kv}$ ,  $\psi_{IHKv}$ ,  $\psi_{I0Kv}$ ,  $\psi_{ICKv}$  – фазовые сдвиги ЭДС  $E_2$  и токов  $i_n$ ,  $i_0$ ,  $i_c$ ;  $I_{Hm}$ ,  $I_{0m}$ ,  $I_{cm}$  – максимальное значение тока нагрузки, намагничивания и сети;  $K=W_{1k}/W_{2k}$ ;  $W_{1k}$ ,  $W_{2k}$  – число витков обмоток ВДТ;  $a=e^{j2\pi/3}$ ;

$$S_{kp v} = \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix} n_{pv} \quad p=1; \quad S_{kp v} = \begin{vmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{vmatrix} n_{pv} \quad p=2; \\ S_{kp v} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix} n_{pv} \quad p=0.$$

В частности, при  $n_T=1-5$  имеет место отстающий сдвиг токов  $i_{ck}$ ,  $i_{lk}$  а при  $n_T=7-11$  – опережающий, причем, при  $n_T=10-12$  и  $n_T=1-3$  происходит увеличение модуля потребляемого из сети тока, а при  $n_T=4-5$  и  $n_T=7-8$  – его уменьшение. На рис.2 показаны графические зависимости  $\psi_{HK}=f(n_T, K_T=W_1/W_2)$ ,  $\psi_{IC}=f(n_T, K_T)$  для  $\cos\varphi=0,98$ : 1 –  $K_T=10$ ; 2 –  $K_T=5$ ; 3 –  $K_T=4$ ; 4 –  $K_T=3$  полученные расчетным путем  $\cos\varphi=0,98$  по (11) – (13). Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности управления потоками активных и реактивных мощностей, а также дают

возможность оценить влияние на них параметров и схемы соединения ВДТ.

### Литература (References)

- [1] A.S. Nr 1170567 (SSR) Reguliruemyi m-faznyi preobrazovately peremennogo napreajenia v peremennoe [Adjustable m-phase converter AC to AC] / *Ignaikin A.I., Novskiy V.A.* Publ. biul. Nr 28, 1985.
- [2] AS. Nr 1636963 (SSSR) Trehfaznyi preobrazovately peremennogo napreajenia v peremennoe / [Three-phase AC to AC converter] *Lipkovsyy K.A., Mihailov A.M., NOvskiy V.A., Sagatenko E.H., Holmskiy D.B.* Nr 11, 1988.
- [3] *Nazarov V.V.* Konceptsia Smart Grid i realinaia energhetika // [Smart Grid framework and real energetics] *Energhetika i elektrifikatsia* [Energetics and electrification], 2013, Nr 6, pp. 12-15
- [4] *Shidlovskiy A.K., Kuznetsov V.G.* Povyshenie kachestva energhii v electrichestskih seteah. [The increase of energy quality in electric networks] *Naukova Dumka*, 1985, s. 268
- [5] *Novskiy V.A., Golubev V.V., Kozlov A.V., Boiko P.S.* Bystrodeistvuiuschee uravnoveshivanie trehfaznoi chetirehprovodnoi sistemy s pomoschiu transformatorno-kliuchevykh preobrazovatelei. *Tehn. electrodinamika*. [High-speed balancing of a three-phase four-wire system using a transformer-core transformers].
- [6] *Tem. vypusk «Silova elektronika ta energoefektivnosti»* [Power electronics and energy efficiency]. – 2007. – pt. 3, 7-12.
- [7] *Lipkivskiy K.O.* Optimizatsia rozrahunkovykh karakteristik vikonavchih struktur diskretnih stabilizatoriv naprughi // [optimization of the design characteristics of the executive structures of discrete voltage regulators] *Pratsi IED NANU* [Proceedings of Institute of Electrodynamics]. – 2006. – NR 2(14), 98-99.
- [8] *Leires L.V.* Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. – M., 1981. – 392 p.

### Сведения об авторах.



**Говоров Филипп Парамонович** Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, профессор кафедры «Системы электроснабжения и потребления городов», руководитель Центра энерго-эффективных технологий. Автор более 700 публикаций, 25 патентов, 50 научно-технических разработок, является членом ряда специализированных ученых советов, академик Академии наук высшего образования Украины, академик Академии наук Республики Сербской. Основные направления деятельности: «Комплексная оптимизация параметров и режимов систем электроснабжения и освещения городов», «Автоматизация режимов систем электроснабжения и освещения городов». E-mail: [govorov\\_fp@mail.ru](mailto:govorov_fp@mail.ru)



**Говоров Владлен Филиппович** Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, научный сотрудник научно-исследовательской части. Основные направления работы: энергореновация объектов социально-культурного и бытового назначения. Автор более 25 научных публикаций, участник всеукраинских и международных научно-технических конференций по светотехнике и электроэнергетике. E-mail: [vladlen\\_govorov@mail.ru](mailto:vladlen_govorov@mail.ru)



**Романова Татьяна Ивановна** Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, научный сотрудник научно-исследовательской части. Основные направления работы: повышение эффективности внутреннего освещения путем, осветительных установок и систем на основе светодиодных источников света и контроля режимов их работы. Автор более 60 научных публикаций, участник всеукраинских и международных научно-технических конференций по светотехнике и электроэнергетике. E-mail: [ttatianai@mail.ru](mailto:ttatianai@mail.ru)

*Articolul a fost prezentat la Conferinta "Energetica Moldovei 2016"*