



THE CONTROL OF FLUXES OF ELECTRIC POWER IN THE NETWORKS BY MEANS OF PHASE-SWITCHING BOOSTER TRANSFORMERS

Filip GOVOROV, Vladlen GOVOROV, Tatiana ROMANOVA
Kharkiv National University of Municipal Economy named after A.N. Beketov

Abstract: Problems of increasing the efficiency of the operation of electrical networks based on the utilization of booster transformers (BT) with electronic control, applied in the scope 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 treated 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 recovery 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's decreasing. On the base of the analysis of the results of research have been proposed the diagram and constructive models of the transformer, as well as were investigated the processes inside in the quasi-station and transient regimes, on the base of which have been determined the conditions of reliable operation in such the regimes. 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 CU FLUXURILE DE ENERGIE ELECTRICĂ ÎN REȚELE PRIN INTERMEDIUL TRANSFORMATOARELOR DE RAPEL DE RECOMUTARE A FAZELOR

Filip GOVOROV, Vladlen GOVOROV, Tatiana ROMANOVA
Universitatea Națională a Economiei Municipale A.N. Bechetov din Harkov

Rezumat: Sunt examinate problemele sporirii eficienței funcționării rețelelor electrice în baza aplicării transformatoarelor de rapel cu dirijare electronică, la utilizarea lor în calitate de elemente active a rețelelor electrice inteligente a sistemelor energetice și la atribuirea lor a funcțiilor de corectare automată a parametrilor regimurilor rețelei, care asigură condițiile cumulate optime de funcționare. Este elaborat modelul matematic al proceselor în rețelele electrice cu transformator de rapel. S-a demonstrat, pentru grupele 1-5 ale transformatorului are loc consum de putere adăugător din rețeaua de alimentare, iar la grupele 7-11 recuperarea ei din rețeaua de sarcină. 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. În care, pentru grupurile de comutare 10-11 și 1-2 se observă creșterea tensiunii la ieșirea transformatorului, dar pentru grupurile 7-8 și 4-5 descreșterea. În baza analizei rezultatelor cercetărilor sunt propuse modelele schematice și de construire a transformatoarelor, de asemenea sunt studiate procesele din ele în regimuri tranzitorii și quasi-staționare, care au servit ca bază pentru determinarea condițiilor de funcționare stabilă în aceste regimuri. Sunt propuse căile de sporire a eficienței funcționării transformatoarelor împreună cu rețeaua la conectarea tiristoarelor în rețeaua înfășurării primare a transformatorului.

Cuvinte-cheie: transformator de 4 rapel, tiristor, puterea activă, puterea reactivă.

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Ф.П. Говоров, В.Ф. Говоров, Т.И. Романова
Харьковский Национальный Университет Городского Хозяйства имени А.Н. Бекетова

Реферат - 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.*

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

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

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

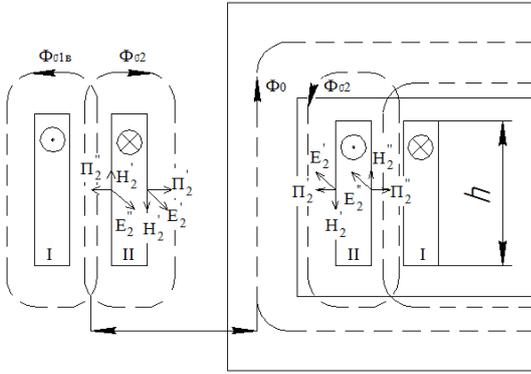


Рис.1. Картина вектора Пойнтинга в ВДТ

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

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

Для усредненного по объему V электромагнитного поля имеем

$$W_{\text{эм}} = \frac{1}{2} (D \cdot E + B \cdot H) V = \frac{1}{2} (w_{\text{э}} + w_{\text{м}}) V \quad (3)$$

где D , B -векторы электрического смещения и магнитной индукции соответственно; $w_{\text{э}}$, $w_{\text{м}}$ - объемные плотности энергии электрического и магнитного полей; $V = I \cdot S$ - объем, в котором существует магнитное поле; I , S - длина и площадь поверхностей, ограничивающих объем V ; ϵ , μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости. На основании закона сохранения заряда и электромагнитной индукции [6] имеем

$$\begin{aligned} D &= -\frac{1}{S_D} \int_0^t i dt; & E &= \frac{e}{l_e}; \\ B &= -\frac{1}{S_B} \int_0^t e dt; & H &= \frac{i}{l_H} \end{aligned} \quad (3)$$

где l_e , l_H - усредненные длины силовых линий потоков

векторов E и H ; S_d , S_b - усредненные 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

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

Учитывая гармонический характер параметров режима

$$\begin{aligned} i &= \sum_v I_{mv} \sin \omega t; \\ e &= \sum \pm E_{mv} \sin(\omega t + \delta_{Ev}) \end{aligned}$$

получим выражение для мгновенной электромагнитной энергии ВДТ

$$w_{\text{эм}} = \sum_v -\frac{\pm E_{mv} I_{mv}}{2} \left[t \cdot \cos \delta_{Ev} - \frac{1}{2\omega v} \sin(2\omega t + \delta_{Ev}) \right]$$

где $+E_{mv}$ - соответствует режиму согласного включения обмоток, а $-E_{mv}$ - 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

$$\int_V \gamma E^2 dv = \int [E \times H] dS_D = \frac{i \cdot r}{h} \cdot \frac{1}{2\pi R} S_D = i^2 r \quad (5)$$

где R , l - радиус и длина обмоточного провода;

С учетом гармонического характера параметров режима

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

Первое слагаемое разности (6) представляет поток активной мощности $\Pi'_{1a} = P_{\text{эм}1}$, передаваемой магнитному полю в межобмоточном пространстве первичной обмоткой $P_{\text{эм}1} = \sum_v E_{1v} I_{1v} \cos \delta_{1v}$ в режиме согласного включения, либо вторичной $\Pi''_{2a} = P_{\text{эм}2}$, ($P_{\text{эм}2} = \sum_v E_{2v} I_{2v} \cos \delta_{2v}$) - в режиме встречного включения. Часть этой мощности $\Pi''_{2a} = P_{\text{эм}12}$, ($P_{\text{эм}12} = \sum_v E_{1v} I_{2v} \cos \delta'_{2v}$) - передается встречной обмотке в режиме согласного включения, либо

первичной $\Pi'_{1a} = P_{эм2}$, ($P_{эм2} = \sum_V E_{2v} I_{1v} \cos \delta_{1v}$) - в режиме встречного включения.

Другая часть мощности $\Pi'_{1a} = \Delta P_{c1}$ ($\Delta P_{c1} = \sum_V E_{1v} I_{01v}$) в режиме согласного включения, либо $\Pi''_{2a} = \Delta P_{c2}$ ($\Delta P_{c2} = \sum E_{2v} I_{02v}$) - 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

$$P_i = \pm P_{эмi} + \Delta P_{Mi} = \sum_V (\pm E_{iV} I_{iV} \cos \delta_{iV} + I_{iV}^2 r_i) \quad (7)$$

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 Π'_1, Π''_1 и Π'_2, Π''_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 $Q_{эм1}$, передаваемой первичной обмотке ($Q_{эм1} = \sum E_{1v} I_{1v} \sin \delta_{1v}$), в режиме согласного, либо вторичной ($Q_{эм2} = \sum E_{2v} I_{2v} \sin \delta_{2v}$) в режиме встречного включения. Части этих мощностей ($\Delta Q_1 = \sum E_{1v} I_{2v} \sin \delta_{2v}$) в режиме согласного включения либо $\Delta Q_2 = \sum E_{2v} I_{1v} \sin \delta_{1v}$ - в режиме встречного включения, передаются во вторичную обмотку, в первом случае, либо в первичную - во втором. Другая часть мощности ($\Delta Q_{01} = \sum E_{1v} I_{01av}$), в режиме согласного либо ($\Delta Q_{02} = \sum E_{2v} I_{02av}$) - 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 $\Delta Q_{эмi}$ и мощностей, расходуемых на компенсацию магнитных потерь ΔQ_{Mi}

$$Q_i = \pm Q_{эмi} + \Delta Q_{Mi} = \sum \pm E_{iV} I_{iV} \sin \delta_{iV} + I_{iV}^2 x_{\sigma iV} \quad (8)$$

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).

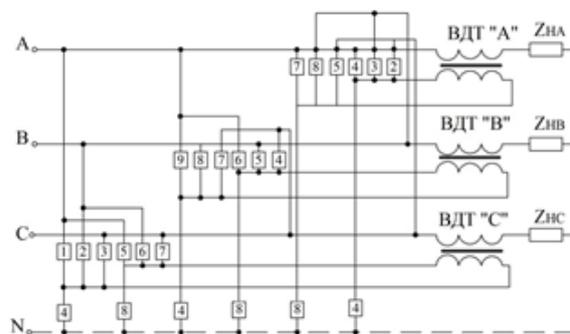


Рис.2 Схема подключения ВДТ

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:

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

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

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

где v – номер гармоники; Ψ_{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

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

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

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

Выражение для тока i_{ck} , потребляемого из сети, имеет вид:

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

где i_{lk} , i_{hk} , i_{ck} – токи первичной обмотки ВДТ, нагрузки и сети, соответственно; Ψ_{E2Kv} , Ψ_{HKv} , Ψ_{I0Kv} , Ψ_{ICKv} – фазовые сдвиги ЭДС E_2 и токов i_h , 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; $a = e^{j2\pi/3}$;

$$S_{kp v} = \begin{cases} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix} & \text{при } p = 1; \\ \begin{vmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{vmatrix} & \text{при } p = 2; \\ \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix} & \text{при } p = 0 \end{cases}$$

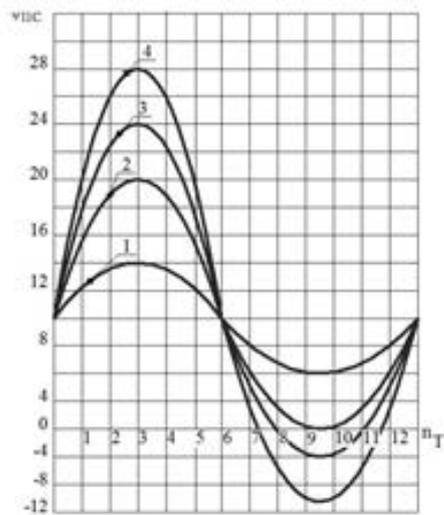


Рис. 3

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_{ik} в первичной обмотке ВДТ, а также ток сети $i_{ск}$, 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. В частности, при $n_T=1-5$ имеет место отстающий сдвиг токов $i_{ск}$, i_{ik} 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 $\psi_{ik}=f(n_T, K_T= W_1/W_2)$, $\psi_{11c}=f(n_T, K_T)$ 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.

- [1] А.С. №1170567 (ССР) Регулируемый m-фазный преобразователь переменного напряжения в переменное / Игнайкин А.И., Новский В.А. Оpubл. бюл. № 28, 1985.
- [2] А.С. № 1636963 (СССР) Трехфазный преобразователь переменного напряжения в переменное / Липковский К.А., Михайлов А.М., Новский В.А., Сагатенко Е.Н., Холмский Д.В. Оpubл. бюл. № 11, 1988.
- [3] Назаров В.В. Концепция Smart Grid и реальная энергетика // Энергетика и электрофикация, 2013, №6, с. 12-15
- [4] Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях // Наукова Думка, 1985, с. 268 с.
- [5] 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.
- [6] Липківський К.О. Оптимізація розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги // Праці ІЕД НАНУ. – 2006. - №2(14). – С. 98-99.

- [7] Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.



Говоров Филипп Парамонович

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, профессор кафедры «Систем электроснабжения и потребления городов», руководитель Центра энерго-эффективных технологий, govorov_fp@mail.ru.

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».



Говоров Владлен Филиппович

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, научный сотрудник научно-исследовательской части, vladlen_govorov@mail.ru.

Основные направления работы: энергосервис объектов социально-культурного и бытового назначения. Автор более 25 научных публикаций, участник всеукраинских и международных научно-технических конференций по светотехнике и электроэнергетике.

светотехнике и электроэнергетике.



Романова Татьяна Ивановна

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, научный сотрудник научно-исследовательской части, ttatianai@mail.ru.

Основные направления работы: повышение эффективности внутреннего освещения путем, осветительных установок и систем на основе светодиодных источников света и контроля за режимами их работы. Автор более 60 научных публикаций, участник всеукраинских и международных научно-технических конференций с светотехники и электроэнергетики.