

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОГО ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Калинин Л.П., Голуб И.В., Зайцев Д.А., Тыршу М.С.
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. В связи с дальнейшим развитием объединенных энергосистем возрастают роль и значение фазорегулирующих устройств, обеспечивающих перераспределение потоков мощности в ветвях электрических сетей. При этом появляются новые технические решения, обеспечивающих реализацию этих управляющих воздействий, что влечет за собой необходимость сопоставления данной разработки с уже существующими устройствами. В работе рассматриваются технические характеристики двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства, которые в дальнейшем предполагается использовать для сравнения с другими конкурирующими разработками и оценки их технической эффективности.

Ключевые слова: Фазорегулирующий трансформатор, угол фазового сдвига, коэффициент трансформации, комплексный коэффициент преобразования, расчетная мощность устройства.

MODELAREA CARACTERISTICILOR INSTALAȚIEI DE REGLARE A DECALAJULUI DE FAZĂ CU DOUĂ TRANSFORMATOARELE

Calinin L., Golub I., Zaitsev D., Tîrșu M.,
Institutul de Energetică al AȘM, Republica Moldova

Rezumat. Datorită dezvoltării în continuare sistemelor energetice unificate, crește rolul și valoarea instalațiilor de reglare a decalajului de fază ce asigură redistribuirea curenților de putere în ramurile rețelelor electrice. Totodată, apar noi soluții tehnice care asigură realizarea efectului analogic de dirijare, ceea ce conduce la necesitatea comparării acestor elaborări cu instalațiile deja existente. În lucrare se examinează caracteristicile tehnice ale instalației de reglare a decalajului de fază cu două transformatoare, care se preconizează spre utilizare pe viitor în calitate de bază pentru comparație cu alte elaborări concurente și estimarea eficienței tehnice a lor.

Cuvinte-cheie: Transformator de reglare a decalajului de fază, unghiul decalajului de fază, coeficient de transformare, coeficient de transformare complex, puterea nominală a instalației.

SIMULATION OF CHARACTERISTICS OF DUAL-CORE PHASE SHIFTING TRANSFORMER

Calinin L., Golub I., Zaitsev D., Tirsu M.,
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The role and importance of phase shifting transformers are increased as a result of the further development of integrated power systems. This gives the rise to new technical solutions which entails the necessity of comparison of new developments with existing. The article consider the technical characteristics of dual-core phase shifting transformer which later will be used as a basis for comparison with other competing options and assess of their technical efficiency.

Keywords: Phase shifting transformer, phase shift angle, transformation ratio, comprehensive conversion factor

Введение

Задачи обеспечения эффективного управления установившимися и переходными режимами электроэнергетических систем остаются одними из наиболее актуальных. Их

решение может быть достигнуто различными способами, одним из которых является фазовое управление режимами на основе применения фазорегулирующих трансформаторов. Настоящая работа посвящена исследованию технических характеристик двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства, которое в дальнейшем предполагается использовать в качестве основы для сравнения с другими вариантами разрабатываемых фазоповоротных устройств.

1. Основные соотношения, характеризующие связь между входными и выходными величинами устройства

Наиболее широкое практическое применение в энергосистемах получил вариант фазорегулирующего устройства [1-5], схема которого представлена на рис.1. Основными элементами данного устройства являются два силовых трансформатора, один из которых выполняет функции намагничивающего (или параллельного), другой – функции фазосдвигающего (или последовательного) элемента. На схеме рис.1 обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора помечены индексом «*p*», обмотки и электрические величины фазосдвигающего трансформатора - индексом «*q*».

Схему электрических соединений устройства на стороне высокого напряжения характеризует рис.1а, схему электрических соединений на стороне низкого напряжения – рис.1б.

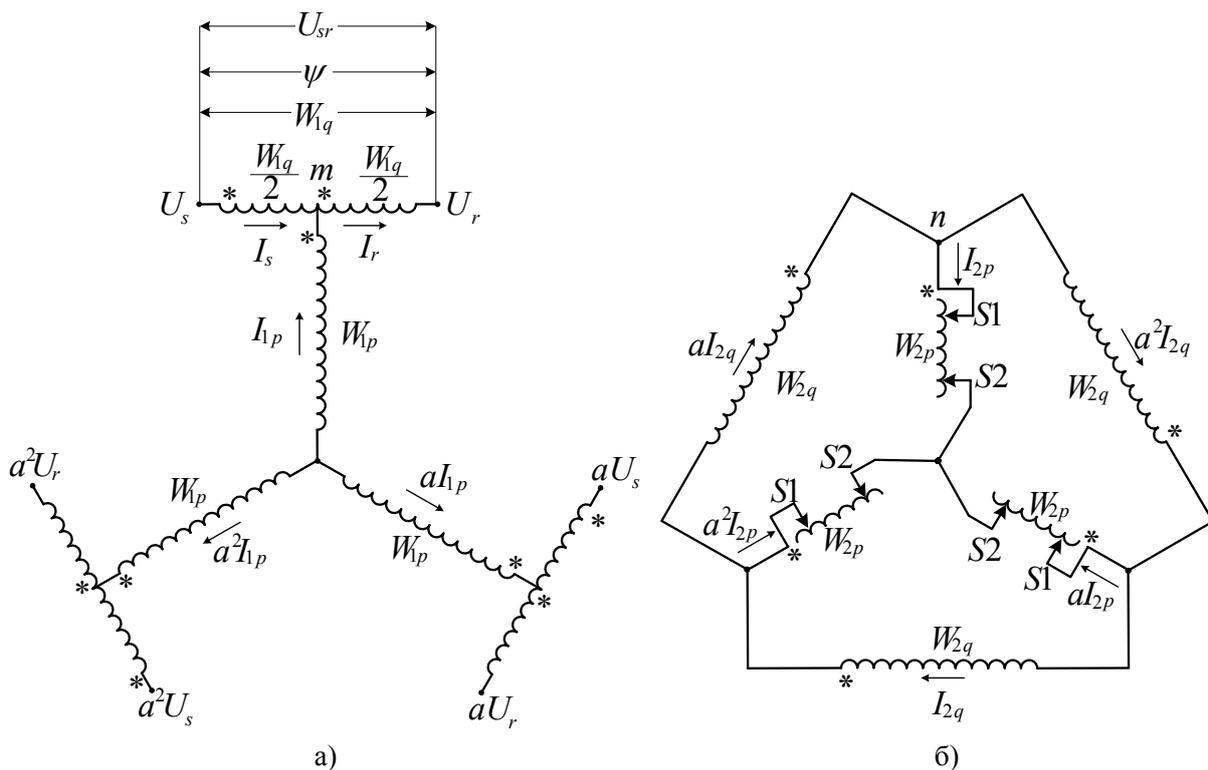


Рис.1. Схема двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства

Регулирование фазового сдвига ψ выходного напряжения U_r относительно напряжения на входе U_s осуществляется встречным перемещением контактов $S1, S2$

механизма переключения под нагрузкой по ответвлениям низковольтной регулировочной обмотки W_{2p} намагничивающего трансформатора.

Высоковольтная обмотка фазосдвигающего трансформатора W_{1q} оборудована средней точкой « m », к которой подключается высоковольтный вывод обмотки W_{1p} намагничивающего трансформатора. Этим достигается достаточно высокая стабильность выходного напряжения по величине в процессе регулирования угла ψ .

При данных условиях уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора может быть записано следующим образом:

$$I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q}. \quad (1)$$

Ток вторичной обмотки фазосдвигающего трансформатора, получаемый из этого уравнения (1), характеризуется соотношением:

$$I_{2q} = \frac{1}{2k_q} (I_s + I_r), \quad (2)$$

где $k_q = \frac{W_{2q}}{W_{1q}}$ коэффициент трансформации.

При равенстве модулей входного и выходного напряжений, как это имеет место в рассматриваемом случае, будет обеспечиваться и равенство модулей входного и выходного токов нагрузки. Указанные токи будут отличаться только по фазе. Поэтому связь между токами I_s и I_r характеризуется следующим образом:

$$I_r = I_s e^{j\psi}. \quad (3)$$

Тогда выражение для токов вторичной обмотки (2) фазорегулирующего трансформатора приобретает вид:

$$I_{2q} = \frac{1 + e^{j\psi}}{2k_q} I_s = \frac{1}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (4)$$

Модуль этого тока

$$|I_{2q}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s.$$

Здесь и в дальнейшем будем считать, что ток I_s совмещен с осью действительных значений. Это позволит выразить через него все токи в других элементах схемы фазорегулирующего трансформатора.

Далее определим характер изменения токов в обмотках намагничивающего трансформаторного элемента. Для узла « n » системы обмоток низкого напряжения можно записать:

$$aI_{2q} = I_{2p} + a^2 I_{2q} \quad (5)$$

Или

$$I_{2p} = (a - a^2) I_{2q} = j\sqrt{3} I_{2q}.$$

С учетом ранее установленного соотношения для тока I_{2q} (4) получим:

$$I_{2p} = j \frac{\sqrt{3}}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (6)$$

Модуль этого тока изменяется в соответствии с равенством:

$$|I_{2p}| = \frac{\sqrt{3}}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} I_s.$$

Характер изменения тока I_{1p} в процессе регулирования угла ψ определим из уравнения баланса токов для узла « m » схемы соединения высоковольтных обмоток:

$$I_{1p} = I_r - I_s = (e^{j\psi} - 1) I_s = j2 \sin \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (7)$$

Модуль этой величины имеет следующее выражение

$$|I_{1p}| = 2 \sin \frac{\psi}{2} I_s.$$

Коэффициент трансформации намагничивающего трансформаторного элемента является переменной величиной, которая при изменении взаимного расположения регулировочных контактов S_1 и S_2 может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Данная переменная величина может быть представлена следующим образом:

$$k_{pf} = k_y k_p, \quad (8)$$

где: k_{pf} изменяющийся при регулировании коэффициент трансформации намагничивающего элемента,

$k_p = \frac{W_{2p}}{W_{1p}}$ полное соотношение числа витков вторичной обмотки этого элемента

относительно первичной,

k_y текущая координата управления, изменяющаяся в пределах от $k_y = -1$ до

$k_y = 1$.

Тогда с учетом представленных выше значений токов I_{1p} и I_{2p} (6,7) можно записать:

$$k_{pf} = k_y k_p = \frac{I_{1p}}{I_{2p}} = \frac{2 \sin \frac{\psi}{2}}{\sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2}} k_q = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \operatorname{tg} \frac{\psi}{2},$$

или

$$\operatorname{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{k_p}{k_q} k_y = \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} k_y, \quad (9)$$

где

$$\operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{k_p}{k_q}.$$

Данное соотношение (9) определяет связь между k_q и k_p при заданных ψ_{\max} и k_p .

Таким образом, максимальный фазовый сдвиг определяется величинами k_p и k_q , а текущее значение угла ψ определяется значением k_y :

$$k_y = \frac{\operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}. \quad (10)$$

Из рассмотренной схемы электрических соединений вытекают следующие уравнения связи между токами в элементах устройства:

$$\begin{aligned} I_{1p} &= I_r - I_s, \\ I_{2q} &= \frac{1}{2k_q}(I_s + I_r), \\ I_{2p} &= j\sqrt{3}I_{2q} = j\frac{\sqrt{3}}{2k_q}(I_s + I_r), \\ I_{1p} &= k_y k_p I_{2p} = jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}(I_s + I_r), \\ jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}(I_s + I_r) &= I_r - I_s. \end{aligned} \quad (11)$$

Последнее из этих уравнений позволяет выразить закон преобразования фазы тока на выходе устройства (I_r) относительно тока на его входе (I_s)

$$I_r = \frac{1 + jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} I_s = \dot{K} I_s. \quad (12)$$

Комплексный коэффициент преобразования \dot{K} из (12) может быть разделен на действительную и мнимую составляющие:

$$\dot{K} = \cos \psi + j \sin \psi = \frac{1 - k_y^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\psi_{\max}}{2}} + j \frac{2k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\psi_{\max}}{2}}. \quad (13)$$

Мнимая составляющая ($j \sin \psi$) этого коэффициента является нечетной функцией угла ψ и может быть использована для определения связи между коэффициентом k_y и углом ψ :

$$\sin \psi = \frac{2k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\psi_{\max}}{2}}.$$

Выражая это равенство относительно k_y и решая полученное квадратное уравнение, приходим к результату:

$$k_y = \frac{\operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}. \quad (14)$$

Этот результат (14) совпадает с ранее полученным выражением связи между текущими значениями угла ψ и k_y (10), что подтверждает корректность выполненных преобразований.

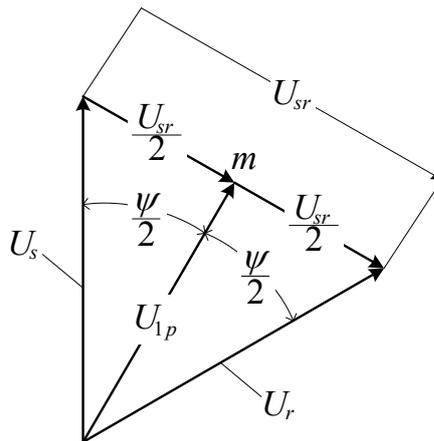


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений

Выше отмечалось, что одна из особенностей трансформаторного фазорегулирующего устройства состоит в том, что закон преобразования токов, осуществляемый устройством, полностью соответствует закону преобразования напряжений.

Проверим справедливость этого утверждения для рассматриваемого объекта.

На рис.2 изображена векторная диаграмма напряжений, позволяющая дать простейшее описание закона преобразования напряжений.

В соответствии с данной векторной диаграммой напряжение U_{1p} в точке « m » схемы соединения обмоток (рис.1) в процессе регулирования изменяется следующим образом:

$$U_{1p} = U_s \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}}. \quad (15)$$

Напряжение U_{2p} , кроме того, подвержено регулированию с помощью контактов РПН и может быть представлено так:

$$U_{2p} = k_{pf} U_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s. \quad (16)$$

Значение $k_{pf} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}$ получено ранее (8) при рассмотрении связи между токами I_s и I_r .

Зная U_{2p} , можно выразить значение U_{2q} :

$$U_{2q} = j\sqrt{3}U_{2p} = jk_y k_q \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s. \quad (17)$$

С другой стороны

$$U_{2q} = k_q U_{sr},$$

где U_{sr} напряжение между соответствующими входными (U_s) и выходными (U_r) клеммами устройства.

С учетом выше изложенного, напряжение U_{sr} приобретает следующую форму записи:

$$U_{sr} = j2 \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} U_s. \quad (18)$$

Из векторной диаграммы рис. 2 также следует:

$$U_s + U_r = 2 \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s.$$

Тогда

$$U_{sr} = j(U_s + U_r) k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}.$$

В свою очередь

$$U_r = U_s + U_{sr} = U_s + j(U_s + U_r) k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}$$

или

$$U_r - k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} U_r = U_s + j k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} U_s.$$

Выражая U_r через U_s , приходим к результату:

$$U_r = \frac{1 + k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} U_s = \dot{K} U_s. \quad (19)$$

Это означает, что коэффициент преобразования по току (12) полностью соответствует коэффициенту преобразования по напряжению (19).

Выполненный анализ позволяет представить следующие закономерности изменения токов и напряжений в элементах фазорегулирующего трансформатора.

Для возбуждающего элемента:

$$\begin{aligned} I_{1p} &= 2 \sin \frac{\psi}{2} I_s, & U_{1p} &= \cos \frac{\psi}{2} U_s, \\ I_{2p} &= \frac{\sqrt{3}}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} I_s, & U_{2p} &= \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s. \end{aligned} \quad (20)$$

Для фазосдвигающего элемента

$$\begin{aligned} I_{1q} &= I_s, & U_{1q} &= 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s, \\ I_{2q} &= \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s, & U_{2q} &= 2 k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s. \end{aligned} \quad (21)$$

Расчетная мощность каждого трансформаторного элемента определяется максимальными значениями токов и напряжений соответствующих обмоток.

Для возбуждающего элемента, согласно графика рис.3, максимальное значение тока $I_{1p(\max)}$ соответствует максимальному значению угла ψ , а максимальное значение тока $I_{2p(\max)}$ имеет место при $\psi = 0$. В то же время максимальное значение напряжения $U_{1p(\max)}$ имеет место при $\psi = 0$, а максимальное значение напряжения $U_{2p(\max)}$ наступает при $\psi = \psi_{\max}$.

Отсюда расчетная мощность возбуждающего элемента S_p , определяемая как полу сумма расчетных мощностей обмоток, получает выражение:

$$S_p = \frac{U_{1p(\max)} I_{1p(\max)} + U_{2p(\max)} I_{2p(\max)}}{2} = \frac{2U_s I_s \sin \frac{\psi_{\max}}{2} + 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{\max}}{2}}{2} = 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{\max}}{2}. \quad (22)$$

Для фазосдвигающего элемента значение тока I_{1q} в процессе регулирования остается неизменным $I_{1q} = I_{1q(\max)} = I_s = \text{const}$, а напряжение U_{1q} достигает своего максимума (U_s) при максимальном значении угла ψ . Максимальное значение тока $I_{2q(\max)}$ имеет место при $\psi = 0$, а напряжение $U_{2q(\max)}$ также достигает своего максимума (U_s) при $\psi = \psi_{\max}$.

При этом расчетная мощность фазосдвигающего элемента получит следующее выражение:

$$S_q = \frac{U_{1q(\max)}I_{1q(\max)} + U_{2q(\max)}I_{2q(\max)}}{2} = \frac{2U_s I_s \sin \frac{\psi_{\max}}{2} + 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{\max}}{2}}{2} = 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{\max}}{2}. \quad (23)$$

Полная расчетная мощность устройства ($S_{\text{ФРТ}}$) является суммой расчетных мощностей его элементов

$$S_{\text{ФРТ}} = S_p + S_q = 4U_s I_s \sin \frac{\psi_{\max}}{2}. \quad (24)$$

2. Верификация технических характеристик устройства на основе применения Simulink – модели

На основе принципиальной схемы рис.1 в среде Simulink (Matlab) была создана комплексная модель устройства, позволяющая проводить различные расчетные эксперименты с измерением всех необходимых для анализа параметров во всех элементах устройства.

Для удобства проведения расчетных экспериментов каждый из трансформаторов устройства представлен в модели в виде группы однофазных трансформаторов.

Параметры каждого элемента были определены исходя из $U_s = U_r = 230V$ и номинального тока нагрузки $I_r = 12A$.

Построенная модель была использована для проведения ряда расчетных экспериментов. Были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания, а также ряд нагрузочных испытаний, которые позволили определить энергетические характеристики устройства.

Для обобщения получаемых в дальнейшем результатов, как мощность ФРТ, так и мощности отдельных элементов представлены через полную мощность нагрузки на выходе устройства, которая может быть выражена как $S_r = U_r I_r$, где S_r - величина, устанавливаемая на стадии проектирования. Так для фазосдвигающего элемента

$\frac{S_q}{S_r} = 0,991$, для намагничивающего - $\frac{S_p}{S_r} = 0,952$. Таким образом типовая мощность

устройства в $\frac{S_{\text{ФРТ}}}{S_r} = 1,94$ раз больше мощности нагрузки.

Для проверки положений, изложенных в первом параграфе, авторами исследования по результатам расчетных экспериментов были построены сравнительные характеристики рис.3-5. На рисунках приведены зависимости токов, напряжений в элементах устройства, а также мощности устройства от независимой координаты управления k_y , рассчитанные по выведенным выражениям (в виде

непрерывных линий), а также полученные в результате расчетных экспериментов на Simulink модели (в виде звездочек).

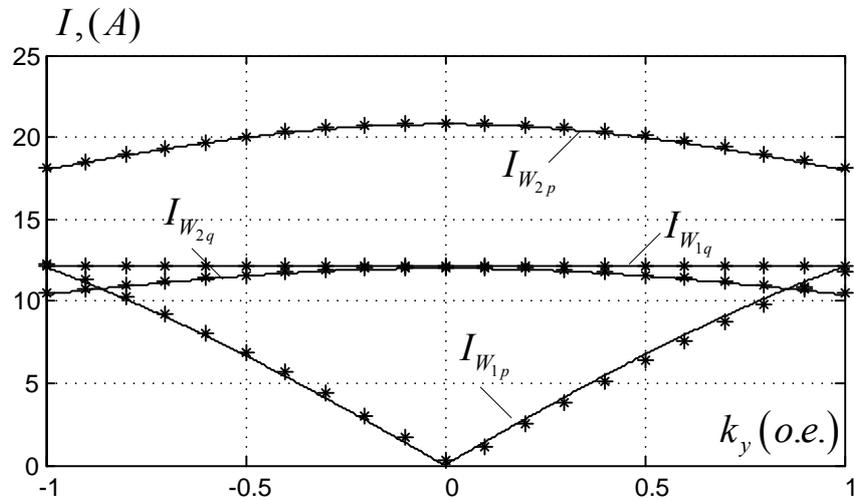


Рис.3. Характеристики токов в элементах устройства

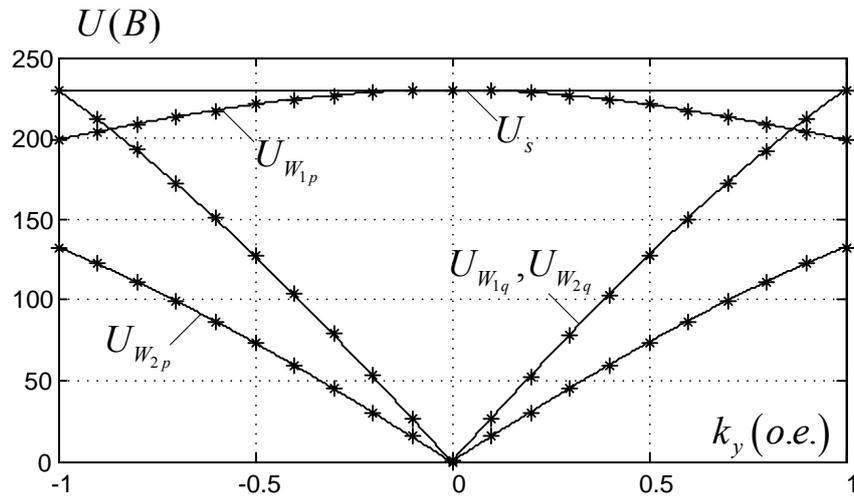


Рис.4. Характеристики напряжений на элементах устройства

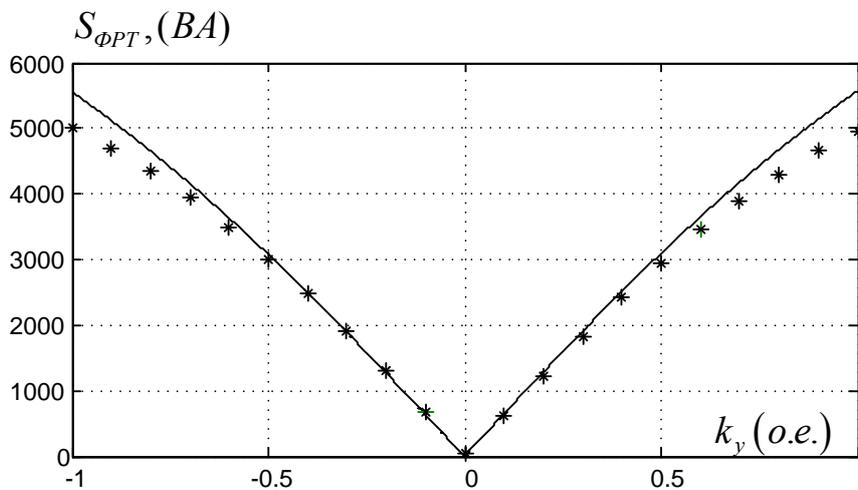


Рис.5. Характеристики мощности устройства

После анализа рис.3-5 можно констатировать совпадение результатов, полученных при исследовании устройства численным методом, так и на основе Simulink-модели, что говорит о корректности формирования первой.

Выводы

1. Получены уравнения, описывающие нормальный режим работы двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства в условиях регулирования фазового сдвига между входными и выходными электрическими величинами;
2. В среде Simulink (Matlab) создана комплексная модель устройства, на основе которой проведена серия расчетных экспериментов;
3. Проведен анализ изменения характерных параметров устройства в процессе регулирования угла фазового сдвига, который показал близость результатов полученных при различных видах моделирования;
4. Полученные результаты позволяют проводить сравнение данного варианта фазорегулирующего трансформатора с разрабатываемыми в перспективе техническими решениями.

Литература

- [1] A.Kramer, J.Ruff, Transformers for Angle Regulation Considering the Selection of On-Loas Tap-Changers, IEEE transactions on power delivery, Vol.13, No.2, April 1998, Page(s):518-525.
- [2] Luiz A. C. Lopes, Geza Joos, Boon-Teck Ooi, "A High-Power PWM Quadrature Booster Phase Shifter Based on a Multimodul AC Controller", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.13, No.2, March 1998
- [3] Жмуров В.,Стельмаков В.,Тарасов А., Гринштейн Б., Применение фазоповоротных устройств с тиристорным управлением при больших углах регулирования фазового сдвига, Известия Академии Наук Энергетика,2010 №5, стр.132-141.
- [4] Стельмаков В., Жмуров В., Тарасов А., Гринштейн Б., Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением, Энергетик 2010, №8, стр.20-23.
- [5] W. Kling, D.Klaar, J. Schuld and other, Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity, CIGRE 2004, C2-207, 21, rue d'Artois, F-750.

Сведения об авторах:



Калинин Лев Павлович
Окончил Одесский Политехнический Институт (Украина) в 1963 году. В 1982 году защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в НЭТИ г.Новосибирск (Россия). Область научных интересов связана с применением FACTS контроллеров в энергосистемах



Голуб Ирина Владимировна
окончила Кишиневский политехнический институт в 1989 году. Область научных интересов связана с исследованиями режимов энергосистем, управляемых линий электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности



Зайцев Дмитрий Александрович.

Окончил Кишиневский Политехнический Институт (Молдова) в 1985 году, Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в 2000 году в Институте Энергетики АН РМ. Научные интересы лежат в области исследования режимов энергосистем, содержащих гибкие межсистемные связи.



Тыршу Михаил Степанович.

Окончил Технический университет Молдовы в 1994 году. По специальности «Автоматизация и управление техническими системами». В 2003 году защитил диссертацию на степень кандидата технических наук. Основные исследования проводит в области управления транспортными сетями, диагностики высоковольтного оборудования, силовой электроники и др.