

## Control of Regime of Unified Interphase Power Controller by the Use of Rotary Transformer

**Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Kaloshin D.N., Golub I.V.**

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova  
Chisinau, Republic of Moldova

**Abstract.** Interphase Power Controller (IPC) has some properties of the source of the current. The use of these technical devices in electrical networks, in addition to optimization of the flow distribution, contributes to limiting of short-circuit currents and limits the level of distribution of electromechanical transients between energy systems. The increase of IPC controllability allows assigning some control function upon them and ensuring a more favorable operation of the energy system generators. We have studied a variant of such a device, which is controlled by a rotary phase-shifting transformer using the asynchronous electric machines with locked phase-wound rotor.

**Keywords:** unified interphase power controller (UIPC), rotary phase shifting transformer (RPST), power characteristics.

### **Dirijărea regimului de regulatorul parametric de putere de tip UIPC (Unified Interphase Power Controller) cu utilizarea convertorului electromecanic Calinin L.P., Zaițev D.A., Caloșin D.N., Golub I.V.**

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei  
Chisinau, Republica Moldova

**Rezumat.** Regulatorul parametric de putere, care prezintă un dispozitiv pasiv, are proprietățile unei surse de curent. Utilizarea instalațiilor tehnice de acest gen în rețelele electrice, concomitent cu optimizarea distribuției fluxurilor de putere, va contribui la limitarea curenților de scurtcircuit, precum, și limitare extinderii proceselor electromecanice tranzitorii între sistemele energetice. Totodată, sporirea gradului de controlabilitate a reglatoarelor parametrice de putere permite de a atribui acestor echipamente a unor funcții de dirijare, realizate de instalațiile și, astfel, se asigură condiții mai favorabile de funcționare a generatoarelor. În lucrare se examinează o variantă a unei astfel de instalații, care se reglează cu ajutorul transformatoarelor de reglare a unghiului decalajului de fază realizat în baza principiului mașinii electrice asincrone cu rotorul frânat.

**Cuvinte-cheie:** regulatorul parametric de putere, transformatorul de reglare a decalajului de fază, caracteristici energetice.

### **Управление режимом параметрического регулятора мощности типа UIPC (Unified Interphase Power Controller) с использованием электромеханического преобразователя**

**Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Калошин Д.Н., Голуб И.В.**

Институт энергетики Академии наук Молдовы  
Кишинев, Республика Молдова

**Аннотация.** Параметрический регулятор мощности, пассивный по своей природе, обладает свойствами источника тока. Применение технического устройства в электрических сетях, наряду с оптимизацией потокораспределения способствует ограничению токов короткого замыкания, а также сдерживанию распространения электромеханических переходных процессов между энергетическими системами. При этом повышение степени управляемости параметрических регуляторов мощности позволит переложить на них некоторую часть регулирующих функций и обеспечить более благоприятный режим работы системных генераторов. В работе исследован один из вариантов такого устройства, управляемый с помощью поворотных фазорегулирующих трансформаторов на основе асинхронных электрических машин с заторможенным фазным ротором.

**Ключевые слова:** параметрический регулятор мощности, поворотный фазорегулирующий трансформатор, энергетические характеристики.

#### **Введение**

Принцип управления режимом параметрического регулятора мощности с использованием средств силовой электроники, представленный в [1], основан на двухступенчатом преобразовании энергии

(выпрямление и инвертирование). Исследуемый в настоящей работе электромеханический преобразователь, обеспечивает прямую электромагнитную связь между входом и выходом устройства.

Схема включения [2] позволяет обеспечить плавное и непрерывное управление в условиях полного отсутствия гармонических искажений выходного напряжения и тока нагрузки. При этом быстродействие регулятора, как показывают системные исследования [3-13], вполне удовлетворяет требованиям управления в условиях переходных процессов, связанных с колебаниями угла  $\delta$  между узлами смежных энергосистем.

Электромеханический преобразователь представляет собой асинхронную электрическую машину с заторможенным фазным ротором, которая по своей сути является поворотным фазорегулирующим трансформатором (Rotary Phase Shifting Transformer – RPST). Из литературных источников известен RPST мощностью 250мВА при напряжении 25кВ, предназначенный для работы в режиме UPFC на линиях 500кВ одной из энергосистем Японии. Восьмиполюсное исполнение машины позволяет получить четыре градуса электрического сдвига трехфазной системы напряжений ротора на один градус его механического поворота, что обеспечивает высокую степень управляемости агрегата. Отзывчивость устройства на отработку максимального механического поворота 180° составляет менее 0,3 секунды.

#### Характеристика параметрического регулятора мощности на основе электромеханического преобразователя

Схемный вариант параметрического регулятора мощности на основе электромеханического преобразователя представлен на рис.1. Отличие этого варианта от ранее рассмотренного [1] состоит в том, что вместо электронного силового преобразователя используется электромеханический.

Вне зависимости от типа преобразователя (на базе силовой электроники или электромеханический) характер изменения активной  $P_r$  и реактивной  $Q_r$  мощностей на выходе устройства определяется представленными в [1] уравнениями:

$$\begin{aligned} P_r &= S_m \left[ \cos\left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr}\right) + \frac{m}{\sin\frac{\psi}{2}} \sin\alpha \right] \\ Q_r &= S_m \left[ \sin\left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr}\right) - \frac{m}{\sin\frac{\psi}{2}} \cos\alpha \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где } S_m = 2BU_s U_r \sin\frac{\psi}{2}.$$

Закон управления параметрами  $m$  и  $\alpha$  при заданных значениях  $P_r$  и  $Q_r$  вытекает из основных уравнений активной и реактивной мощности на выходе устройства (1) и формулируется следующим образом:

$$m = \sin\frac{\psi}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{P_r^2 + Q_r^2}{S_m^2} - \frac{2}{S_m} \left[ P_r \cos\left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr}\right) + Q_r \sin\left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr}\right) \right]}, \quad (2)$$

$$\alpha = \arctg \frac{P_r - S_m \cos\left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr}\right)}{S_m \sin\left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr}\right) - Q_r}.$$

Статорные обмотки двух поворотных трансформаторов  $RT1$  и  $RT2$  включены параллельно, роторные - последовательно. Для компенсации токов намагничивания электрических машин, значение которых существенно превышает токи намагничивания трансформаторов, целесообразно применять батарею статических конденсаторов  $C$ .

Каждая роторная обмотка подключается по автотрансформаторной схеме к началу соответствующей статорной обмотки. Механический поворот роторов сопровождается изменением фазового сдвига  $\beta_1$  и  $\beta_2$  напряжений ( $U_{RT1}$  и  $U_{RT2}$ ) соответствующих роторных обмоток, к концам которых подключены первичные обмотки добавочного трансформатора  $BT$ . Регулирование углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  обеспечивает изменение модуля ( $U_{BT1}$ ) и фазы ( $\alpha$ ) напряжений, питающих эти обмотки.

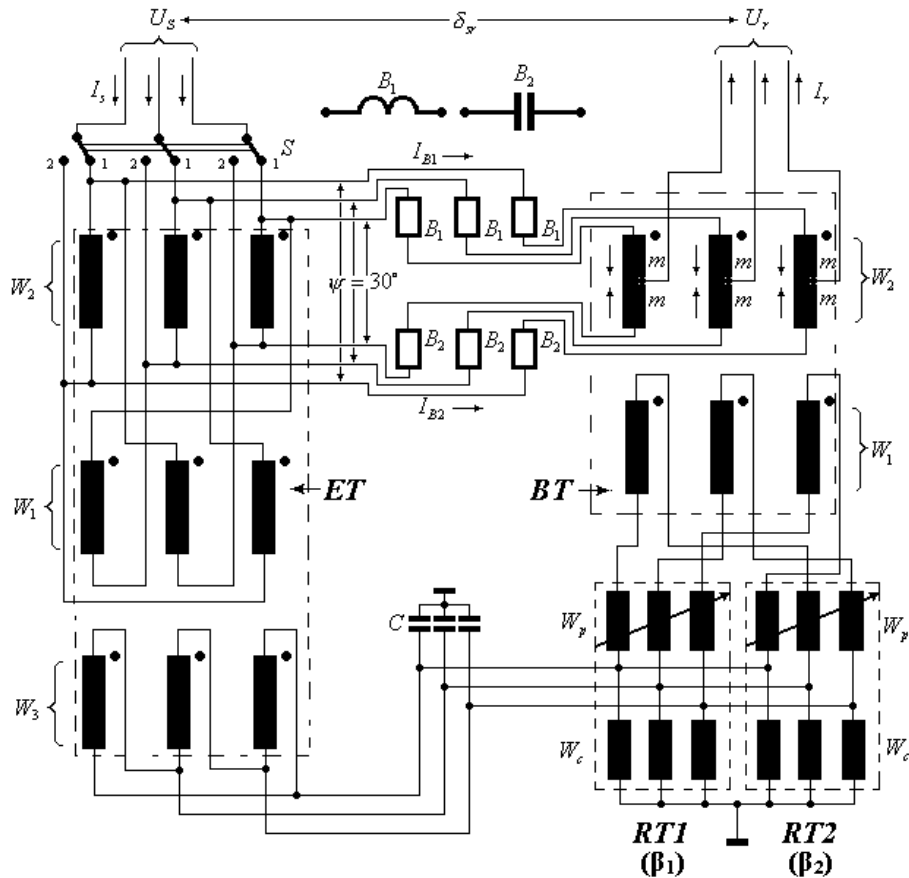


Рис.1. Схема параметрического регулятора мощности на основе электромеханического преобразователя.

### Варианты реализации схемы регулирования

В зависимости от соотношения чисел витков роторной ( $W_p$ ) и статорной ( $W_c$ ) обмоток регулятора могут быть созданы различные условия работы устройства.

В частности, при  $\frac{W_p}{W_c} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ , можно получить условия, представленные на рис.2.

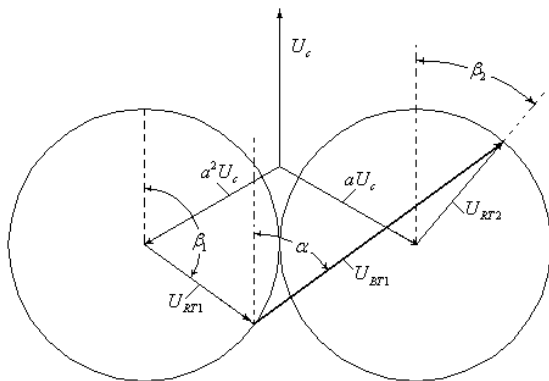


Рис.2. Условия работы устройства при  $\frac{W_p}{W_c} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ .

В этом случае векторы напряжений  $U_{RT1}$  и  $U_{RT2}$  вращаются каждый вокруг своего центра, не пересекаясь. При  $\beta_1 = 90^\circ$  и  $\beta_2 = 270^\circ$  разность этих векторов равна нулю. При  $\beta_1 = 270^\circ$  и  $\beta_2 = 90^\circ$  разность этих векторов, а значит и напряжение  $U_{BT1}$ , достигает своего максимального значения.

Применение этого варианта позволяет обеспечить существенное (в два раза) снижение суммарной расчетной мощности электрических машин, образующих регулятор. В этом случае максимальное напряжение снимаемое с регулятора (при  $\beta_1 = 270^\circ$  и  $\beta_2 = 90^\circ$ ), оказывается результатом суммирования напряжения вторичной обмотки  $W_3$  трансформатора  $ET$  и двух роторных обмоток поворотных трансформаторов. Сумма напряжений двух роторных обмоток равна напряжению обмотки  $W_3$ . Таким образом, регулятор несет только половину нагрузки цепи управления. Покрывание второй половины нагрузки возлагается на обмотку  $W_3$  трансформатора

ET. Созданное таким образом (эквивалентное автотрансформаторному) включение элементов устройства и определяет эффективность предлагаемой схемы.

Напряжение, приложенное к первичной обмотке добавочного трансформатора, будет определяться соотношением:

$$\dot{U}_{BT1} = \frac{\sqrt{3}}{2} [(\cos \beta_2 - \cos \beta_1) + j(2 + \sin \beta_2 - \sin \beta_1)] U_c \quad (3)$$

где  $U_c$  - напряжение статорной обмотки ( $U_c = 1$ ).

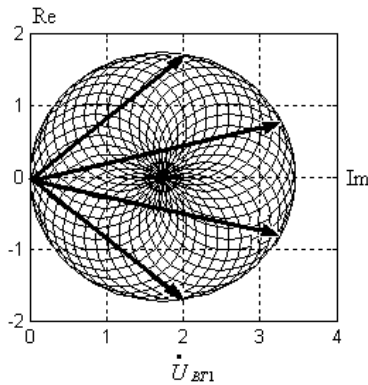


Рис.3. Характер изменения напряжения  $\dot{U}_{BT1}$  при свободном регулировании углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

Характер изменения напряжения  $\dot{U}_{BT1}$  при произвольном регулировании углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  иллюстрирует рис.3. Заштрихованная область полученной фигуры определяет совокупность возможных состояний устройства.

Напряжение высоковольтной обмотки добавочного трансформатора  $\dot{U}_{BT2} = 2k \cdot \dot{U}_{BT1}$ , (где  $k$  - коэффициент трансформации), изменяется при этом в пределах фигуры, изображенной на рис.4.

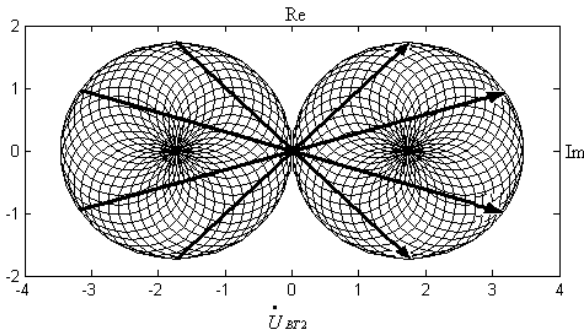


Рис.4. Напряжение высоковольтной обмотки добавочного трансформатора.

Стратегия управления режимом ПРС сводится к регулированию параметров  $m$  и  $\alpha$  в зависимости от задаваемых условий обмена мощностью между узлами системы.

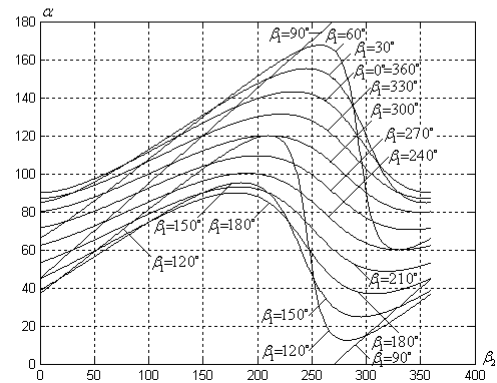
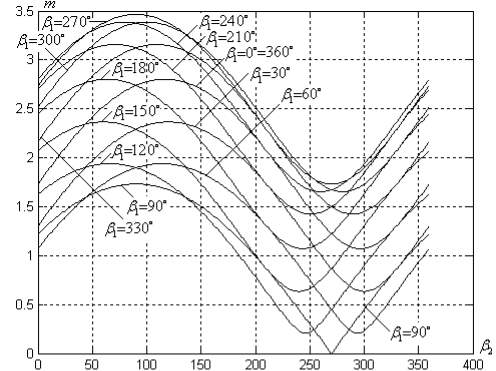


Рис.5. Полная область изменения  $m$  и  $\alpha$  при регулировании углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

Определяя текущие значения  $m$  и  $\alpha$  при заданных значениях  $P_r$  и  $Q_r$  в соответствии с равенствами (2) можно установить необходимые величины углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  из условий:

$$\begin{aligned} \sin \beta_2 - \sin \beta_1 &= \frac{2}{\sqrt{3}} (m \cdot \sin \alpha - \sqrt{3}), \\ \cos \beta_2 - \cos \beta_1 &= \frac{\sqrt{3}}{2} m \cdot \cos \alpha. \end{aligned}$$

Раскрывая эти уравнения относительно  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , приходим к результату:

$$\begin{cases} \beta_1 + \beta_2 = 2 \arctg \frac{m \cdot \cos \alpha}{\sqrt{3} - m \cdot \sin \alpha} \\ \beta_1 - \beta_2 = -2 \arcsin \sqrt{\frac{3 + m^2 - 2\sqrt{3} \cdot m \cdot \sin \alpha}{3}} \end{cases} \quad (4)$$

Механический поворот роторов соответствующих асинхронных машин на

углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  будет определять задаваемое регулирующее воздействие.

Полная область изменения  $m$  и  $\alpha$  при регулировании углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  иллюстрируется графиками рис.5.

Дополнительно на рис.6 показаны графики для параметра  $m$ . Указанные графики условно разделены на два семейства  $\beta_1 = 0 \div 180^\circ$  и  $\beta_1 = 180 \div 360^\circ$ , поскольку при совмещенном их представлении в виде одного графика исчезает пространственное восприятие картины.

Рассмотренная ситуация может считаться недостаточно комфортной с точки зрения свободы управления, поскольку значения угла  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$  соответствуют нулевому значению  $U_{BT1}$ . В практических же условиях может возникнуть необходимость использования этих значений углов при  $U_{BT1} \neq 0$ , что определяет возможность регулирования реактивной мощности.

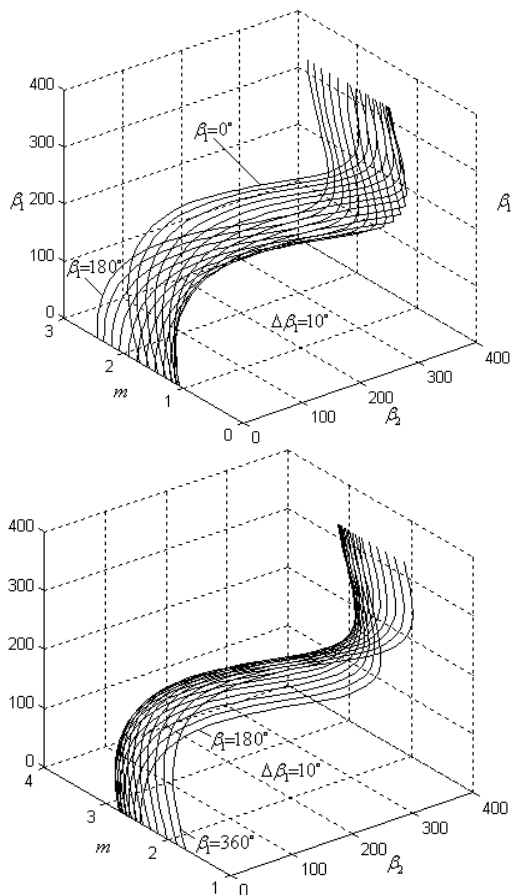


Рис.6. Пространственные графики для параметра  $m$ .

Устранить указанный недостаток можно за счет некоторого изменения соотношения витков роторной и статорной обмоток.

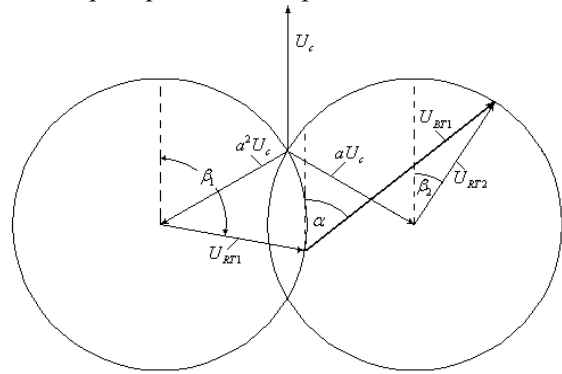


Рис.7. Условия работы устройства при  $\frac{W_p}{W_c} = 1$ .

Например,  $\frac{W_p}{W_c} = 1$ . В этом случае, как показано на рис.7, окружности, описываемые векторами  $U_{RT1}$  и  $U_{RT2}$ , пересекаются, что позволяет обеспечить более широкие возможности управления по углу  $\alpha$ . Это приводит к тому, что вместо двукратного снижения расчетной мощности электрических машин, мы получаем снижение этой величины в  $\sqrt{3}$  раза. Тем не менее, такое решение может считаться вполне оправданным.

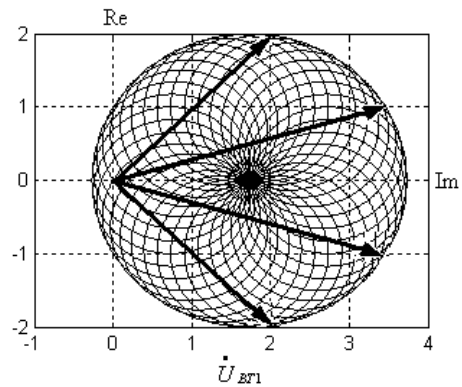


Рис.8. Комплексная область значений напряжения  $\dot{U}_{BT1}$ .

Фигура, определяющая комплексную область значений напряжения  $\dot{U}_{BT1}$ , изображена на рис.8. Соответственно фигура, характеризующая напряжение  $\dot{U}_{BT2}$  представлена на рис.9.

Характерные отличия данной ситуации очевидны. Значения  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$  соответствуют  $U_{BT1} = 1$ . Это свидетельствует

о существенном повышении гибкости управления, обеспечиваемой тем же агрегатом.

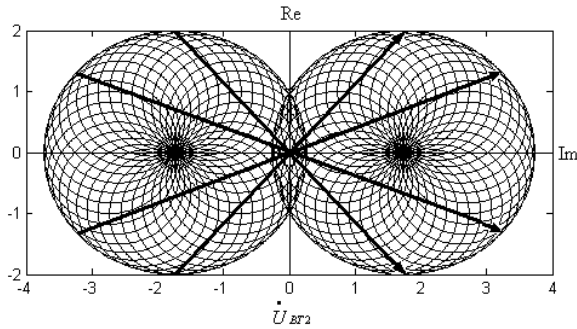


Рис.9. Комплексная область значений напряжения  $\dot{U}_{BT2}$ .

В этих условиях вектор напряжения  $U_{BT1}$  изменяется в соответствии с равенством:

$$\dot{U}_{BT1} = [(\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \pm \pm j(\sqrt{3} + \sin \beta_2 - \sin \beta_1)] U_c. \quad (5)$$

Тогда:

$$\alpha = \pm \arctg \frac{\sqrt{3} + \sin \beta_1 - \sin \beta_2}{\cos \beta_2 - \cos \beta_1}. \quad (6)$$

При заданных параметрах  $m$  и  $\alpha$  значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  определяются уравнениями:

$$\begin{cases} \beta_1 + \beta_2 = 2 \arctg \frac{m \cdot \cos \alpha}{\sqrt{3} - m \cdot \sin \alpha} \\ \beta_1 - \beta_2 = \mp 2 \arcsin \frac{\sqrt{3 + m^2} - 2\sqrt{3} \cdot m \cdot \sin \alpha}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Полные графики изменения  $m$  и  $\alpha$  в зависимости от  $\beta_1$  и  $\beta_2$  изображены соответственно на рис.10 и рис.11.

Таким образом, параметрический регулятор мощности на основе электромеханического преобразователя может рассматриваться в качестве перспективного регулирующего устройства для управления режимом ИРС.

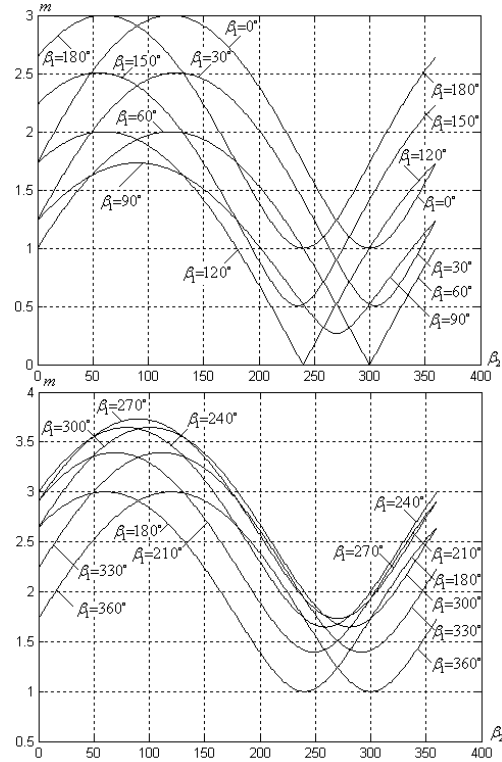


Рис.10. Полные графики изменения  $m$  в зависимости от  $\beta_1$  и  $\beta_2$

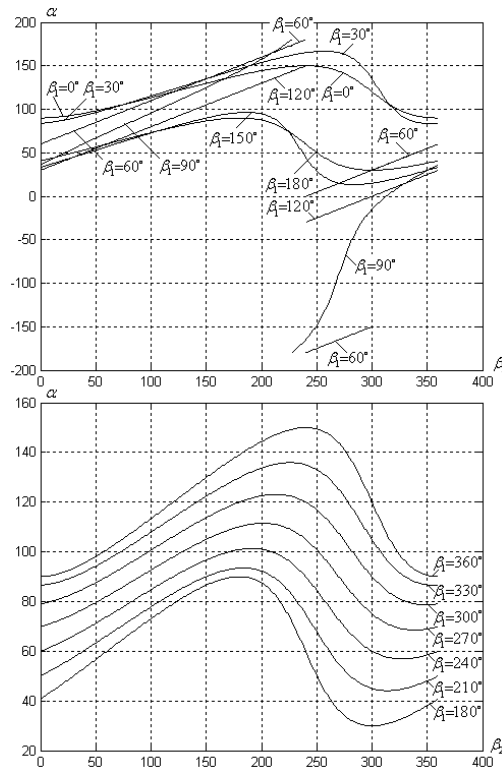


Рис.11. Полные графики изменения  $\alpha$  в зависимости от  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

### Выводы

1. Предложен и исследован вариант параметрического регулятора мощности

- на основе электромеханического преобразователя.
- Показано, что в зависимости от соотношения чисел витков роторной и статорной обмоток регулятора могут быть построены различные стратегии управления работой устройства.
  - Предложенный вариант включения элементов устройства, заключающийся в изменении количества витков обмотки статора и ротора устройства, позволяет обеспечить существенное (в два раза) снижение суммарной расчетной мощности электрических машин, образующих регулятор.
  - Исследование свойств и характеристик управления предлагаемого устройства в различных режимах показало, что параметрический регулятор мощности на основе асинхронной электрической машины с заторможенным фазным ротором с технической, экономической и эксплуатационной точек зрения можно считать конкурентоспособным по отношению к регулятору на базе силового электронного конвертора.

## References

- Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Steady state operation of interphase power controller (IPC) using power electronic converter, România. /Tehnologiile energiei. Producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, vol 43, nr.7/2010, pag. 7-13.
- Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Interphase power controller (IPC) using rotary transformers, 6th International conference on electromechanical and power systems, October 4-6, 2007, Chișinău, Moldova, Vol. II, pp.313-317.
- Fujita H., Baker D.H., Et al., Power flow controller using rotary phase-shifting transformers, Session 37-102, CIGRE 2000.
- Ba A.O., Pend T., and Lefebvre S., "Rotary power-flow controller for dynamic performance evaluation-part I: RPFC modeling", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1406-1416, July 2009
- Brochu J., Beaugard F., Et al., Innovative application of phase-shifting transformers supplemented with series reactive elements, Session A2-203, CIGRE 2006.
- Ba A.O., Pend T., and Lefebvre S., "Rotary power-flow controller for dynamic performance evaluation-part II: RPFC application in a transmission corridor", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1417-1425, July 2009.
- Fujita H., Ihara S., Larsen E. V., Pratico E.R., and Price W.W., "Modeling and dynamic performance of a rotary power flow controller", in Proc. Power Engineering Society Meeting, pp. 599-604, 2001.
- Hosseini M., Abardeh and Ghazi R., Tolué Khayami M., "The operation analysis of rotary power flow controller (RPFC)", Iranian Conference on Electrical Engineering, 2011.
- Tolué Khayami M., Shayanfar H.A., Kazemi A., and Hosseini Abardeh M., "The operation analysis of rotary power flow controller (RPFC) using detailed modeling", Int. Power System Conf., 2012.
- Tolué Khayami J.M., Hosseini Abardeh M., Shayanfar H.A., and Ghazi R., "The operation analysis and allocation of rotary power flow controller (RPFC) in the Khorasan transmission network", Int. Power System Conf., 2011.
- Hosseini Abardeh M., and Ghazi R., Rotary Power Flow Controller (RPFC) Characteristics Analysis, The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia : 6-7 June 2011
- Tolué Khayami M., Hosseini Abardeh M., Shayanfar H.A. and Ghazi R., "Power system reliability enhancement using rotary power flow controller", Int. Power System Conf., 2011.
- Brochu J., "Interphase Power Controllers", Book, Polytechnics International Press, 1999.

## Сведения об авторах:



**Калинин Лев Павлович,**  
[kalinin\\_lev@ie.asm.md](mailto:kalinin_lev@ie.asm.md)  
Институт Энергетики АНМ, кандидат технических наук. Область научных интересов связана с разработкой и применением FACTS контроллеров в энерго-системах.



**Калошин Данила Николаевич,**  
[danila-nik2005@yandex.ru](mailto:danila-nik2005@yandex.ru)  
Институт Энергетики АНМ, научный сотрудник. Научные интересы связаны с исследованием современных средств управления режимами энергосистем.



**Зайцев Дмитрий Александрович,**  
[zaiats@ie.asm.md](mailto:zaiats@ie.asm.md)  
Институт Энергетики АНМ, кандидат технических наук. Научные интересы лежат в области исследования режимов энергосистем, содержащих гибкие меж-системные связи.



**Голуб Ирина Владимировна,**  
[irina.golub@mail.ru](mailto:irina.golub@mail.ru)  
Институт Энергетики АНМ. Область научных интересов: режимы энергосистем, управляемые линии элект-ропередачи переменного тока.