

## Modes of the Reactive Power Source Controlled by the Phase-Shifting Transformer

Golub I.V., Zaitsev D.A., Tirsu M.S.

Institute of Power Engineering  
Kishinau, Republic of Moldova

**Abstract.** The purpose of this work is to develop a diagram version of the compensating device, and its control strategies using a phase-shifting transformer device. The purpose has been achieved performing a complex of research based on structural-simulation models both for the compensating device as a whole, and for the phase-shifting transformer. Based on the phase-shifting transformer model, calculation experiments in idle, short-circuit and under load conditions have been carried out. The obtained data allowed to determine the energy characteristics of the object of research and to perform analysis of its characteristics during the process of adjusting the angle of phase shift. The paper also provides the results of research in the regime's parameters issue of the device as a whole. The obtained data confirmed the functionality of the proposed reactive power source. The novelty of the work consists in the development of innovative circuit variant of controlled compensating device. Its component parts are susceptances, allowing carrying out a symmetrical adjustment of reactive power both consumed and offered to the network in a predetermined range. A control diagram for adjusting windings of a phase-shifting transformer has been proposed. The control's principle of power electronic keys provides control of the phase shift of the voltage at the output terminals of the device in the range from  $0^\circ$  to  $60^\circ$  at 15 switching positions. The proposed technical solution provides symmetrical smooth control of reactive power in a wide range at the point of connection of the device to the network.

**Keywords:** reactive power source, phase-shifting transformer, susceptances, angle of phase shift, electronic power switches, control strategy.

**DOI:** 10.5281/zenodo.1343420

### Regimuri ale sursei de putere reactivă, dirijată de către transformatorul cu diferență de fază

Golub I.V., Zaitsev D.A., Tirsu M.S.,

Institutul de Energetică, Chișinău, Republica Moldova

**Rezumat.** Scopul lucrării date este elaborarea schemei dispozitivului de compensare, la fel și strategia controlului bazată pe folosirea transformatorului de reglare decalajului de fază. Scopul pus este realizat datorită efectuării unui complex de cercetări pe baza modelului structural imitat cât a dispozitiv de compensare în întreg, atât și a transformatorului de reglare decalajului de fază folosit în calitate de corp de control. Pe baza modelului aprobat transformatorul de reglare a decalajului de fază au fost efectuate experimente de calcul, asupra modelului transformatorului de reglare a decalajului de fază în regimul mersului în gol, scurt circuit și sarcină. Prelucrarea datelor obținute a permis determinarea caracteristicilor energetice obiectului cercetat și efectuarea analizei caracteristicilor lui în procesul regulării unghiului de defazaj. Noutatea lucrării este în elaborarea schemei inovatoare a dispozitivului de compensare dirijat, componentele căruia sunt conductivitățile reactive asociate, ce permit exercitarea regulării simetrice a puterii reactive cât consumată atât și distribuită în rețea într-un interval dat. A fost propusă schema de dirijare asupra înfășurărilor regulate a transformatorului. S-a elaborat și testat legea dirijării cheilor electronice de putere ce permite reglarea unghiului de defazaj la ieșirea dispozitivului în diapazonul între  $0^\circ$  și  $60^\circ$  la 15 poziții de comutare. Este arătat că soluția tehnică propusă asigură reglarea simetrică lentă a puterii reactive cât capacitivă atât și inductivă în diapazonul larg la punctul de conectare dispozitivului la rețea. Schema propusă și strategia de reglare a unghiului de defazaj asigură micșorarea numărului cheilor electronice de putere în cutator, și ca urmare micșorarea costul realizării proiectului.

**Cuvinte-cheie:** sursa de putere reactivă, transformatorul de reglare a decalajului de fază, conductivități reactive asociate, unghiul decalajului de fază, chei electronice de putere, strategia de dirijare.

### Режимы источника реактивной мощности, управляемого фазорегулирующим трансформатором

Голуб И.В., Зайцев Д.А., Тыршу М.С.

Институт энергетики

Кишинев, Республика Молдова

**Аннотация.** Объектом исследования является управляемое компенсирующее устройство, предназначенное для регулируемой генерации реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного

характера. В качестве органа управления устройством используется фазорегулирующий трансформатор, выполненный в гексагональной конфигурации, режимные характеристики которого также проанализированы в работе. Целью настоящей работы является разработка схемного варианта компенсирующего устройства, а также стратегии его управления основанной на использовании трансформаторного фазорегулирующего устройства. Поставленная цель достигнута за счет проведения комплекса исследований на основе структурно-имитационных моделей как компенсирующего устройства в целом, так и фазорегулирующего трансформатора, используемого в качестве органа управления. На основе апробированной модели фазорегулирующего устройства были проведены расчетные эксперименты, моделирующие работу фазорегулятора в режиме холостого хода, короткого замыкания и нагрузки. В работе также приведены результаты исследований режимных параметров устройства в целом, которые подтвердили функциональность предлагаемого источника реактивной мощности. Новизна работы заключается в разработке инновационного схемного варианта управляемого компенсирующего устройства, составными частями которого являются парные реактансы, позволяющие осуществлять симметричное регулирование реактивной мощности как потребляемой, так и выдаваемой в сеть в заданном диапазоне. Предложена схема управления регулируемыми обмотками трансформаторного фазорегулирующего устройства. Разработан и протестирован закон управления силовыми электронными ключами, обеспечивающий управление фазовым сдвигом напряжения на выходных клеммах устройства в диапазоне от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  на 15 позициях переключения. Показано, что предлагаемое техническое решение обеспечивает симметричное плавное регулирование реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера в широком диапазоне в точке подключения устройства к сети. Предложенная схема и стратегия регулирования угла фазового сдвига обеспечивают снижение количества силовых ключей в коммутаторе, и как следствие уменьшает затраты на реализацию проекта.

**Ключевые слова:** источник реактивной мощности, фазоповоротный трансформатор, парные реактансы, угол фазового сдвига, электронные силовые ключи, стратегия управления.

## Введение

В настоящий момент активно развивается инновационное преобразование электроэнергетики на базе концепции «Smart Grid», направленное на повышение эффективности функционирования энергосистем, которое стало основой технического развития индустриально развитых и динамично развивающихся стран. [1-9]. Одним из важных компонентов развития технологии «Smart Grid» применительно к электроэнергетике является использование FACTS-контроллеров (Flexible Alternative Current Transmission Systems), быстродействие, которых обеспечивается применением средств силовой электроники. [10-14] Особенно это становится актуальным при возрастающем объеме использования распределенной генерации, а также возобновляемых источников энергии.

В связи с этим, получают широкое распространение различные устройства регулирования реактивной мощности, позволяющие обеспечить комплексное (как по модулю, так и по фазе) управление параметрами режима. [14-20]

Реактивная мощность является одним из основных индикаторов, характеризующих работу электрических систем. К источникам

реактивной мощности как правило, относят устройства, управляемые вручную или автоматически, способные адресно воздействовать на баланс реактивной мощности в электроэнергетической системе.

В связи с тем, что компенсация реактивной мощности обеспечивает достаточно высокую экономическую и энергетическую эффективность, в промышленно развитых странах решению этого вопроса уделяют особое внимание. [21-24]

В представленной работе на основе структурно-имитационных SPS моделей исследовано устройство для компенсации реактивной мощности, построенное на базе парных реактивных элементов, регулируемых фазоповоротным трансформатором (ФРТ) с применением средств силовой электроники.

## I. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРТ

Для управления предложенным схемным вариантом ИРМ использован ФРТ, выполненный в гексагональной конфигурации. Принципиальная схема (рис. 1) и результаты исследования, возможностей снижения установленной мощности,

используемого для управления ИРМ ФРТ, были рассмотрены ранее в [25].

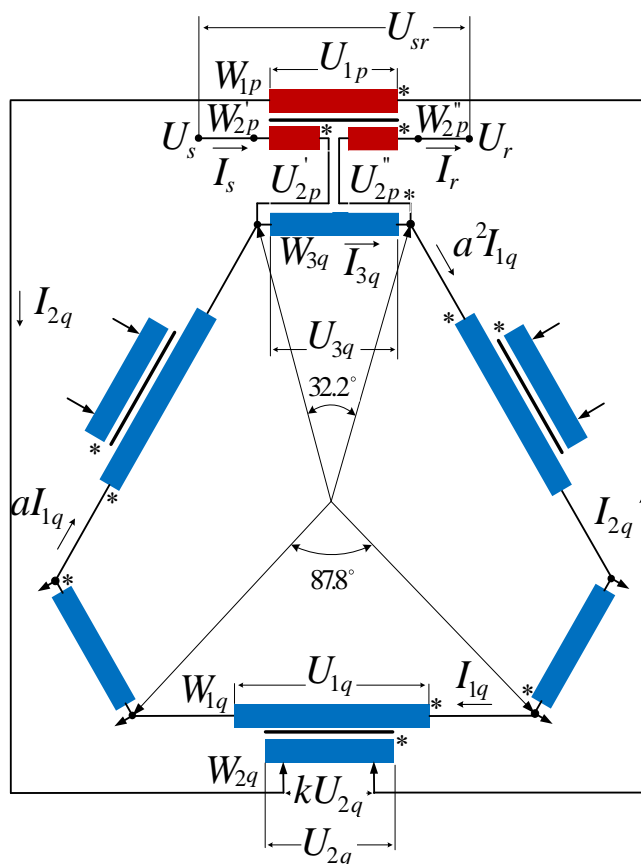


Рис.1. Принципиальная схема фазорегулирующего устройства.

Основными частями ФРТ являются параллельный трансформатор (его обмотки помечены индексом «*p*»), последовательный трансформатор (обмотки помечены индексом «*q*»), а также ключ на базе элементов силовой электроники. Входные электрические величины помечены индексом «*s*», выходные - индексом «*r*».

Быстродействие ФРТ предложено повысить путем использования коммутаторов на основе силовых электронных ключей, высокая коммутационная способность и надежность которых заметно превосходят подобные характеристики механических переключателей.

Схема обмотки управления  $W_{2q}$  при использовании силовых ключей приведена на рис.2.

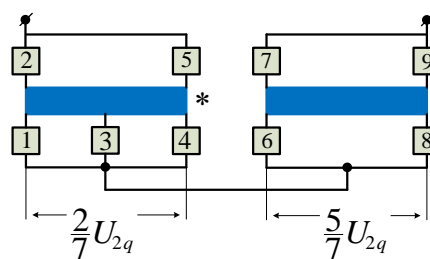


Рис.2. Схема обмотки управления с силовыми коммутаторами.

Предложенная схема требует меньшего количества элементов силовой электроники по сравнению с исследованной ранее [25].

Регулирование угла фазового сдвига  $\psi$  между выходным  $U_r$  и входным напряжением  $U_s$  реализуется путём изменения состояний силовых ключей, согласно закону управления (рис.3), обеспечивающему диапазон изменения угла  $\psi = 0^\circ \div 60^\circ$  на 15 позициях переключения.

В таблице (рис.3) черными кружками обозначены силовые ключи во включенном состоянии, обеспечивающие требуемую позицию переключения.

С учетом предложенной стратегии управления была создана структурно-имитационная модель ФРТ мощностью, на напряжение  $U_{НОМ} = 230В$ , на базе которой были проведены расчетные эксперименты,

позволившие оценить характер изменения собственных и режимных параметров устройства в процессе регулирования угла фазового сдвига  $\psi$ .

Исходные параметры модели были выбраны исходя из возможности построения лабораторного образца.

Номера ключей	1	●				●				●					
	2			●	●			●	●			●	●		
	3		●		●		●		●		●		●		
	4			●		●		●		●		●		●	
	5	●	●	●			●	●	●		●	●	●		
	6										●	●	●	●	
	7	●	●	●	●	●									
	8	●	●	●	●	●	●	●	●	●					
	9					●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Рис.3. Закон управления силовыми ключами.

Модуль угла фазового сдвига  $\psi$  изменяется в зависимости от позиции переключения силовых ключей по закону, представленному на рис.4. Испытания исследуемого ФРТ в режимах холостого хода и короткого замыкания позволили определить параметры эквивалентной схемы замещения устройства в процессе регулирования графики, которых, приведены соответственно на рис.5,6.

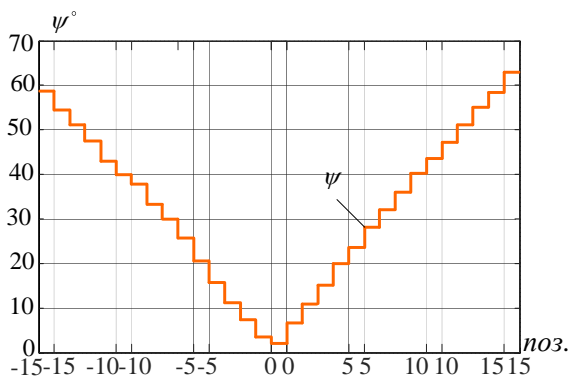


Рис.4. Зависимость угла фазового сдвига  $\psi$  от позиции переключения.

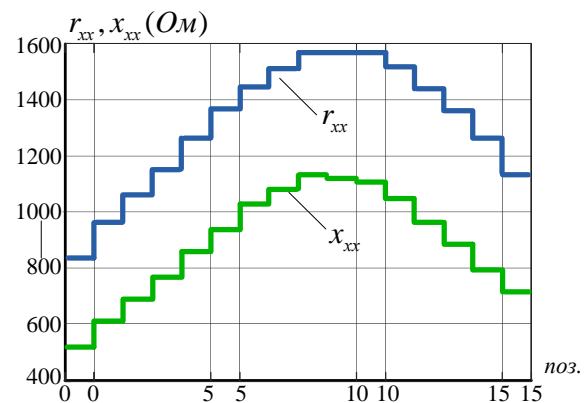


Рис.5. Характеристики активной  $r_{xx}$  и реактивной  $x_{xx}$  составляющих сопротивления холостого хода.

Анализ рис.5 показывает, что максимальное значение сопротивлений холостого хода достигают при фазовом сдвиге  $\psi \approx 35 \div 37^\circ$ , что соответствует восьмой позиции переключения.

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания ( $x_{кз}$ ) изменяется по параболическому закону и

достигает минимума на шестой позиции, что соответствует  $\psi \approx 26 \div 28^\circ$ .

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания ( $r_{кз}$ ) (рис.6) изменяется по экспоненциальному закону, достигая минимальных значений на пятнадцатой позиции, что соответствует углу  $\psi \approx 60^\circ$ .

На рис.7 представлены характеристики потерь активной мощности в ФРТ, где:

$\Delta P_{кз}$  - потери холостого хода;

$\Delta P_{xx}$  - потери короткого замыкания;

$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{кз} + \Delta P_{xx}$  - суммарные потери.

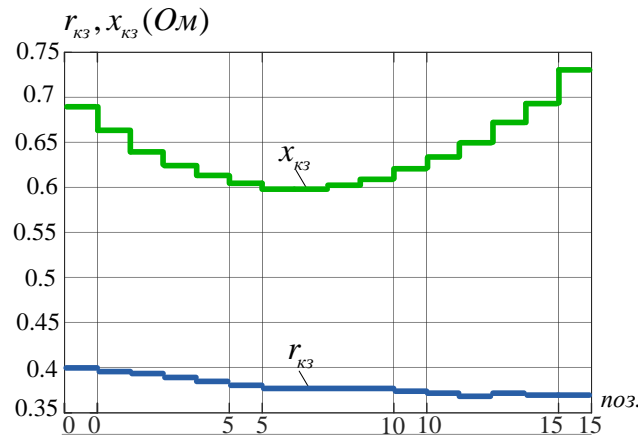


Рис.6. Характеристики активной  $r_{кз}$  и реактивной  $x_{кз}$  составляющих сопротивления короткого замыкания.

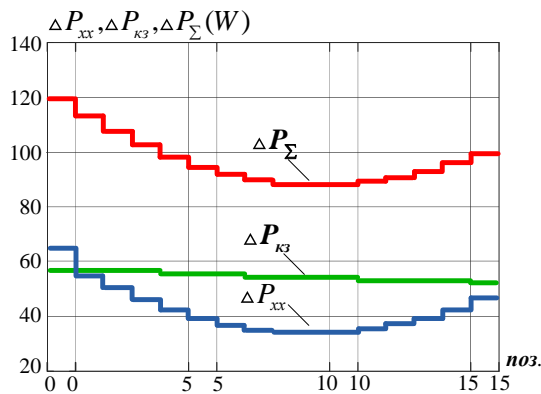


Рис.7. Зависимости изменения активных потерь от позиции переключения.

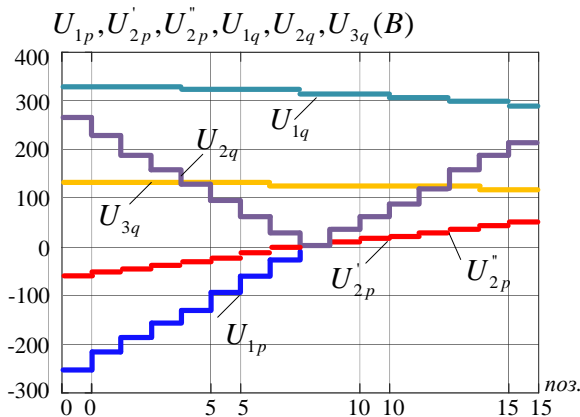


Рис.8. График изменения напряжения в элементах ФРТ.

В процессе исследований были также проведены испытания ФРТ при работе на активную нагрузку и соблюдении условия  $I_r = 12A = const$ .

Графики изменения напряжений и токов в процессе регулирования приведены соответственно на рис. 8,9.

Полученные результаты позволили уточнить параметры элементов модели фазорегулирующего трансформатора.

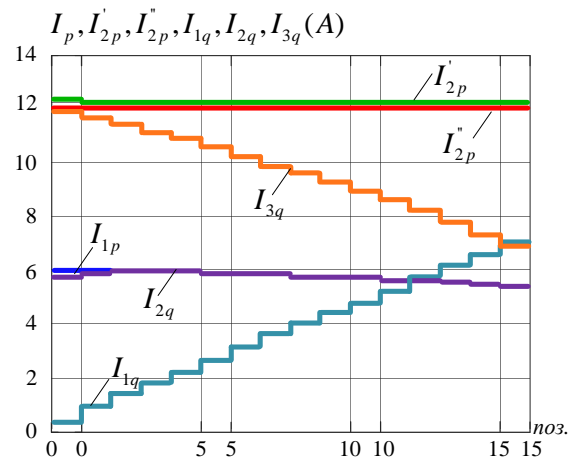


Рис.9. График изменения токов в элементах ФРТ.

## II. РЕЖИМЫ УПРАВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Фазорегулирующий трансформатор, рассмотренный выше, может быть использован в качестве органа управления устройством, предназначенным для компенсации реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера. Предлагаемое устройство состоит из следующих элементов:

- трансформатора, с первичными обмотками, соединенными попарно в звезду и включенными в рассечку линии, а также вторичными обмотками, соединенными по схеме шестиугольника;
- фазорегулирующего трансформатора, включенного пофазно к вершинам шестиугольника и возможностью реверсирования;
- сопряженных реактивных проводимостей  $L$  и  $C$ , присоединенных к устройству, по схеме, представленной на рис. 10.

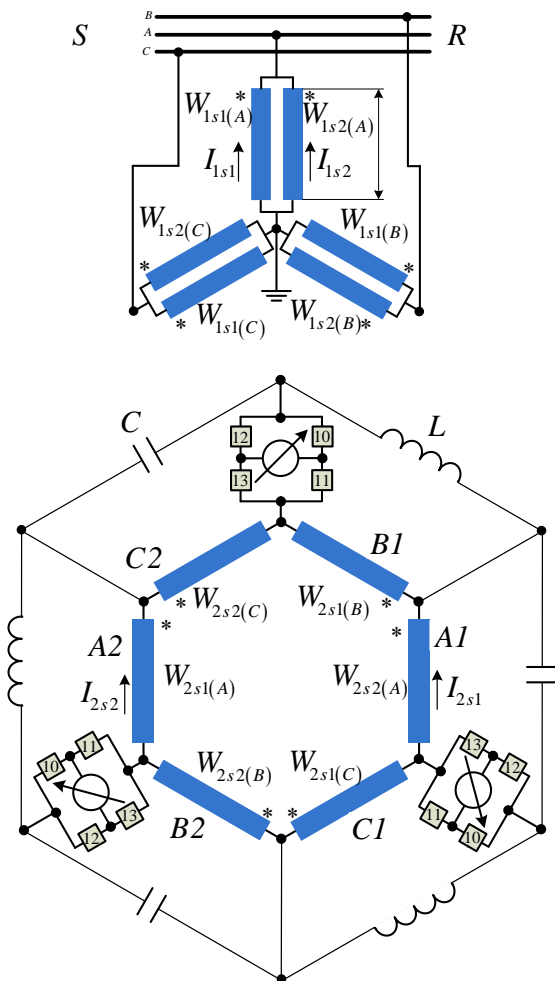


Рис.10. Схема управляемого источника реактивной мощности.

Для исследования режима работы управляемого компенсирующего устройства была построена структурно-имитационная SPS-модель на частоту  $F = 50\text{Гц}$ , и напряжение питания  $U = 230\text{В}$ . Параметры парных реактансов были приняты из условия равенства сопротивлений  $x_L = x_C$ . Величина сопряженных реактивных проводимостей составила  $L = 0.33275\text{Гн}$ ,  $C = 3.0476 \cdot 10^{-5}\text{Ф}$ .

В процессе исследования работы источника реактивной мощности анализировались следующие параметры:

- Полный ток на выходе устройства, кривая изменения которого в процессе регулирования, приведена на рис.11;

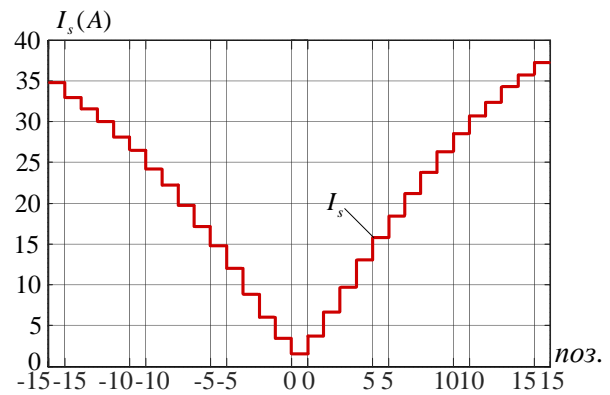


Рис.11. График изменения выходного тока устройства.

- Потери активной мощности, характер изменения величины которых, имеет сложную форму и представлен на рис.12.

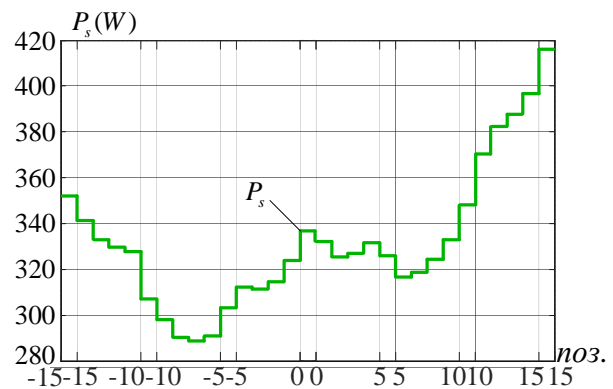


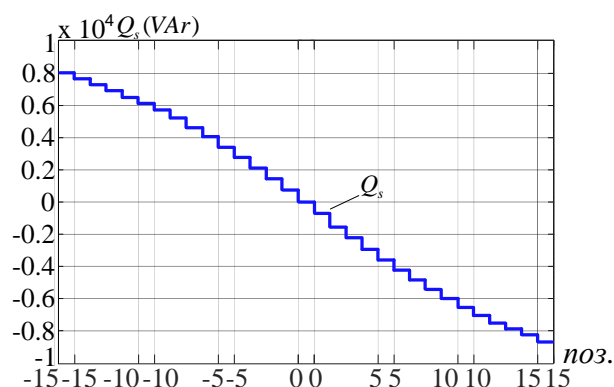
Рис.12. График изменения величины активных потерь.

Как видно из рис.12, максимальная величина потерь активной мощности имеет место в режиме потребления реактивной мощности и

составляет примерно 5% от установленной мощности устройства.

- Реактивная мощность в режимах выдачи и потребления отображена на рис.13.

Анализ представленной на рис.13 зависимости позволяет сделать заключение о том, что предлагаемое устройство позволяет осуществить практически симметричное регулирование реактивной мощности как потребляемой, так и выдаваемой в сеть.



**Рис.13. График выдачи и потребления реактивной мощности.**

### Заключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

- представлены и проанализированы энергетические характеристики фазоворотного трансформатора с усовершенствованной системой управления, позволившие включить его в схему нового варианта источника реактивной мощности в качестве управляющего элемента;
- предложенная система управления углом фазового сдвига на основе применения силовых ключей, обеспечивает 15 ступеней переключения и позволяет существенно повысить быстродействие процесса регулирования. Рассмотрен закон управления, позволяющий осуществлять изменение угла в диапазоне  $\psi = 0 \div 60^\circ$ ;
- схема и закон регулирования угла фазового сдвига обеспечили снижение количества силовых ключей в коммутаторе, и, как следствие, могут уменьшить затраты на систему управления;
- показано, что предлагаемое техническое решение обеспечивает

симметричное регулирование реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера в широком диапазоне в точке подключения устройства к сети; управляемый источник реактивной мощности может быть использован в качестве активного элемента современных Smart Grid энергосистем.

### Литература (References)

[1] Gellings C. W. The Smart Grid. Enabling Energy Efficiency and Demand Response. — CRC Press, 2010.

[2] [www.nethaus.ru/tags/smartgrid](http://www.nethaus.ru/tags/smartgrid). visit date 29.06.2018

[3] NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0. February 2012. Authors: NIST (National Institute of Technology and Standardization, USA), US State Department of Commerce. The concept and road map for communication standards for Smart Grid.

[4] Janssen M. C. The Smart Grid Drivers. — PAC, June 2010, p. 77

[5] Amin S. M., Wollenberg B. F. Toward a Smart Grid. — IEEE P&E Magazine, September/October, 2005

[6] IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond Reference Model IEEE Vision for Smart Grid Control: 2030 and Beyond Reference Model Year: 2013, pp: 1-10.

[7] Feltes J.W.; Gemell B.D.; Retzmann D., From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting Year: 2011, pp. 1-6.

[8] Kreikebaum F.; Debrup D.; Yang Y.; Lambert F.; Deepak Divan Smart Wires — A distributed, low-cost solution for controlling power flows and monitoring transmission lines 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), pp. 1-8.

[9] Sarwar M.; Asad B., A review on future power systems; technologies and research for smart grids 2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET) Year: 2016 pp. 1-6

[10] Rajiv K. Varma. Introduction to FACTS Controllers. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. 15-18 March 2009

[11] Fang Z. Peng, Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Resilient AC Distribution Systems (RACDS) in Smart Grid. Proceedings of the IEEE Year: 2017, Volume: 105, Issue: 11 pp. 2099-2115.

[12] Grünbaum R., Petersson Å., and Thorvaldsson B., “FACTS, improving the performance of electrical grids,” ABB Rev., pp. 11–18, Mar. 2003.

[13] Zhenhua Zhang, Multi-function Integrated FACTS Devices and its Application in the

Development of Smart Grid 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering Year: 2010 pp.5349-5352.

[14] Sharaf Adel M.; Khaki Behnam, A FACTS based switched capacitor compensation scheme for smart grid applications 2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications Year: 2012 pp. 1-5.

[15] Demirok Erhan; González Pablo Casado; Kenn H.B. Frederiksen; Dezso Sera; Rodriguez Pedro; Teodorescu Remus. Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids. IEEE Journal of Photovoltaics (Volume: 1, Issue: 2, Oct. 2011) pp. 174 – 182.

[16] Rodríguez Pedro; Timbus Adrian; Teodorescu Remus; Liserre Marco; Blaabjerg Frede. Reactive Power Control for Improving Wind Turbine System Behavior under Grid Faults. IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 24, Issue: 7, July 2009), pp. 1798 – 1801.

[17] Fei Wang; Jorge L. Duarte; Marcel A. M. Hendrix. Pliant Active and Reactive Power Control for Grid-Interactive Converters under Unbalanced Voltage Dips. IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 26, Issue: 5, May 2011) pp: 1511 – 1521.

[18] Wei Qiao; Ronald G. Harley; Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming. IEEE Transactions on Energy Conversion (Volume: 24, Issue: 2, June 2009), Pp. 493 – 503.

[19] Carvalho Pedro M. S.; Correia Pedro F.; Luís A. F. M. Ferreira. Distributed Reactive Power

Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 23, Issue: 2, May 2008). pp. 766 – 772

[20] Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications. Renewable Energy Vol. 29, Iss. 3, March 2004, pp. 377-392.

[21] Pauli V.K., Vorotnikov R.A. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti kak ehffektivnoe sredstvo racionalnogo ispol'zovaniya ehlektroehnergii // EHnergohkspert. – 2007. – № 2.

[22] Bryancev A.M., Bryancev M.A., Dyagileva S.V., Karymov R.R., Lur'e A.I., Maklecova E.E., Negryshev A.A. Reguliruemye istochniki reaktivnoj moshchnosti s upravlyaemymi podmagnichivaniem shuntiruyushchimi reaktorami i batareyami kondensatorov. EHLEKTROTEKHNIKA 4 God: 2010

[23] Vorotnickij V.E., Rabinovich M.A., Kakovskij S.K. Optimizaciya rezhimov ehlektricheskikh setej 220-750 kV po reaktivnoj moshchnosti i urovnjam napryazheniya.// EHnergiya edinoj seti, 2013, №3(8), pp. 50-59.

[24] Gorozhankin P.A., Majorov A.V., Makarovskij S.N., Rubcov A.A. Upravlenie napryazheniem i reaktivnoj moshchnost'yu v ehlektroehnergeticheskikh sistemah. Evropejskij opyt.// Elektricheskie stancii, 2008. №6, pp.40-47

[25] Kalinin L.P., Tirsu M.S., Zaitsev D.A., Berzan V.P. V.P. Steady-state characteristics of modified phase shifting transformer with capacitor bank in parallel connection Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, 2012. Suceava. Romania.

#### Сведения об авторах.



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



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



**Тыршу Михаил Степанович.**  
Институт Энергетики АНМ, кандидат технических наук. Научные интересы: силовая электроника.  
[tirsu.mihai@gmail.com](mailto:tirsu.mihai@gmail.com)