

## Reactor-Capacitor Device for Flexible Link Between Non-Synchronous Power Systems

Bosneaga V., Suslov V., Postolaty V.

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

**Abstract.** In present flexible interconnections for transmission of required active power between different power systems is used, as a rule, so-called DC back-to-back link. The aim of this work is the investigation of proposed reactor-capacitor device for flexible connection of asynchronously alternating current power systems with the same nominal values of frequencies for parallel operation. The reactor-capacitor device was elaborated. The installation develops the idea of controlled reactor alternating current link, and provides reactive power balance in the unit and needed value of the output voltage module. The basic characteristics of reactor-capacitor device for controlled power transmission were investigated. Analytical expressions for device elements parameters were derived. These ensure necessary ratio of voltages modules of linked power systems and reactive power balance of the device at circular output voltage vector rotation for a given load admittance. Obtained parameters ensure constant active power flow between linked asynchronously power systems and device reactive power internal balance.

**Keywords:** controlled, flexible connection of AC power systems, combined reactor-capacitor device.

### Dispozitiv tip reactor-condensator pentru legătură flexibilă a sistemelor energetice asincrone

Bosneaga V., Suslov V., Postolaty V.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei,  
Chișinău, Republica Moldova.

**Rezumat.** A fost efectuată o trecere în revistă a soluțiilor tehnice cunoscute pentru implementarea conexiunii flexibile între sisteme energetice de curent alternativ asincrone. Sunt investigate caracteristicile de bază ale dispozitivului tip reactor-condensator, care dezvoltă idee creerii legăturii flexibile tip reactor reglabil și care asigură, în contrast cu prototip, balanța puterii reactive în dispozitiv și stabilitatea modulului tensiunii de ieșire. Sunt obținute expresiile analitice pentru determinarea parametrilor elementelor dispozitivului, care sunt necesare pentru realizarea rotației circulare a fazei la admitanța dată a sarcinii și valoarea coeficientului de conversie a modulului tensiunii. Rezultate obținute permit estimarea intervalului necesar de schimbare a admitanțelor, ce trebuie realizat prin intermediul comutatoarelor cu semiconductoare pentru a pune în aplicare reglarea puterii transmise. Rezultatele cercetării pot servi ca baza pentru dezvoltarea în continuare a dispozitivelor de legătură flexibilă a sistemelor energetice cu curent alternativ și sistemelor lor de control, care asigură lucrul în comun a sistemelor de curent alternativ cu frecvențe nominale egale.

**Cuvinte-cheie:** dispozitiv tip reactor-condensator, legătură controlabilă flexibilă la curent alternativ, puterea transmisă activă și reactivă.

### Реакторно-конденсаторное устройство для связи асинхронно работающих энергосистем переменного тока

Бошняга В., Суслов В., Постолатий В.

Институт энергетики Академии Наук Молдовы,  
Кишинев, Республика Молдова

**Аннотация.** Проведен обзор известных технических решений по реализации управляемой «гибкой» связи на переменном токе для асинхронно работающих энергосистем. Исследованы основные характеристики реакторно-конденсаторного устройства, развивающего идею создания реакторных управляемых устройств связи и обеспечивающего, в отличие от прототипа, баланс реактивной мощности в устройстве при необходимом модуле выходного напряжения. Получены аналитические выражения для определения параметров элементов реакторно-конденсаторного устройства, необходимых для реализации кругового вращения фазы при заданной комплексной проводимости нагрузки и величине коэффициента преобразования напряжения по модулю. Полученные результаты позволяют оценить необходимый диапазон изменения проводимостей, который надо обеспечить с помощью полупроводниковых переключающих устройств для реализации управления передаваемой мощностью. Результаты исследований могут быть положены в основу дальнейших разработок устройств гибкой связи энергосистем на переменном токе и их систем регулирования, обеспечивающих совместную работу энергосистем с одинаковыми номинальными значениями частоты переменного тока.

**Ключевые слова:** реакторно-конденсаторное устройство, управляемая гибкая связь на переменном токе, передаваемая активная и реактивная мощность.

### Введение

В настоящее время в качестве управляемых межсистемных связей, т.е. таких связей различных энергосистем, для которых величина передаваемой активной мощности задана независимо от загрузки других ветвей электрической сети, применяются, как правило, так называемые вставки постоянного тока [1-7]. Они позволяют связать между собой энергосистемы, как с различными номинальными значениями частоты, так и с одинаковыми номинальными частотами, но работающие асинхронно. Однако вставка постоянного тока является сравнительно сложной и, соответственно, дорогой установкой, включающей силовые трансформаторы, выпрямительные и инверторные преобразователи, а также при необходимости фильтры высших гармоник и устройства компенсации реактивной мощности. Необходимость применения фильтрокомпенсирующих устройств обусловлена свойствами выпрямительно-инверторных преобразователей, являющихся генераторами высших гармоник и потребителями реактивной мощности.

Двойное преобразование рода тока – из переменного в постоянный на передающем конце и обратное преобразование – на приемном конце управляемой связи приводит к появлению существенных гармонических искажений кривых токов и напряжений.

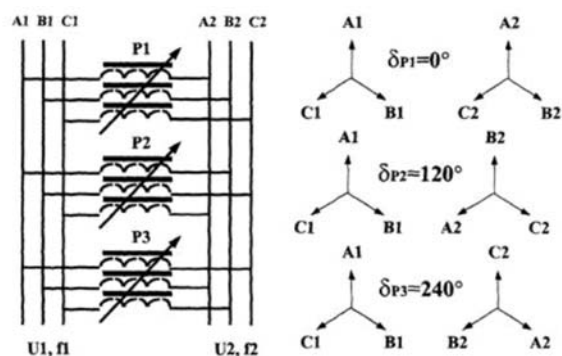
В литературе описано также большое количество технических решений для реализации управляемой связи на базе асинхронных или синхронизированных электрических машин переменного тока, которые могут быть связаны механически путем их расположения на одном валу. Однако, несмотря на проведенные масштабные исследования и разработки, они пока не нашли широкого практического применения в данной области (например, [8-9] и др.).

В связи бурным развитием в последние десятилетия технологий «FACTS» (Flexible Alternating Current Transmission) появилось большое количество различных управляемых устройств на переменном токе с использованием полупроводниковых коммутирующих элементов, обеспечивающих регулирование параметров

режима электрической сети, в том числе величины и фазы напряжения, активной и реактивной мощностей в сети [10-16] и др. Наиболее близко к решению задачи создания гибкой связи, по-видимому, находятся устройства типа UPFC (Unified Power Flow Controller, [13]), которые обладают универсальными характеристиками (они позволяют одновременно в реальном времени управлять потоками активной и реактивной мощностей в линии электропередачи), сравнимыми разве что с теми, которые обеспечивает вставка постоянного тока. Однако в доступной литературе не рассматривается их использование для обеспечения гибкой связи асинхронно работающих энергосистем.

В связи с успешным развитием техники коммутации на базе различных полупроводниковых устройств (как традиционных тиристоров, так и устройств типа GTO и IGBT) обозначилось еще одно потенциально возможное направление реализации такой связи, идея которого высказывалась давно – на базе трансформаторных фазообразующих устройств с круговым вращением фазы выходного напряжения относительно входного, реализуемого с помощью полупроводниковых быстродействующих переключающих элементов (см. например, [17-20] и др.).

Другим классом устройств для реализации гибкой связи являются устройства на базе ферромагнитных управляемых устройств реакторного типа [21-24]. На рис 1 приведена



**Рис.1.** Принципиальная схема реализации гибкой связи энергосистем на основе управляемых подмагничиванием ферромагнитных элементов.

одна из возможных схемных модификаций данного класса устройств, рассмотренная, например, в [21], и названная авторами ферримагнитной вставкой переменного тока (ФВПТ). Данная работа послужила толчком к поиску и началу исследования более совершенных схемных решений, дополненных конденсаторами, что может обеспечить улучшение баланса реактивной мощности и постоянство модуля выходного напряжения.

В результате проведенного поиска по доступным источникам научно-технической литературы были найдены публикации, посвященные описанию похожих устройств, которые, предназначены для совершенно других целей и параметры которых определяются из условий симметрирования нагрузки в трехфазных системах электроснабжения на низком напряжении, например, [25].

В настоящей работе продолжено приведенное в [26] изучение вариантов реализации бестрансформаторных реакторно-конденсаторных устройств гибкой связи, которые в конечном счете, как оказалось, также могут обеспечивать эффект регулирования фазового сдвига, за счет чего и достигается управление величиной передаваемой мощности.

Устройство [21] послужило своеобразным прототипом для появления реакторно-конденсаторного устройства связи энергосистем, один из простейших вариантов исполнения которого впервые описан в [26], а схема соединения приведена на рис.2.

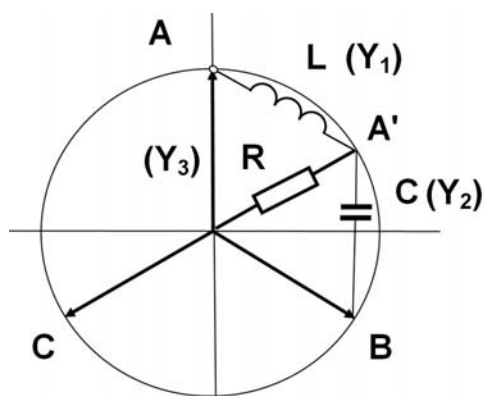


Рис.2. Схема одной фазы двухэлементного устройства гибкой связи на основе реактора и конденсатора.

Постановка этих исследований обусловлена также перспективами развития электроэнергетической системы Республики

Молдова, намеченными энергетической стратегией на период до 2030 г. Исследования имеют своей главной целью предложить и исследовать схемно-аппаратные решения, которые были бы альтернативой по отношению к намечаемым для сооружения вставкам постоянного тока.

### Расчет параметров двухэлементного устройства с заданным модулем напряжения при наличии активной и реактивной мощности нагрузки

Обратимся теперь непосредственно к модели на рис. 2. На ней показана реализация передачи активной мощности от двух фаз А и В передающей энергосистемы на фазу А' второй энергосистемы, выступающей в качестве нагрузки.

Запишем уравнение баланса токов для фазы А' приемной энергосистемы. Имеем:

$$\begin{aligned} & (\dot{U}_A - \dot{U}_n) \cdot j b_A + (\dot{U}_B - \dot{U}_n) \cdot j b_B = \\ & = (g_n + j b_n) \cdot \dot{U}_n \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь, как и в работе [26], принято, что вектор напряжения на нагрузке  $\dot{U}_n$  направлен вдоль вещественной оси, а вектор  $\dot{U}_A = U_A \exp(j\delta)$ . Рассмотрим случай неравенства модулей напряжения передающей и приемной энергосистем. Пусть модуль напряжения снабжающей энергосистемы будет в  $k$  раз больше модуля напряжения принимающей энергосистемы, т.е.  $U_A = k U_n$ . Разделив обе части уравнения (1) на величину  $k U_n$  получим:

$$\begin{aligned} & (\exp(j\delta) - 1/k) \cdot j b_A + (\exp(-j(2/3\pi - \delta)) - 1/k) \cdot \\ & \times j b_B = \frac{g_n + j b_n}{k} \end{aligned} \quad (2)$$

Превратим данное уравнение в систему 2-х уравнений отдельно для действительной и мнимой частей. Получим:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\sin \delta \cdot b_A + \sin(2/3\pi - \delta) \cdot b_B = \frac{g_n}{k} \\ & (\cos \delta - 1/k) \cdot b_A + (\cos(2/3\pi - \delta) - 1/k) \cdot b_B = \frac{b_n}{k} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Разрешим последнюю систему относительно неизвестных  $b_A$  и  $b_B$ . Получим для  $b_A$

$$b_A = -\frac{1}{k} \cdot \frac{(\cos(\frac{2}{3}\pi - \delta) - \frac{1}{k}) \cdot g_n + \sin(\frac{2}{3}\pi - \delta) \cdot b_n}{\sin(\frac{2}{3}\pi - \delta) \cdot (\cos \delta - \frac{1}{k}) + (\cos(\frac{2}{3}\pi - \delta) - \frac{1}{k}) \cdot \sin \delta} \quad (4)$$

А для  $b_B$ :

$$b_B = \frac{1}{k} \cdot \frac{(\cos \delta - \frac{1}{k}) \cdot g_n + \sin \delta \cdot b_n}{\sin(\frac{2}{3}\pi - \delta) \cdot (\cos \delta - \frac{1}{k}) + (\cos(\frac{2}{3}\pi - \delta) - \frac{1}{k}) \cdot \sin \delta} \quad (5)$$

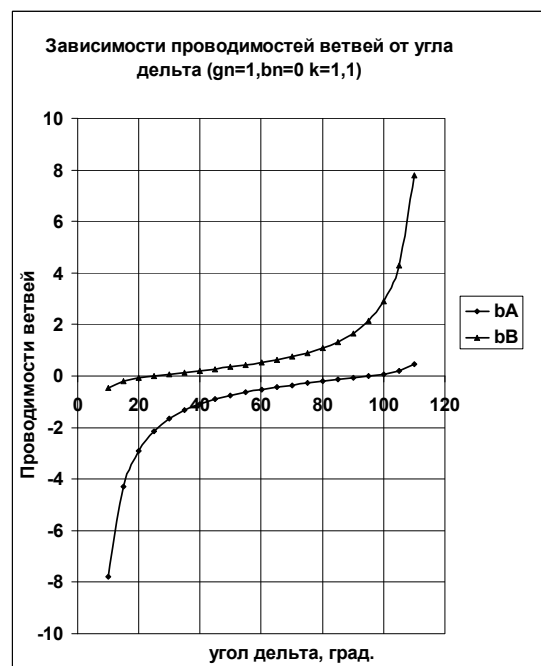
Таким образом, получены аналитические выражения для значений проводимостей реактора и конденсатора, позволяющие при заданных активной и реактивной проводимостях нагрузки обеспечить на выходе устройства напряжение, меньшее в  $k$  раз приложенного во всем диапазоне изменения угла фазового сдвига  $\delta$ . На последующих рисунках 3-11 приведены графики зависимостей проводимостей реактора и конденсатора от величины угла сдвига  $\delta$  для различных значений проводимостей нагрузки, в том числе и реактивной, и величины коэффициента преобразования  $k$  по напряжению. На рис. 3,4



**Рис.3.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от угла сдвига  $\delta$  между системами при активной нагрузке и  $k=1$ .

для сравнения приведены графики упомянутых зависимостей при чисто активной загрузке ( $g_n=1$ ,  $b_n=0$ ) и разных коэффициентах преобразования по напряжению  $k=1$  и  $k=1,1$  (выходное напряжение меньше питающего на 10%). Масштабы по осям выбраны одинаковыми, чтобы облегчить сравнение получаемых результатов. Маркеры треугольной и

ромбической формы на кривых проставлены через  $5^\circ$ . График на рис. 3 при  $k=1$  является базовым, при этом как видно из графика, проводимость  $b_A$ , подключаемая к фазе А



**Рис.4.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при активной нагрузке и коэффициенте преобразования  $k=1,1$ .

питающей системы отрицательна, имеет индуктивный характер, и модуль ее постепенно уменьшается с увеличением угла, и при углах, близких к  $120^\circ$  приближается к нулю. Проводимость, подключаемая к фазе В питающей системы, положительна, имеет емкостной характер и растет с увеличением угла, достигая при углах, близких к  $120^\circ$ , тех же величин по модулю, какие имела проводимость  $b_A$  при малых углах, т.е., имеет место определенная симметрия. Следует отметить, что при промежуточном значении угла в  $60^\circ$  указанные проводимости имеют одинаковые модули при разных знаках. Из сравнения рис.3,4 видно, что при уровне

напряжения в приемной системе, пониженном на 10%, максимальные необходимые значения диапазона изменения проводимостей возрастают на 33%. Кроме того, кривая индуктивной проводимости  $b_A$  при значениях угла порядка  $100^\circ$  переходит через ось абсцисс и меняет свой знак на положительный, а кривая емкостной проводимости  $b_B$  наоборот – становится отрицательной при углах менее  $20^\circ$ , т.е. при углах менее  $20^\circ$  и более  $100^\circ$  проводимости имеют одинаковый характер. Значения проводимостей  $b_A$  и  $b_B$  в средней точке при  $\delta=60^\circ$  одинаковы по модулю и противоположны по знаку. Рассмотрим для полноты еще случай, когда напряжение приемной системы меньше на 20%, т.е. примем коэффициент преобразования  $k=1,2$ . На рис. 5 показаны графики зависимостей проводимостей реактора и конденсатора



**Рис.5.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при активной нагрузке и коэффициенте преобразования  $k=1,2$ .

от величины угла фазового сдвига  $\delta$  для данного случая. Сравнивая с предыдущим рисунком, видим, что диапазон изменения проводимостей значительно увеличился, примерно вдвое, точки изменения знаков проводимостей сместились еще больше к центру рисунка по сравнению с предыдущим случаем. Однако в целом характер изменения проводимостей не изменился. Следует отметить, что по сравнению с вариантом  $k=1$ ,

при значении  $k>1$  наметилась тенденция перехода кривых проводимостей через нуль и изменения знаков проводимостей, так что появляются диапазоны изменения угла  $\delta$ , в которых проводимости имеют одинаковые знаки. Таким образом, соответствующим выбором значений проводимостей можно обеспечить режим передачи активной мощности и при меньшем по сравнению с питающей системой значении напряжения приемной системы.

Учитывая, что величина напряжения в электрических сетях может изменяться как в меньшую, так и в большую сторону от номинального значения, рассмотрим варианты устройства с увеличенным напряжением приемной системы при  $k=0,9$ .



**Рис.6.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при активной нагрузке и коэффициенте преобразования  $k=0,9$ .

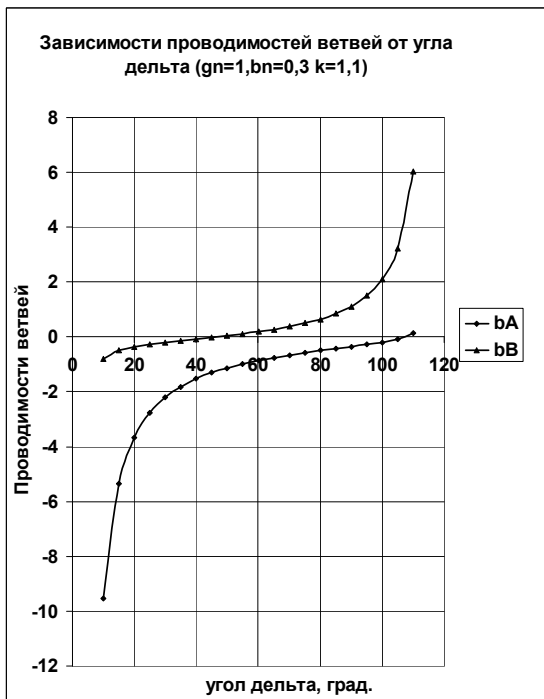
На рис. 6 показаны полученные зависимости проводимостей от угла  $\delta$  между системами напряжений. Сравнивая результаты рис.6 и рис.3, можно отметить, что необходимый диапазон изменения проводимостей с увеличением напряжения приемной системы на 11% (при  $k=0,9$ ) уменьшился почти на 20%. Как следует из рис. 7, где представлены кривые для коэффициента преобразования  $k=0,8$  (что соответствует повышению уровня напряжения приемной системы уже в 1,25 раза), повышение напряжения сопровождается дальнейшим уменьшением необходимого диапазона изменения проводимостей реактивных элементов. Однако знаки проводимостей в

рассмотренном диапазоне изменения угла  $\delta$  все время противоположные.



**Рис.7.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при активной нагрузке и коэффициенте преобразования  $k=0,8$ .

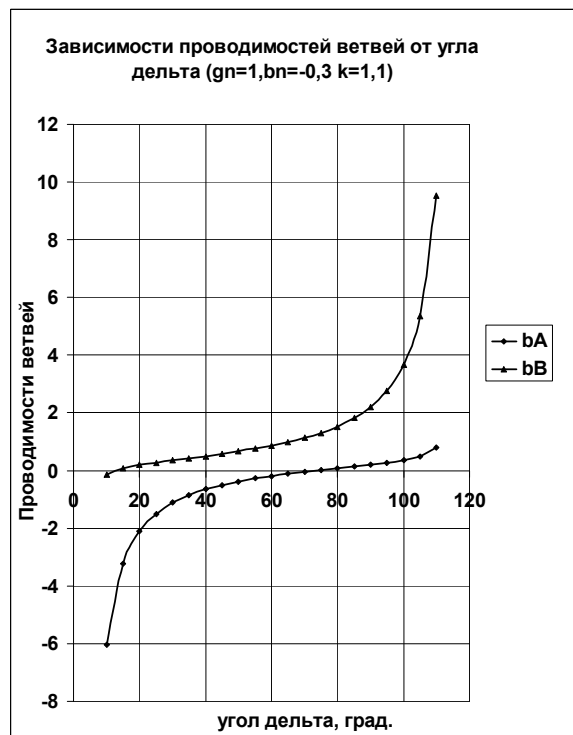
Таким образом, рассмотрено влияние обеспечиваемого уровня выходного



**Рис.8.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при смешанной нагрузке емкостного характера и коэффициенте преобразования  $k=1,1$ .

напряжения по сравнению с питающим на необходимые параметры реактивных

элементов. С увеличением уровня выходного напряжения сверх номинального необходимый диапазон изменения проводимостей реактивных элементов уменьшается, и, наоборот, с падением уровня выходного напряжения – увеличивается. Кроме того, при уменьшении напряжения появляются области изменения угла  $\delta$ , в которых проводимости имеют одинаковый знак. Рассмотрим далее влияние реактивной нагрузки на необходимые значения проводимостей, обеспечивающих режим «гибкой связи». На рис.8 представлены зависимости проводимостей для случая коэффициента преобразования  $k=1,1$  при смешанной нагрузке емкостного характера. Из сравнения с рис. 4 следует, что подключение нагрузки емкостного характера приводит к смещению диапазона регулирования проводимостей в сторону отрицательных значений и нарушению его симметрии. При этом проводимости в точке  $\delta=60^\circ$  оказываются разными.



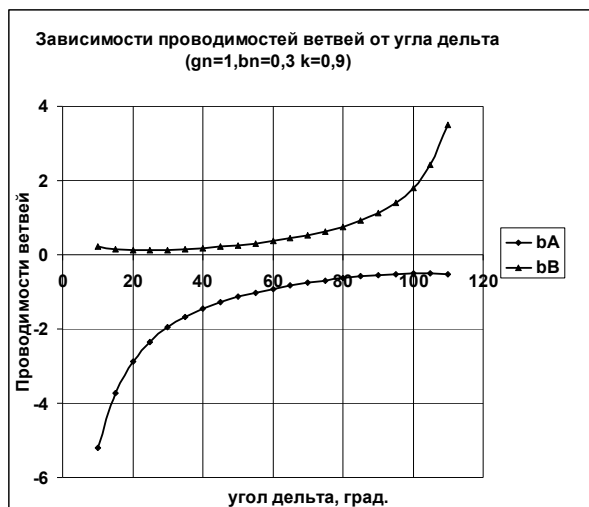
**Рис.9.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при смешанной нагрузке индуктивного характера и коэффициенте преобразования  $k=1,1$ .

Кроме того, точки перехода кривых проводимостей через нуль смещаются вправо, причем значительно сильнее

выражено смещение верхней кривой для проводимости  $b_B$  (кривая обозначена треугольными маркерами).

На рис.9 представлены зависимости проводимостей для случая того же значения коэффициента преобразования  $k=1,1$  однако при смешанной нагрузке индуктивного характера. Сравнение с кривыми того же рис.4 показывает, в данном случае происходят противоположные изменения. Подключение нагрузки индуктивного характера приводит к смещению диапазона регулирования проводимостей в сторону положительных значений проводимостей и нарушению его симметрии. При этом проводимости в точке  $\delta=60^\circ$  опять оказываются разными, но как бы меняются местами. В данном случае значительно сильнее выражено смещение нижней кривой для проводимости  $b_A$  (кривая обозначена маркерами в виде ромба).

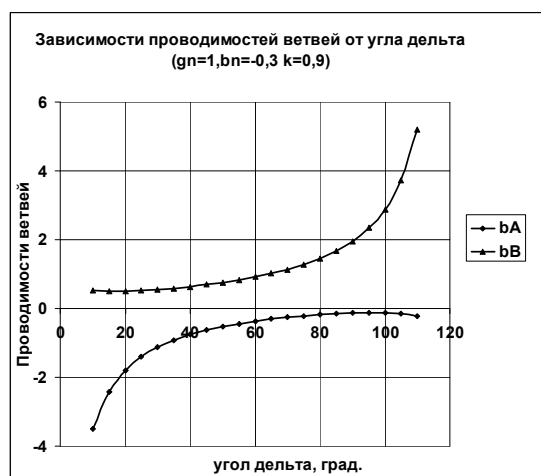
На рис.10 представлены зависимости проводимостей для случая коэффициента преобразования  $k=0,9$  снова при случае смешанной нагрузки емкостного характера.



**Рис.10.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при смешанной нагрузке емкостного характера и коэффициенте преобразования  $k=0,9$ .

Из сравнения с рис. 6 следует, что подключение нагрузки емкостного характера приводит к смещению диапазона регулирования проводимостей в сторону отрицательных значений. При этом проводимости в точке  $\delta=60^\circ$  снова оказываются разными.

На рис.11 представлены зависимости проводимостей для случая того же значения коэффициента преобразования  $k=0,9$ , однако, при смешанной нагрузке индуктивного характера. Сравнение с кривыми того же рис.6 показывает, что в данном случае происходят противоположные изменения. Подключение нагрузки индуктивного характера приводит к смещению диапазона регулирования проводимостей в сторону положительных значений проводимостей. При этом проводимости в точке  $\delta=60^\circ$  опять оказываются разными, но как бы меняются



**Рис.11.** Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига  $\delta$  при смешанной нагрузке индуктивного и коэффициенте преобразования  $k=0,9$ .

местами по сравнению с предыдущим случаем. Таким образом, подключение дополнительных реактивных нагрузок приводит к смещениям кривых проводимостей, зависящим от характера подключаемой дополнительно реактивной нагрузки.

## ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель и получено аналитическое описание для исследования процессов управляемой передачи мощности между энергосистемами с помощью 2-х элементных реакторно-конденсаторных устройств гибкой связи энергосистем на переменном токе. На ее основе разработана в пакете МАТЛАБ вспомогательная программа, позволяющая с использованием вычислительных средств пакета получить значения проводимостей,

реализующих гибкую связь асинхронно работающих систем.

2. На базе полученных моделей исследованы основные характеристики предложенного устройства для гибкой связи энергосистем, найдены зависимости необходимых реактивных проводимостей от угла, позволяющие реализовать передачу заданной активной и реактивной мощности при различных коэффициентах преобразования напряжения по модулю.

3. Показано, что фактически данное устройство является своеобразным эквивалентом фазоворотного трансформатора с круговым вращением фазы. Результаты исследований могут быть положены в основу дальнейших разработок устройств гибкой связи асинхронно работающих энергосистем переменного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Pan, R. Nuqui, K. Srivastava, T. Jonsson, P. Holmberg, Ying-Jiang Hafner. AC Grid with Embedded VSC-HVDC for Secure and Efficient Power Delivery. IEEE Energy2030, Atlanta, GA USA, 17-18 November, 2008.
- [2] Power Link, № 2, 1996 г. ABB Power Systems. Lenart Carlson. ABB Power Technologies. Liudvika, Sweeden. ABB review, No.3, 2005. pp. 42-46.
- [3] J.Arrilaga, B.Smith. AC-DC Power System Analysis. IEE, London, 1998, 395 pp.
- [4] Ivakin V.N., Sisoeva N.G., Hudeakov V.V. [Transmission lines and HVDC links and static thyristor compensators]. *Electroperedachi i vstavki postoiannogo toka i staticheskie tiristornie kompensatori*. – M.: Energoatomizdat, 1993. (In Russian.)
- [5] *Peredachi i vstavki postoiannogo toka visokogo napreajenia*. [HVDC links and transmissions]. Editor Hudeakov V.V. – M.: Energoatomizdat, 1988. (In Russian.)
- [6] Lozinova N., Mazurov M., [DC transmission line]. *Peredacha postoiannogo toka. Perspektivi primenienia, Novosti electrotehniki*, no. 4(94), 2015. (In Russian.)
- [7] Baliberdin L.L., Koscheev L.A., Lozinova N.G., Mazurov M.I., Kovalev V.D. [Effectiveness increasing by implementing of DC links and transmission lines]. *Povishenie effektivnosti energosistem putem primenienia DC links and transmission lines*. Electro, no.3, 2010, pp.1-6. (In Russian.)
- [8] Burman A.P., Rozanov Iu.K., Shakarean Iu.G. [Perspectives of application of flexible transmissions lines in Russia's United power system]. *Perspektivi primenienia v EES Rossii gibkih (upravleaemih) sistem electroperedachi peremennogo toka*. Electrotehnika, –no.8, 2004, pp. 30–36. (In Russian.)
- [9] Zelenohat N.I. [Creation of flexible intersystems links for integration of power systems]. *Sozdanie gibkih mejsistemnih sveazei dlea obiedinenia electroenergeticheskikh sistem*. Izvestia visshih uchebnykh zavedenii, 1981, no.1, pp. 3-8. (In Russian.)
- [10] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, 2000, 432 pp.
- [11] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems. JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION, 2002. 518 pages.
- [12] Ketan G. Damor, Dipesh M. Patel, Vinesh Agrawal, Hirenkumar G. Patel. Comparison Of Different Fact Devices. IJSTE–International Journal of Science Technology & Engineering. Vol. 1, Issue 1, July 2014.
- [13] L.Gyugyi, C.D. Schauder, S.L. Williams, etc. The Unified Power Flow controller: a new approach to power transmission control. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.2, April 1995. p.1085-1097.
- [14] L. Gyugyi, Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C (Volume:139, Issue: 4) Jul 1992, pp. 323 – 331,
- [15] Biplab Bhattacharyya, Vikash Gupta, Sanjay Kumar. UPFC with series and shunt FACTS controllers for the economic operation of a power system. Ain Shams Engineering Journal (2014), vol. 5, issue 3, pp. 775–787.
- [16] Jacques Lemay, Jacques Brochu, Francois Beaugregard. Interphase Power Controllers complementing the family of FACTS controllers. ABB Review 1/2000.
- [17] Voitovski A.V., Kalinin L.P. [Investigation of phase-shifting transformer operation with circular phase-angle rotation of voltage]. *Issledovanie rejima raboti fazoreguliruiushego transformatora s krugovim preobrazovaniem fazi napreajenia*. Sb. Upravleaemie electroperedachi, Kishinev, izdatelistvo “Stiintsa”, 1987. (In Russian)
- [18] Bosneaga V.A., Postolaty V.M., Voitovskii A.V. Transformatornoie ustroistvo dlea sveazi energosistem. Avtorskoie svidetelstvo SSSR no. 1288764. 8.10.1986.
- [19] Bosneaga V.A., Voitovskii A.V., Postolaty V.M. Transformatornii fazoreguleator. Avtorskoie svidetelstvo SSSR no. 1742958, 23.06.1992.
- [20] Berlin E.M. Razrabotka nauchno-tehnicheskikh predlojenii I podgotovka variantov dlea tehniko-ekonomicheskogo obosnovania mnogofaznykh tiristorno-kliuchevih ustroistv dlea obiedinenia energosistem. Nauchno-tehnicheskii otchet, NIPT, Leningrad, 1983.



[21] Alexandrov G.N., Zaitsev S.G., Blagodirev V.I. Upravleamie reaktori v kachestve silovih elementov vstavki peremennogo toka. Elektroenergetika: segodnea i zavtra. 2014, no. 3, pp.51-59.

[22] Makarov A.V., Talamanov O.V. Ustroistvo dlea obiedinenia trehfaznih energosistem na osnove upravleaemih reaktorov. Patent na poleznuiu modeli no. 50726. 23.11.2006.

[23] Breantsev A.M. Upravleamie podmagnichivaniem electrichekie reaktori kak element electroenergeticheskoi sistemi. Elektrotehnika. 2003, no. 3, p.2.

[24] Talamanov O.V. Avtoreferat dissertasii na soiskanie stepeni kandidata tehniceskikh nauk, Ivanovo, 2006. Razrabotka i issledovanie sposobov povishenia effektivnosti funktsionirovania ustanovok mejsistemnoi sveazi na osnove ferromagnitnih upravleaemih elementov.

[25] Kulinich V.A. Induktivno-emkostnie upravleamie transformiruiuschie ustroistva . Moskva, Energoatomizdat, 1987, 177 p.

[26] Bosneaga V., Suslov V., Darea de seama a Institutului de energetică ASM, laboratorul LEDA, 2015.

### Сведения об авторах.



**Бошняга В.А.**, ведущий научный сотрудник, область научных интересов связана с расчетами режимов электрических систем с использованием разрабатываемых моделей трансформаторных устройств.

**E-mail:**  
[valeriu.bosneaga@gmail.com](mailto:valeriu.bosneaga@gmail.com)



**Постолатий Виталий Михайлович**, д.х.т.н, академик, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: управляемые, гибкие, компактные электропередачи, современные средства регулирования, энергетическая безопасность

E-mail: [postolati@rambler.ru](mailto:postolati@rambler.ru)



**Суслов В.М.**, научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока повышенной пропускной способности, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими процессами, моделированием в энергетических системах.

**E-mail:**  
[svictorm46@gmail.com](mailto:svictorm46@gmail.com)