

## Estimation of Power Exchange through 110 kV Overhead Power Lines at the Interface of the Romanian and Moldovan Power Systems

<sup>1</sup>Postolaty V., <sup>1</sup>Berzan V., <sup>1</sup>Bykova E., <sup>1</sup>Bosneaga V., <sup>1</sup>Suslov V., <sup>1</sup>Ermurachi Iu.,  
<sup>2</sup>Grigoras Gh., <sup>2</sup>Gavrilas M., <sup>2</sup>Istrate M.

<sup>1</sup>Institute of Power Engineering, Kishinau, Republic of Moldova

<sup>2</sup>Technical University "Gheorghe Asachi", Iasi, Romania,

**Abstract.** The purpose of this paper is to estimate the possibility of technical use of the 110 kV voltage lines (OPL) for the interconnection of the power systems of the Republic of Moldova and Romania, taking into account in the unified power system regime, which includes the power system of the CIS countries, of Moldova, Romania, Ukraine and other countries in the region. In the calculation scheme of the permanent synchronous regime of the integrated system, the interconnection zone of the Moldovan and Romanian systems was highlighted for the lines of 110 kV: Stanca-Costești, Țuțora (Fai) - Ungheni and Hushi-Cioara. Transformer phase difference angle adjustment devices have been introduced in the 110 kV OPL to provide the bidirectional power shift regime. In the existing topology of electricity networks, power flows at the power system interface are directed from the Republic of Moldova to Romania. Changing the direction of the power flows is possible through the 110 kV OPL when equipped with phase shift devices. The results of the calculations of the permanent regime have demonstrated the possibility of achieving the reciprocal power exchange regime between the interconnected power systems by adjusting the phase difference angle. It was shown the possibility of stable operation when using 110 kV overhead power lines as interconnection lines of the Moldovan and Romanian power systems. The issue of interconnection through the 110 kV lines is complex and requires an individual approach to how to achieve it.

**Keywords:** interconnection, 110 kV lines, adjusting devices, phase difference angle, two-way exchange of active power, permanent mode.

**DOI:** 10.5281/zenodo.1343396

### Estimarea schimbului de putere prin linii electrice aeriene 110 kV la interfața sistemelor electroenergetice ale României și Republicii Moldova

<sup>1</sup>Postolaty V., <sup>1</sup>Berzan V., <sup>1</sup>Bykova E., <sup>1</sup>Boșneaga V., <sup>1</sup>Suslov V., <sup>1</sup>Ermurachi Iu.,  
<sup>2</sup>Grigoras Gh., <sup>2</sup>Gavrilas M., <sup>2</sup>Istrate M.

<sup>1</sup>Institutul de Energetică, Chișinău, Republica Moldova

<sup>2</sup>Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi", Iasi, Romania

**Rezumat.** Scopul acestei lucrări constă în estimarea posibilității utilizării tehnice a liniilor cu tensiunea de 110kV de la interfața sistemelor electroenergetice ale Republicii Moldova și României ca linii de interconexiune, ținând cont de regimul sistemului electroenergetic unificat, care include concomitent sistemul electroenergetic al țărilor CSI, inclusiv, a Moldovei, României, Ucrainei și a altor țări din regiune. În schema de calcul al regimului permanent sincron a sistemului integrat s-a evidențiat zona de interconexiune a sistemelor moldovenesc și românesc: linie electrică aeriană (LEA) 110 kV Stâncă-Costești, Țuțora (Fai)-Ungheni și Huși-Cioara. În LEA 110 kV au fost introduse dispozitive de reglare a unghiului diferenței de fază tip transformator pentru a asigura regimul bidirecțional al schimbului de putere. În topologia existentă a rețelelor electrice fluxurile de putere la interfața sistemelor electroenergetice au direcția din Republica Moldova spre România. Schimbarea direcției fluxurilor de putere este posibilă la dotarea LEA 110 kV cu instalații de reglarea diferenței de fază a tensiunilor la interfața sistemelor interconectate. Rezultatele calculelor regimului permanent au demonstrat posibilitatea realizării regimului de schimb reciproc de putere prin LEA 110 kV între sistemele electroenergetice moldovenesc și românesc prin reglarea unghiului diferenței de fază. S-a constatat posibilitatea funcționării stabile a LEA 110 kV de interconexiune pentru diferite topologii de interconexiune prin LEA 110 kV. Problema realizării interconexiunii prin LEA 110 kV este complexă și necesită o abordare individuală privind modul de realizare.

**Cuvinte-cheie:** interconectare, linii 110 kV, dispozitive de ajustare, unghi de diferență de fază, schimbare bidirecțională de putere activă, mod permanent.

### Оценка обмена мощностью по ВЛ 110 кВ румынской и молдавской энергосистем

<sup>1</sup>Постолатий В. М., <sup>1</sup>Берзан В. П., <sup>1</sup>Быкова Е. В., <sup>1</sup>Бошняга В. А., <sup>1</sup>Суслов В. М., <sup>1</sup>Ермураки Ю. В.,  
<sup>2</sup>Григораш Г., <sup>2</sup>Гаврилаш М., <sup>2</sup>Иstrate М.

<sup>1</sup>Институт Энергетики, Кишинэу, Республика Молдова

<sup>2</sup>Технический Университет "Георге Асаки", Яссы, Румыния

**Аннотация.** Цель данной статьи - оценить возможность технического использования линий напряжением 110 кВ для соединения энергосистем Республики Молдова и Румынии с учетом режима единой энергосистемы, который включает в себя энергосистемы стран СНГ, в том числе Молдовы, Румынии, Украины и других стран региона. В схеме расчета установившегося режима при синхронной работе объединенной системы была выделена зона межсистемного соединения молдавской и румынской энергосистем: ВЛ 110 кВ Стынка-Костешть, Цуцора (Fai) - Унгень и Хушь-Чиоара. В существующей топологии электрических сетей потоки энергии на интерфейсе энергосистем имеют направление из Республики Молдова в Румынию. Изменение направления потоков мощности возможно, когда предусмотрена установка в ВЛ 110 кВ устройств для регулирования фазового угла. Устройства регулирования угла разности фаз трансформаторного типа были введены в эквивалентной схеме ВЛ 110 кВ для обеспечения технических возможностей совместной работы двух энергосистем и осуществления режима двунаправленной передачи мощности. Результаты расчетов установившегося режима продемонстрировали возможность достижения двунаправленного обмена мощностью между взаимосвязанными энергетическими системами путем регулирования угла разности фаз. Была показана возможность стабильной работы при использовании ВЛ 110 кВ в качестве межсистемных линий связи молдавской и румынской энергосистем. Вопрос об использовании ВЛ 110 кВ в качестве линий межсистемной связи энергосистем требует индивидуального подхода при его решении.

**Cuvinte-cheie:** межсистемная связь, линия 110 кВ, устройство регулирования, угол разности фаз, двухсторонний обмен активной мощностью, установившийся режим.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание межсистемной связи энергосистем в Республике Молдова и Румынии представляет собой актуальную проблему не только для присоединения на напряжение 330-400 кВ, но и на напряжении 110 кВ. Электрические распределительные сети 110 кВ в Румынии и Республике Молдова имеют возможность прямого физического подключения. Такое подключение линий 110 кВ уже использовалось как в синхронной работе энергосистем, так и в островном режиме. Синхронная работа с использованием линий с напряжением 110 кВ существовала до тех пор, пока была электрическая связь энергосистем с применением воздушной линии 400 кВ (Молдавская государственная районная электростанция - МГРЭС) - Вулкэнешть-Исакча (Румыния).

Синхронная работа энергосистем Молдовы, Румынии и Украины существовала при работе ЛЭП 750 кВ Южно-Украинская АЭС (Украина) – Исакча (Румыния) - Варна (Болгария), ВЛ -400 кВ МГРЭС (Молдова)), а также ВЛ 330 кВ, связывающих энергосистемы Молдовы и Украины.

После отделения энергетических систем стран СНГ и восточно-европейских стран в результате приостановления работы 750 кВ и отсоединения ЛЭП 400 кВ Вулкэнешть – Варна, параллельная работа молдавской и румынской электроэнергетических систем стала невозможной.

Линия с напряжением 750 кВ ЮЖУ АЭС-Исакча на территории Украины и Молдовы практически уничтожена. Линия 400 кВ МГРЭС-Вулкэнешть-Исакча находится в работоспособном состоянии, но используется только на участке МГРЭС- Вулкэнешть. Участок ВЛ 400 кВ Вулкэнешть - Исакча технически работоспособна, но не используется как линия межсистемной связи энергосистем. Трансформаторная подстанция 400 кВ Вулкэнешть является важным энергетическим центром на юге Молдовы, который питается от МГРЭС через ВЛ 400 кВ. Подстанция 400 кВ «Вулкэнешть» - это узел, который обеспечивает по ВЛ 110 кВ питание потребителей на юге Республики Молдова и частично на юго-западе Украины.

В настоящее время воздушные линии напряжения 110 кВ Костешть-Стынка, Унгень-Цуцора (Fai), Чиоара-Хушь и Готешть-Фэлчиу не эксплуатируются. Эти линии находятся в работоспособном состоянии и могут в настоящее время обеспечить межсистемную связь румынской и молдавской энергетических систем в островном режиме.

Но, при определенных условиях, они могут быть использованы как линии для межсистемной связи энергосистем [1].

В настоящее время начаты работы по реализации асинхронного режима связи энергосистем Республики Молдова и Румынии с использованием технологии Back-to-Back (BtB) - вставок постоянного тока (ВПТ).

На первом этапе рассматривается строительство ВПТ в Вулканештах и новой ВЛ 400 кВ Вулкэнешть-Кишинэу. На следующих этапах присоединения планируется строительство установок ВПТ в Стрэшень и Бэлць и строительство соответствующих высоковольтных линий связи Стрэшень-Унгень (330 кВ) и Бэлць-Сучава (400 кВ), [2].

Это обеспечит асинхронную работу электроэнергетической системы Молдовы с выполнением условия **n-1**.

Ожидается, что мощность установки ВПТ в Вулкэнешть составит 600 МВт [3]. Однако следует упомянуть следующий факт. Ввод в эксплуатацию ВПТ Вулкэнешть не решает проблему эксплуатации ВЛ 110 кВ, которые уже существуют.

Линии напряжением 110 кВ из западной части Республики Молдова могут оказать влияние на укрепление связей не только между молдавской и румынской электроэнергетическими системами, но и на региональном уровне, в частности, повлиять на режим энергосистемы Украины.

Это предположение исходит из факта, что энергетические системы Молдовы и Украины взаимосвязаны 6-ю ВЛ 330 кВ и 14 ВЛ 110 кВ, а реализация новых межсистемных связей или активизация существующих приведет к изменению режима функционирования как молдавской энергосистемы, так и энергосистем Румынии и Украины [4,5].

Реализация проекта строительства ВПТ в Вулкэнешть также приведет к изменениям распределения потоков мощности во взаимосвязанных энергосистемах.

Эти изменения определяются как топологией электрических сетей, так и техническими характеристиками объединенной энергосистемы, а также условиями, налагаемыми рынком электроэнергии.

Целью настоящей работы является рассмотрение системных аспектов использования ВЛ – 110 кВ для связи энергосистем Молдовы и Румынии при сохранении синхронной связи с энергосистемой Украины и определение режимов обмена мощности по ВЛ 110 кВ между энергосистемами Республики Молдова и Румынии в стационарном синхронном режиме, когда ВЛ 110 кВ имеют статус линий межсистемной связи.

## I. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

С методологической точки зрения поставленная задача решается в следующей последовательности:

- подготовка расчетной схемы объединенной электроэнергетической системы при введении в качестве межсистемных связей, существующих ВЛ 110 кВ на стыке энергосистем Молдовы и Румынии;
- выполнение расчета установившегося режима объединенной (единой) энергосистемы в существующей топологии (базовый сценарий) для случая синхронной работы всех энергетических систем, включенных в расчетную схему;
- определение значений разности фаз напряжения в узлах на стыке интерфейсов энергосистем Республики Молдова и Румынии с напряжением 110 кВ и в других узлах участков линий 110 кВ, которые могут обеспечить физическое присоединение энергосистем;
- разработка и корректировка схемы расчета установившегося режима при модификации топологии электрических сетей в расчетной схеме (совместная работа ВЛ 110 кВ в качестве линий межсистемной связи) при введении в расчетную схему элементов для управления разностью фаз для регулирования значений и направлений потоков мощности между энергосистемами Молдовы, и Румынии;
- выполнение расчетов для различных вариантов реализации межсистемной связи молдавской и румынской энергосистем;
- анализ результатов расчета режимов и формулировка выводов и рекомендаций.

Для синхронизации и регулирования потоков мощности в линиях 110 кВ на интерфейсе молдавской и румынской энергосистем могут использоваться различные технические устройства, в том числе: фазорегулирующие трансформаторы (ФРТ) [6,7] с круговым преобразованием фазы, которые могут обеспечивать синхронный режим работы энергосистем с разными стандартами по частоте [8-9].

При дополнении этих устройств функцией отслеживания и настройки некоторой дополнительной мгновенной величины, которую мы будем называть

дополнительной скоростью ( $\Delta\omega t$ ) изменения угла вектора напряжения, можно получить согласующее устройство для обеспечения параллельной работы энергосистем с разными стандартами по частоте.

В [6,7] описаны принципы создания данных устройств. Вопросы создания и применения таких устройств рассматриваются в Институте энергетики из Республики Молдова [10-13]. Такие устройства также используются для решения различных проблем, касающихся режимов работы энергосистем [14,15].

ФРТ предназначены для решения двух проблем, которые обусловлены рассматриваемой нами задачей:

- координация фаз векторов напряжения между узлами, например, ВЛ 110 кВ, путем введения дополнительной угловой скорости векторов напряжения ( $\Delta\omega t$ ) между этими узлами, принадлежащими разным энергосистемам;
- создание дополнительного углового сдвига (разности фаз) векторов напряжения между взаимосвязанными узлами, который регулируется по значению и знаку в соответствии с заданным направлением обменного потока мощности между рассмотренными энергосистемами.

Принимая априори гипотезу, что такое оборудование имеется, мы можем исследовать установившийся режим работы энергосистем, полагая его синхронным или квазисинхронным. Это позволит выявить основные особенности установившегося режима работы взаимосвязанных энергосистем и сформулировать рекомендации, касающиеся возможности и целесообразности использования ВЛ 110 кВ в качестве межсистемных связей между молдавской и румынской энергосистемами.

Проблема изучения установившегося режима в связи с реализацией межсистемной связи между Молдовой и Румынией через ВЛ 110 кВ была рассмотрена при условии, что линии (Stânca-Costești, Țuțora (Fai) - Ungheni и Nuși-Cioara) оснащены оборудованием ФРТ для регулирования угла разности (сдвига) фаз напряжений в узлах, принадлежащих разным энергосистемам, которые связаны через ВЛ 110 кВ (рис. 1).

3. ВЛ 400 кВ Вулкэнешть – Исакча отключена, а ВЛ 400 кВ МГРЭС-

Вулкэнешть-Кишинэу включена. Для этих условий ВЛ 110 кВ оборудованы устройствами управления разностью фаз (фазовым сдвигом) при синхронном (квазистационарном) режиме работы (ФРТ).

## II. ИНФОРМАЦИЯ О РАСЧЕТНОЙ СХЕМЕ РЕЖИМОВ

На рис. 2 приведена условная структура расчетной схемы установившегося режима. В ней условно показаны связи энергосистемы Молдовы с энергосистемами Румынии, Украины и связь с другими энергосистемами, которые включены в расчетную схему.

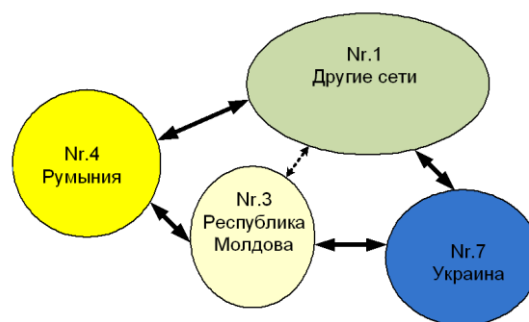


Рис. 2. Структура взаимодействия энергосистем при расчете установившегося режима.

В таблице 1 представлены данные расчета установившегося режима энергосистемы.

## III. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

### A. Базовый режим

Расчеты установившегося режима для принятой (существующей) сети были выполнены для рассмотренной энергосистемы с выделением зональных энергосистем (районов), с которыми связана энергетическая система Молдовы (рис. 2). В качестве точки отсчета для определения значений углового фазового угла в узлах генерации и нагрузки был выбран балансирующий узел украинской энергосистемы. Обобщенные данные о результатах расчетов интегральных показателей по выделенным районам объединенной энергосистемы представлены в таблице 2 для принятого базового режима. Расчеты проводились с использованием программного обеспечения RASTRWIN

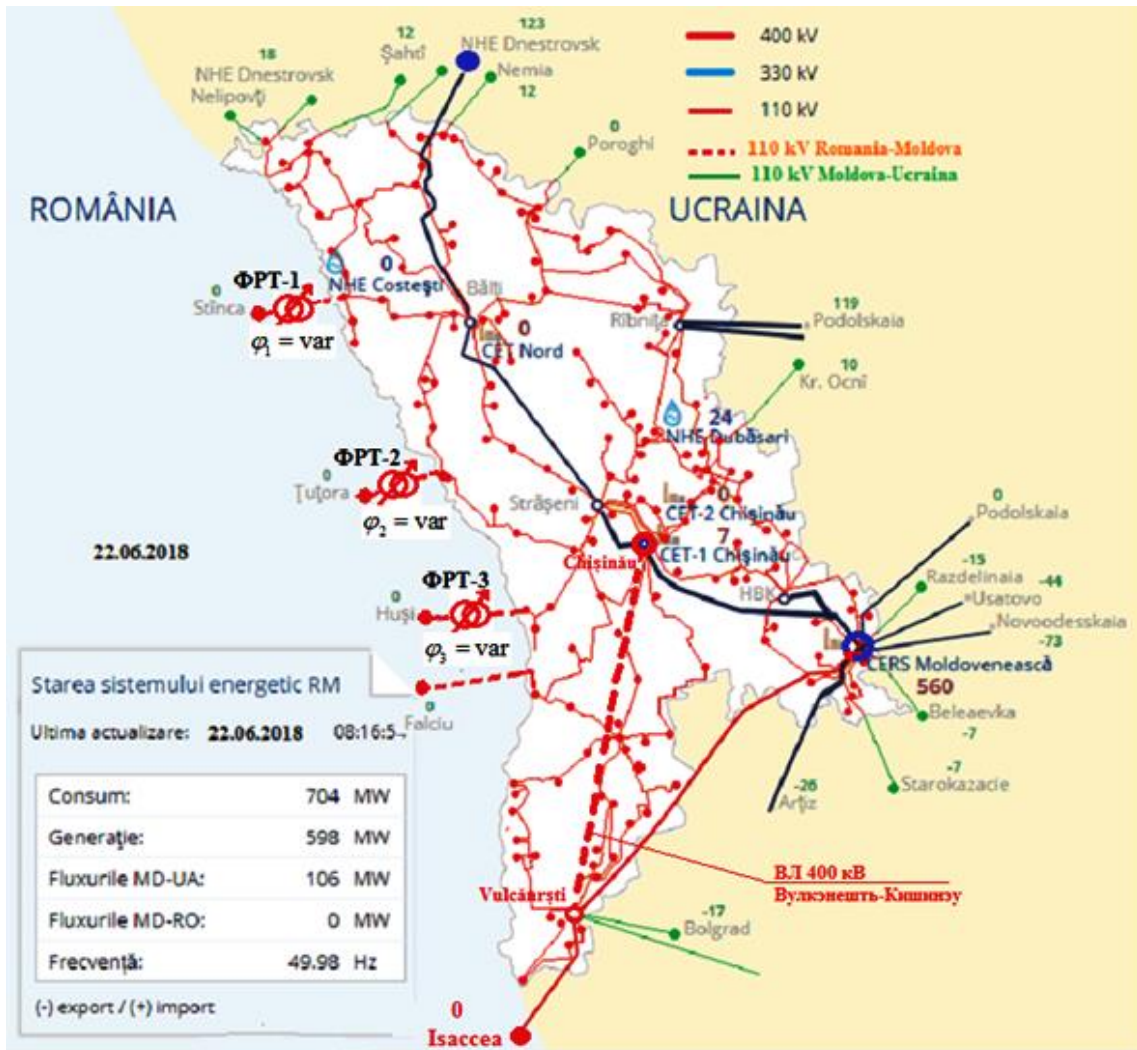


Рис. 1. Топология электрических сетей напряжения 110 кВ и 400 кВ на стыках электроэнергетических систем Молдова - Румыния и Молдова – Украина.

Таблица 1

Исходные данные расчетной схемы		
№	Название показателя	Значение
1	Число узлов $N_n$	5109
2	Число ветвей $N_l$	7821
3	Число районов $N_r$	4
4	Число отключенных узлов $N_{n.откл}$	197
5	Число отключенных ветвей, $N_{l.откл}$	409
6	Число узлов балансировки, $N_{бал}$	2
7	Число узлов с источниками генерации, $N_G$	855
8	Число трансформаторов, $N_{Tr}$	2336
9	Число ВЛ, $N_{ВЛ}$	5485
10	Число выключателей, $N_{вык}$	-
11	Суммарная мощность генерации $P_G$ , МВт	122052

Продолжение таблицы 1

12	Суммарная потребляемая мощность (нагрузки) $P_s$ , МВт	118839
13	Эквивалентная мощность переменных потерь энергии $dP_{var}$ , МВт	2961
14	Мощность узла балансировки $P_{бал}$ , МВт	-265
15	Эквивалентная мощность постоянных потерь энергии, $dP_{const}$ , МВт	251,42
16	Минимальное отклонение напряжения при условии минимальных потерь в энергосистеме $\Delta U_{min}$ , %	-21,61
17	Максимальное отклонение напряжения при условии максимальных потерь в энергосистеме $\Delta U_{max}$ , %	17,29

Таблица 2

Расчетные значения интегральных показателей для базового режима ЭЭС (рис. 2)

№.	Название	$P_G, MW$	$P_S, MW$	$dP, MW$	$P_{cons.}, MW$	$\Delta P, MW$
1	Другие сети	78241	77769	1935,84	79705	-1464
3	Молдова	1127	1151	82,68	1234	-107
4	Румыния	10267	9416	281,38	9698	569
7	Украина	32418	30502	912,93	31415	1003

$\Delta P$ - обменная мощность между выделенными районами расчетной схемы: (-) экспорт и (+) импорт

Анализ результатов расчетов базового установившегося режима показал, что имеются существенные отличия между значениями фазных углов напряжений в узлах нагрузки, через которые могут быть реализованы межсистемные связи энергетических систем Румынии и Республики Молдова. Эта разность фазовых углов определяет направление и значение потоков мощности через линии

межсистемной связи в случае, если эти связи физически выполняются для синхронного режима работы энергосистем.

На стыке энергосистем Молдовы и Румынии узлы напряжения характеризуются показателями в базовом расчетном режиме (синхронная связь), которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

Модули и фазовые сдвиги векторов напряжений в узлах энергосистем Молдовы и Румынии в приграничной зоне

Модуль и фаза напряжения	Узлы ВЛ 110 кВ						Узлы ВЛ 400кВ	
	Стынка	Костешть	Цуцора	Унгень	Хушь	Чиоара	Исакча	Вулкэнешть
$U, kV$	120.3	110.9	118.3	102.9	119.9	103.1	403.0	391.2
$\varphi, \text{эл.град}$	$\pm 3.3$	74	-3.5	68.8	5.4	68.6	7.6	101.5

Для ВЛ 110 кВ сдвиг фаз векторов напряжений в прилегающих узлах составляет в базовом режиме  $|\Delta\varphi_u| = (63 - 77)^\circ$ , а для ВЛ 400 кВ Исакча- Вулкэнешть эта разность фаз несколько больше.

**Б. Угловая характеристика линий межсистемной связи**

Рассмотрим энергообмен между двумя условными энергосистемами ЭЭС1 и ЭЭС2 по линии межсистемной связи, используя систему относительных единиц (рис.3 и рис. 4)



Рис.3. Эквивалентная схема межсистемной связи.

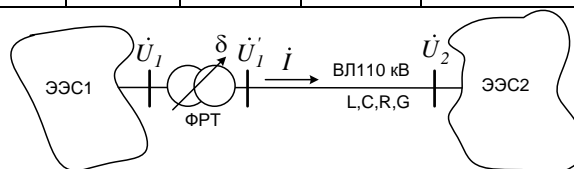


Рис.4. Эквивалентная схема межсистемной связи с регулированием угла разности фаз.

Для рис. 4 можно записать формулу для расчета тока линии

$$i = \frac{\dot{U}'_1 - \dot{U}'_2}{Z_n} \quad (1)$$

где:  $\dot{U}'_1 = U_1 e^{j\varphi_{u1}}$ ;  $\dot{U}'_2 = U_2 e^{j\varphi_{u2}}$  - комплексы напряжений в узлах линии межсистемной связи;

$\varphi'_{u1} = \varphi_{u1} + \delta$  - фазовый угол напряжения на выходе ФРТ;

$\delta$  - угол, являющийся характеристикой устройства ФРТ.

Угол  $\delta$  можно считать положительным или отрицательным. Будем полагать, что при

вращении вектора  $\dot{U}'_1$  против часовой стрелки угол  $\delta$  является положительной величиной, а по часовой стрелке – отрицательной. В предельном случае угол  $\delta$  может изменяться в пределах  $\pm 360^\circ$ .

Принимая сформулированные выше условия, значение тока в линии межсистемной связи определяется по формуле:

$$I_{\delta} = \frac{\dot{U}'_1 - \dot{U}_2}{Z_{л}}, \quad (2)$$

где:  $\dot{U}'_1 = U_1 e^{j\varphi_{u1}} = U_1 e^{j(\varphi_{u1} + \delta)}$  - напряжение в узлах на выходных шинах ФРТ;

$Z_{л} = Z_{л} e^{j\varphi_z}$  - импеданс линии межсистемной связи;

$$Z_{л} = \sqrt{R_{л}^2 + X_{л}^2}; \quad \varphi_z = \arctg \frac{X_{л}}{R_{л}} -$$

продольные параметры линии.

Примем также, что выполняется условие  $U_1 = U'_1 = U_2 = U$ , т.е. равенство модулей напряжения в узлах расчетной схемы и  $\varphi_{u1} = const, \varphi_{u2} = const, \varphi_z = const$ . Тогда из уравнения (2) можно получить соотношение:

$$I = \frac{U}{Z_{л}} \left( e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2} - \varphi_z)} \right) \quad (3)$$

где:  $I_{\delta} = \frac{U}{Z_{л}}$  - значение базового тока линии;

$K_{\varphi_{u1}} = e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_z)} = const.$ ;  $K_{\varphi_2} = e^{j(\varphi_{u2} - \varphi_z)} = const.$  - коэффициенты, значения которых зависят от параметров линии межсистемной связи (угол  $\varphi_z$ ) и углов  $\varphi_{u1}$  и  $\varphi_{u2}$  в узлах присоединенных энергосистем.

В относительных единицах значение тока  $\dot{I}^*$  в линии межсистемной связи вычисляется по формуле:

$$\dot{I}^* = e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2} - \varphi_z)}. \quad (4)$$

Обменная мощность узлов 1 и 2 в системе относительных единиц вычисляется с помощью формул:

$$\begin{aligned} S_1^* &= \dot{U}_1^* \dot{I}^* = \left( e^{j(2\varphi_{u1} - \varphi_z)} e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2} + \varphi_{u1} - \varphi_z)} \right); \\ S_2^* &= \dot{U}_2^* \dot{I}^* = \left( e^{j(\varphi_{u1} + \varphi_{u2} - \varphi_z)} e^{j\delta} - e^{j(2\varphi_{u2} - \varphi_z)} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

а передаваемая мощность  $S_{12}$  по линии межсистемной связи по формуле:

$$\begin{aligned} S_{12} &= (\dot{U}'_1 - \dot{U}_2) \dot{I} \simeq U \left( e^{j(\varphi_{u1} + \delta)} - e^{j\varphi_{u2}} \right) * \\ &* I \left( e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2} - \varphi_z)} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку в относительных единицах имеем равенство величин  $U^* = I^* = 1$ , относительное значение кажущейся мощности будет определяться по формуле:

$$\begin{aligned} S_{12}^* &= \left( e^{j\varphi_{u1}} e^{j\delta} - e^{j\varphi_{u2}} \right) * \\ &* \left( e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2} - \varphi_z)} \right) = \\ &= e^{j(2\varphi_{u1} - \varphi_z + 2\delta)} - 2e^{j(\varphi_{u1} + \varphi_{u2} - \varphi_z + \delta)} + e^{j(2\varphi_{u2} - \varphi_z)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из уравнения (7) получаем формулы для расчета активной и реактивной составляющих кажущейся передаваемой мощности по линии:

$$\begin{aligned} P_{12}^* &= \cos(2\varphi_{u1} - \varphi_z + 2\delta) - \\ &- 2\cos(\varphi_{u1} + \varphi_{u2} - \varphi_z + \delta) + \cos(2\varphi_{u2} - \varphi_z); \\ Q_{12}^* &= \sin(2\varphi_{u1} - \varphi_z + 2\delta) - \\ &- 2\sin(\varphi_{u1} + \varphi_{u2} - \varphi_z + \delta) + \sin(2\varphi_{u2} - \varphi_z) \end{aligned} \quad (8)$$

С помощью уравнений (4)-(8) можно рассчитать ток  $\dot{I}^*$ , значение кажущейся обменной мощности узлов  $S_1^*, S_2^*$ , передаваемую мощность по ВЛ  $S_{12}^*$ , активную  $P_{12}^*$  и реактивную  $Q_{12}^*$  составляющих передаваемой мощности. При этих вычислениях воспользуемся данными расчета базового установивившегося режима:  $\varphi_{u1} \approx 3^\circ$  - усредненное значение фазового угла напряжений в узлах румынской энерго-

системы:  $\varphi_{u2} \approx 70^0$  - усредненное значение фазового угла напряжений в узлах 110 кВ молдавской энергосистемы;  $\varphi_z$  - усредненное значение фазового угла, создаваемого собственными параметрами линии 110 кВ, используемой в качестве линии межсистемной связи.

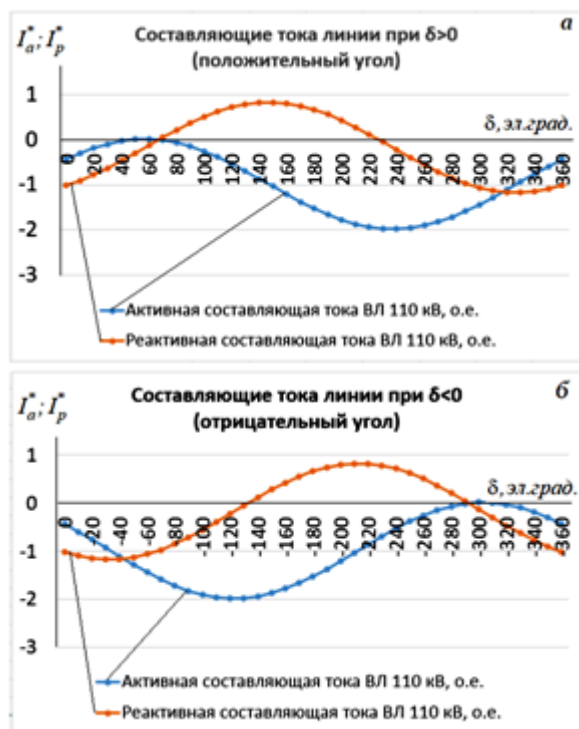


Рис.5. Характеристики изменения активной и реактивной составляющих тока линии при положительных (а) и отрицательных (б) значениях угла ФРТ.

Угловые характеристики передачи активной и реактивной мощности по линии 110 кВ при регулировании угла  $\delta$  с помощью ФРТ линии представлены на рис.6.

Угловые характеристики тока и мощности рассмотрим с учетом принятой априори гипотезы о направлении тока в линии – от узла 1 в направлении узла 2 (рис.4). Будем полагать, что если при вычислении получаем отрицательные значения активной и реактивной мощности, то обмен мощностью имеет место от узла 2 в сторону узла 1. При принятии этих условий следует, что отрицательные значения расчетных величин, полученных из формулы (8), соответствуют перетокам активной и/или реактивной мощности из молдавской энергосистемы в румынскую, а положительные значения - из румынской в молдавскую энергосистему.

На рис. 5 представлены угловые характеристики для активной и реактивной составляющих тока линии межсистемной связи 110 кВ при регулировании угла ФРТ в пределах  $0 \leq \delta \leq \pm 360^0$ .

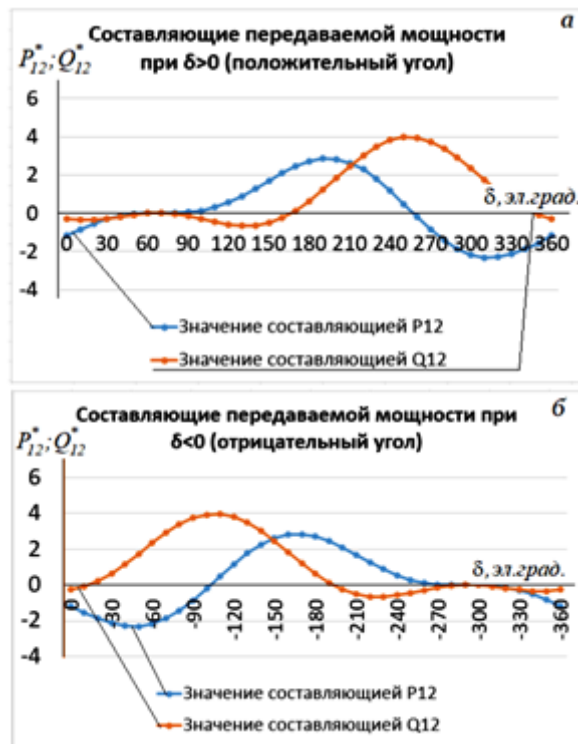


Рис. 6. Характеристики изменения активной и реактивной мощности, передаваемой по линии при положительных (а) и отрицательных (б) значениях угла ФРТ.

Укажем на некоторые особенности угловой регулировочной характеристики управления перетоком мощности по линии межсистемной связи. Угловая характеристика по мощности (рис.6) отличается от угловой характеристики по току (рис.5). Кроме того, угловая характеристика по мощности является несимметричной функцией угла  $\delta$  и зависит от направления вращения этого угла - по часовой или против часовой стрелки.

Угловые характеристики имеют разную чувствительность по углу регулирования  $\delta$ ,

$$\text{т.е. } \frac{dP_{12}^*}{d\delta} = \text{var.} \quad \text{и} \quad \frac{dQ_{12}^*}{d\delta} = \text{var.} \quad \text{Можно}$$

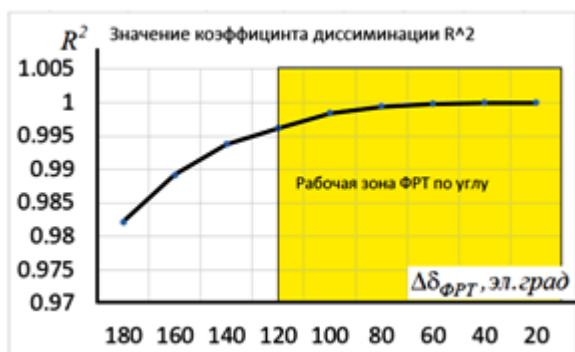
выделить одну зону с относительно большой чувствительностью по передаваемой мощности и малой чувствительностью. В зоне малой чувствительности наблюдается слабая зависимость как активной, так и реактивной составляющих мощности от угла ФРТ. Следовательно, обеспечение



эффективности регулирования передаваемой мощности по линии межсистемной связи не является тривиальной задачей и при выборе режима работы ФРТ необходимо учесть ряд взаимовлияющих параметров межсистемной связи.

*В. Межсистемные связи по ВЛ 110 кВ Стынка-Костешть, Цуцора-Унгень, Хушь-Чиоара*

Линии ВЛ 400 кВ Исакча-Вулкэнешть и Вулкэнешть-Кишинэу отключены. Для обеспечения режима двухсторонней передачи мощности ВЛ 110 кВ Стынка-Костешть оснащена устройством регулирования фазового сдвига ФРТ-1 (рис. 1). Устройства ФРТ имеют диапазон регулирования угла разности фаз между входным и выходным напряжениями  $\Delta\delta = \delta_{\max} - \delta_{\min}$ , где  $\delta_{\max}, \delta_{\min}$  - верхний и нижний пределы рабочего диапазона регулирования угла  $\delta_{\text{ФРТ}}$ . В численном выражении значение угла ФРТ изменяется в пределах  $\delta_{\text{ФРТ}} \leq \pm 60^\circ$ .



**Рис.7.** Оценка рабочего диапазона ФРТ по углу по значению коэффициента диссипации  $R^2$ .

Обосновать пределы рабочего диапазона регулирования угла  $\delta_{\text{ФРТ}}$  ФРТ можно на основе анализа зависимости значения коэффициента диссипации  $R^2$  при линейной аппроксимации угловой регулировочной характеристики ФРТ. На рис.7 представлена зависимость коэффициента диссипации  $R^2$  линеаризованной угловой регулировочной характеристики  $\delta_{\text{ФРТ}} = f(\Delta\delta)$ . Для расширения диапазона регулирования угла  $\delta_{\text{ФРТ}}$  в эквивалентной схеме замещения расчета установившегося режима в ВЛ 110 кВ добавляются добавочные (вторые) установки ФРТ.

Характеристики изменения потока активной мощности по этим линиям при изменении угла сдвига фазы  $\delta_{\text{ФРТ}}$  с помощью устройства ФРТ показаны на рис. 8, где  $\delta_{\text{ФРТ}}$  - угол сдвига фаз выходного напряжения относительно входного напряжения устройства ФРТ, включенного в расщелку ВЛ 110 кВ. Эти характеристики получены при передаче активной мощности отдельно по каждой из рассмотренных ВЛ 110 кВ.

В расчетной схеме RASTRWIN направление положительного потока активной мощности принято из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы. На рис. 8 приведены именно эти данные.

Усредненное расстояние между трансформаторными подстанциями в сетях 110 кВ составляет около 25 км, что можно принять в качестве расчетной длины ВЛ 110 кВ при оценке ее пропускной способности. При этих условиях пропускная способность ВЛ 110 кВ ограничена допустимым нагревом проводов и оценивается на уровне 50 МВт для одноцепной линии [16] при принятом значении ее натуральной мощности на уровне 30 МВт [17]. На рис. 8 приведены значения предельной передаваемой активной мощности по ВЛ 110 кВ по критерию допустимого нагрева проводов для традиционной линии. При увеличении сечения проводов возможно повышение пропускной способности ВЛ 110 кВ, в том числе применяя расщепление проводов в фазе [18] или использование проводов с повышенной рабочей температурой [19, 20].

Использование новых композитных термостойких проводов позволяет повысить передаваемую мощность ВЛ в 1.5-2 раза [19, 20], а, следовательно, и повысить пропускную способность ВЛ 110 кВ до 100 МВт на одну цепь. Исходя из сказанного, на рис. 8 и 9 указаны зоны по допустимой передаваемой активной мощности по ВЛ 110 кВ с учетом допустимого нагрева обыкновенных и композитных термостойких проводов.

Учитывая новые тенденции в строительстве линий электропередачи, например, при замене традиционных проводов на композитный термостойкий тип 3М ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced) или ACCC/TW (Aluminum Conductor Composite Core) [19] можно

обеспечить повышение предела пропускной способности одноцепной ВЛ 110 кВ, используемой в качестве линии межсистемной связи, до 100 МВт.

На основе полученных данных расчета установившегося режима (рис.8 и 9) можно определить рабочий диапазон ФРТ при управлении потоком активной мощности между молдавской и румынской энергосистемами.

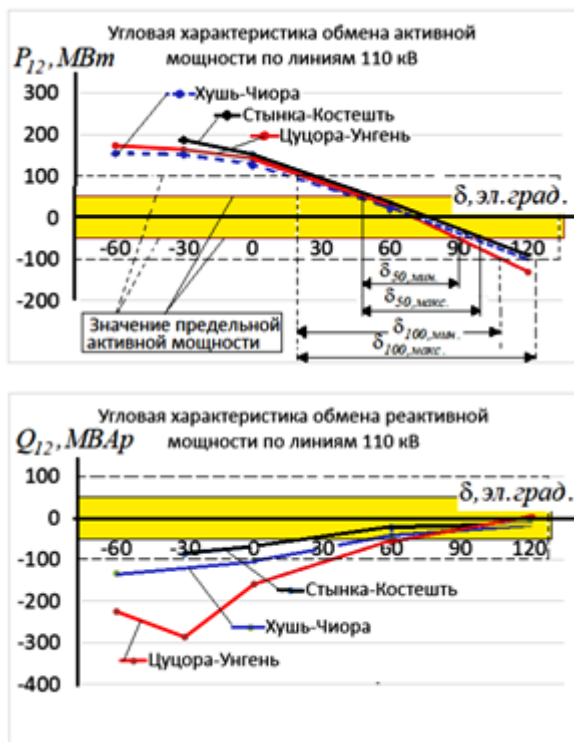


Рис. 8. Угловые характеристики передачи активной и реактивной мощности ВЛ 110 кВ по расчетам в RASTRWIN.

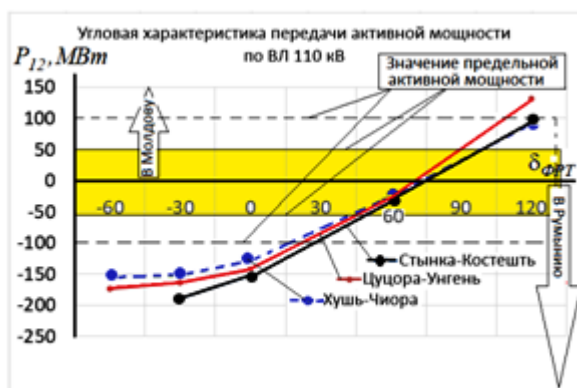


Рис. 9. Угловые характеристики передачи активной мощности ВЛ 110 кВ в системе координат экспорт (минус)/импорт (плюс).

На рис.10 приведены оценочные данные о предельных значениях пропускной способности ВЛ 110 кВ при их раздельной

работе в качестве линий межсистемной связи для передачи активной мощности в молдавскую энергосистему.

Полученные результаты подтверждают возможность реализации межсистемной связи энергетических систем Молдовы и Румынии по существующим линиям 110 кВ. Использование в этих линиях специализированного оборудования может обеспечить высокую степень гибкости в их работе. Технически возможно регулировать величину, а также направление потоков мощности по ВЛ 110 кВ, используемых как линии межсистемной связи между энергосистемами Молдовы и Румынии.

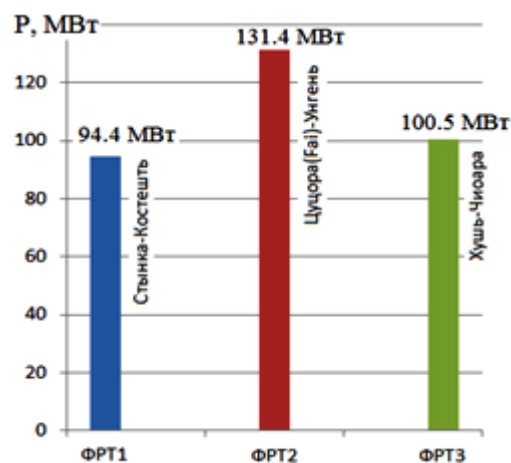


Рис.10. Оценочное значение предельного перетока активной мощности в молдавскую энергосистему по отдельно включенной ВЛ 110 кВ (без учета ограничения по нагреву проводов).

Параллельная работа этих линий, даже оснащенных специальными устройствами регулирования фазового угла, не является тривиальной задачей. Сложность ведения режима обусловлена как необходимостью индивидуального регулирования угла разности фаз напряжений каждого ФРТ в данной линии, так и необходимостью постоянного согласования частот параллельно работающих энергосистем, которые имеют разные стандарты поддержания частоты.

### Г. Параллельная работа ВЛ 110 кВ

Рассмотрим одновременную работу ВЛ 110 кВ, оснащенных устройствами управления фазой ФРТ. Исследование особенностей совместной работы ВЛ 110 кВ

выполним при следующих режимных условиях:

- регулирование угла разности фаз при определении характеристик перетока мощности осуществляем только с помощью одной связи при  $\delta_{ФРТ} = var.$  ;
- в остальных двух линиях ВЛ 110 кВ устанавливаем постоянное значение угла сдвига фаз напряжений ФРТ  $\delta_{ФРТ} = +11.5^{\circ}$ .

Из сопоставления данных, приведенных на рис. 9 и рис.11, можно констатировать, что имеется взаимное влияние ВЛ 110 кВ на характеристики передачи активной мощности при их параллельной работе.



Рис. 11. Режим параллельной работы ВЛ 110кВ.

Д. Варианты режимов рассмотренных связей 110 кВ, которые обеспечивают поток мощности из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы при приемлемых уровнях напряжения в узлах схемы.

На основании проведенного анализа полученных расчетных данных удалось выделить режимы для двух условий:

1 – при раздельной работе всех связей (когда одна связь работает, а другие две отключены);

2 – при совместной работе межсистемных связей по ВЛ 110 кВ.

При раздельной работе связей величины возможных потоков мощности из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы характеризуются данными, приведенными на рис. 10. Как видно из указанных данных, по каждой из 3-х связей 110 кВ возможна передача мощности из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы в пределах 94÷131 МВт.

При применении сдвоенных ФРТ на указанных связях сохраняется запас по дальнейшему увеличению передаваемой мощности. Ограничения наступают из-за недостаточной пропускной способности ВЛ-110 кВ. Для увеличения их пропускной способности требуется применение либо дополнительных источников реактивной мощности, либо усиление самих ВЛ-110 кВ.

Совместная работа связей рассмотрена на примере одновременного включения связей Костешты – Стынка и Унгень – Fai (Iași), при отключенной связи Чоара – Хушь.

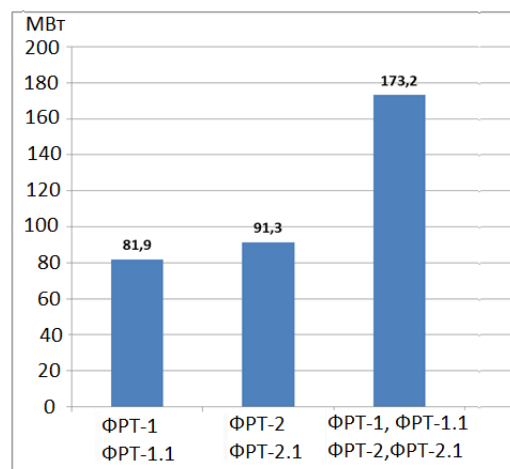


Рис.12. Возможная величина передаваемой мощности (МВт) из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы по двум связям ВЛ 110 кВ Костешты - Стынка - ФРТ-1; ФРТ-1.1; и Унгены – Цуцора (Fai) - ФРТ2; ФРТ-2.1; при их совместной (параллельной) работе.

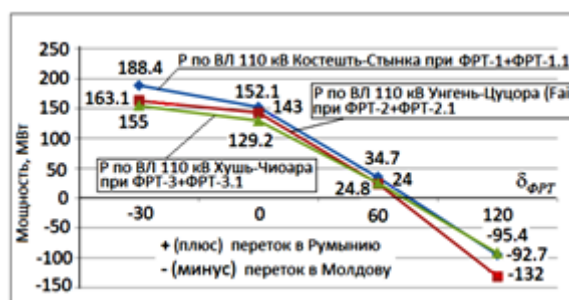


Рис. 13. Характеристики передачи активной мощности между энергосистемами Молдовы и Румынии по ВЛ-110 кВ при регулировании угла сдвига устройств ФРТ (при поочередном включении ВЛ).

На рис.13 приведены результаты расчетов величин передаваемой мощности при раздельной работе всех трех ВЛ 110 кВ и регулировании углового сдвига напряжений

ФРТ в каждой из них в пределах (-30) - (+120)°.

Данный режим характеризуется данными, приведенными на рис. 12. Из приведенных данных видно, что по двум связям (Костешты – Стынка и Унгень – Цуцора (Fai)), при их совместной (параллельной) работе возможна передача мощности 173 МВт из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы при удовлетворенных уровнях  $\delta_{ФРТ}$  напряжения в примыкающих узлах.

Результаты расчетов максимальной величины передаваемой мощности из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы при параллельной работе всех трех ВЛ 110 кВ представлены на рис 14.

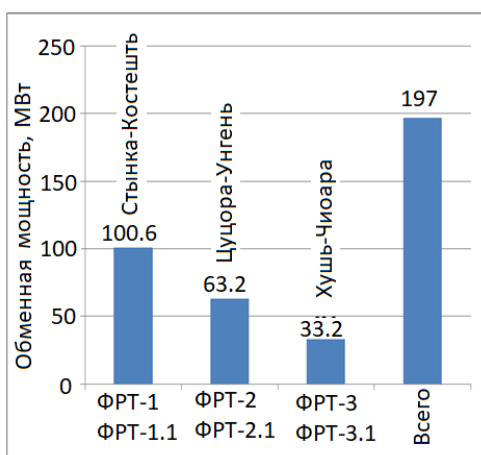


Рис. 14. Величина передаваемой мощности (МВт) из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы по трем ВЛ 110 кВ: Костешты - Стынка (ФРТ-1, ФРТ-1.1); Цуцора(Fai)-Унгень (ФРТ-2, ФРТ-2.1); Хушь-Чиора (ФРТ-3, ФРТ-3.1) при совместной работе всех трех ВЛ-110 кВ.

Максимальная величина передаваемой мощности при одновременном регулировании всех трех ВЛ-110 кВ достигает значения, равного 197 МВт.

Приведенные особенности передачи активной мощности по ВЛ 110 кВ при отдельной и совместной их работе указывают на нетривиальность задачи организации межсистемной связи по ВЛ 110 кВ даже для простейшего случая - при реализации синхронной связи энергосистем.

*Е. Параллельная работа ВЛ 110 кВ и ВЛ 400 кВ*

Особый интерес представляет анализ особенностей совместной работы ВЛ 110 кВ и ВЛ 400 кВ.

Межсистемная связь по ВЛ 400 кВ относится к типу сильных связей, а построение в перспективе ВЛ 400 кВ Вулкэнешть-Кишинэу достаточно сильно изменяет потокораспределение в молдавской энергосистеме [21].

В расчетной схеме все ВЛ 110 кВ дополнены устройствами ФРТ, которые позволяют регулировать угол сдвига фазы между входным и выходными векторами напряжения ФРТ. Условия регулирования потоков активной мощности по ВЛ 110 кВ указаны выше, т.е. в двух ВЛ 110 кВ устанавливается постоянное значение угла сдвига фаз ФРТ  $\delta_{ФРТ} = 11.5^{\circ}$ , а в одной ВЛ 110 кВ при помощи ФРТ угол  $\delta_{ФРТ}$  регулируется в пределах  $-60^{\circ} \leq \delta_{ФРТ} \leq +60^{\circ}$ . Результаты расчетов приведены на рис. 15.

Следует указать на то, что характеристики энергообмена по ВЛ 110 кВ весьма индивидуальны в зависимости от направления потока передаваемой мощности при регулировке угла разности фаз напряжений для заданных условий. Индивидуальность сохраняется и при раздельной работе линий связи 110 кВ и при совместной работе как всех рассмотренных ВЛ 110 кВ, так и при изменении топологии сети ВЛ 400 кВ в молдавской энергосистеме. Это указывает на то, что при организации межсистемной связи энергосистем Румынии и Молдовы необходим индивидуальный подход при управлении режимами передачи мощности по линиям межсистемной связи даже при синхронной работе энергосистем.

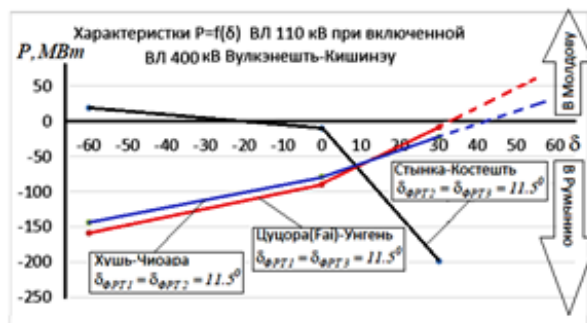


Рис.15. Характеристики передачи активной мощности по ВЛ 110 кВ при изменении топологии сети ВЛ 400 кВ (включена ВЛ 400 кВ Вулкэнешть-Кишинэу).

Синхронная работа энергосистем Румынии и Молдовы весьма возможна в будущем, По этим причинам результаты исследования, представленные в этой статье, могут быть очень полезными при создании гибкого

интерфейса с использованием оборудования ФРТ на стыке молдавской и румынской энергосистем с целью изменения как направления, так и величины обменной мощности между энергосистемами.

#### IV. Выводы

Моделирование и расчеты режимов объединенной энергосистемы (ОЭС) показали следующее:

1. В стационарном режиме энергетическая система Республики Молдова по отношению к энергосистеме Румынии является опережающей по углу сдвига векторов напряжения в смежных узлах. В результате этого при синхронной связи энергетических систем Молдовы и Румынии будет иметь место передача мощности от молдавской системы к румынской энергосистеме. Разность фазы напряжений в узлах, связанных между собой на интерфейсе энергосистем, составляет  $70-90^\circ$ . Поэтому для обеспечения перетока активной мощности в Молдову на интерфейсе энергосистемы необходимо использовать оборудование для введения дополнительного (согласующего) фазового сдвига векторов напряжений соединяемых узлов. Для этого могут использоваться ВПТ или устройства регулировки фазового угла (ФРТ). Использование устройств типа (ФРТ) для регулирования разности фаз на стыке румынской и молдавской электроэнергетических систем может обеспечить регулирование потоков обменной мощности через существующие ВЛ 110 кВ, которые выполняют функцию линий электропередачи для межсистемной связи энергосистем.
2. Использование ВЛ 110 кВ с оборудованием для управления разности фаз и отслеживанием отклонения угла фаз может рассматриваться как оборудование с дополнительными функциями, которое позволяет решить задачу совместной работы энергетических систем Республики Молдова и Румынии. Основные технические решения присоединения энергосистем должны быть реализованы при напряжении класса 330, 400 кВ с использованием ВПТ или трансформаторных установок типа ФРТ.
3. Была продемонстрирована возможность одновременной работы ВЛ 110 кВ Стынка-Костешть, Цуцора (Fai) -Унгень и Хушь-Чиоара при их оснащении оборудованием для регулирования угла фазы напряжения при обеспечении стабильного режима параллельной работы энергосистем Молдовы и Румынии. Максимальная величина передаваемой мощности из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы по трем ВЛ-110 кВ может достигать величины 170-190 МВт. Аналогичные уровни передаваемой мощности могут быть обеспечены из энергосистемы Молдовы в энергосистему Румынии при введении соответствующего дополнительного углового сдвига векторов напряжений соединяемых узлов.
4. Возможность обеспечения изменения направления потока передаваемой активной мощности через эти линии связи открывает перспективы для достижения гибкой связи между взаимосвязанными энергосистемами. Для определения режимов ограничения мощности в качестве критериев можно использовать следующее: допустимое отклонение напряжения в узлах нагрузки, в том числе на интерфейсе взаимосвязанных систем, значение предельной мощности по нагреву проводов или использование обобщенного критерия - уровень потерь мощности в энергосистемах.
5. На основе математического моделирования можно определить стабильный режим работы по межсистемному обмену мощностью по ВЛ 110 кВ при использовании оборудования для регулирования угла сдвига фазы при совместной параллельной работе и изменении топологии сетей 400 кВ. При использовании схемы включения одной ВЛ 110 кВ для связи энергосистем необходимо использовать устройства регулирования разности фаз напряжений узлов для обеспечения возможности

двухнаправленной передачи угла  $\delta$ . В этом контексте проблема использования технического решения реализации межсистемной связи является сложной задачей и требует индивидуального подхода, касающегося выбора технических средств выполнения межсистемной связи из-за взаимного влияния и чувствительности режима в молдавской системе к топологии ВЛ 400 (330) кВ, а также сетей 110 кВ.

## V. ЛИТЕРАТУРА

- [1] [https://www.google.ru/search?q=Transelectrica+Reteaua+electrica+de+transport+a+Romanie&newwindow=1&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjGkYjyr77aAhUQaFAKHdNfC7UQ\\_AUICigB&biw=1366&bih=661#imgsrc=YFpjCYIvZEDkPM](https://www.google.ru/search?q=Transelectrica+Reteaua+electrica+de+transport+a+Romanie&newwindow=1&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjGkYjyr77aAhUQaFAKHdNfC7UQ_AUICigB&biw=1366&bih=661#imgsrc=YFpjCYIvZEDkPM): (дата посещения 16.04.2018)
- [2] STRATEGIA ENERGETICĂ a Republicii Moldova pînă în anul 2030 [ENERGY STRATEGY of the Republic of Moldova until year 2030]. Available at: <http://lex.justice.md/md/346670/> (на румынском языке) (дата посещения 12.03.2018).
- [3] Proiectul de interconectare a sistemelor electroenergetice Moldova-România [The interconnection project of Moldova-Romania power systems]. Available at: [http://www.moldelectrica.md/ro/finances/mold\\_rom\\_project](http://www.moldelectrica.md/ro/finances/mold_rom_project) (дата посещения 13.03.2018).
- [4] Postolati V.M., Golub I.V., Bykova E.V., Shevchenko N.K., Suslov V.M., Gore N.S. Modeling of variants of electric power systems development of the Republic of Moldova in view of the parallel operation with power systems of neighboring countries. *Problems of the regional energetics*, 1(15) 2011, pp. 18-30. ISSN 1857-0070. <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyijzhurnal-n-115-2011>. (дата посещения 13.03.2018).
- [5] Postolaty V. M., Berzan V. P., Bycova E. V. Rejimy energosistem Moldovy pri vvedenii v rabotu vsnavki postoiannogo toka na podstantii Velcanesti dlea sveazi s energosistemoi Rumynii [Modes of the Moldova's power system with back-to-back installation at the substation Vulcanesti for connection with the power system of Romania]. *Electrotechnic and computer systems*, 2017. № 25 (101), pp.230-239. ISSN 2221-3805. Available at: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=907>. (дата посещения 13.03.2018).
- [6] Postolaty V. M. *Kompaktnye upravleaimye samokompensiruiusciesea visokovoltmie linii elektroperedaci peremennogo toka* [Compact Controlled self-compensating high voltage alternating current Electrical Lines (in three parts) /Inst. Energetiki ANM/ –Kishinev: TASM, 2017.- 732 с. ISBN 978-9975-62-404-6
- [7] Postolaty V. M., Calinin L. P., Zaitsev D. A., Bycova E. V. *Sovremennye sredstva regulirovania peretokov moscinosti i effektivnosti primeneia ih v energosistemah* [Modern means of regulation of power flows and efficiency of their application in power systems]. *Sborn. trudov mejdunarod. conferentii «EM– 2005»*[Proc. Int. Conf. Energy of Moldova – 2005: Regional development issues, 21-24 September 2005, Chisinau, Moldova]. pp. 206-219. ISSN 978-9975-4123-5-3
- [8] Voitovschii A. V., Calinin L. P. [Investigation of the operation mode of a phase-regulating transformer with a circular voltage phase transformation.] *Issledovanie rejima raboty fazoregulituiuscego transformatora s krugovym preobrazovaniem fazy napreajenia (In Rissian)* . Sb. naucnih trud.: *Optimizatia constructii, regu-lirovanie rejimov*. Ch.: Stiinta, 1987.-pp.77-84.
- [9] Kalinin L. P., Zaițev D. A., Tîrșu M .S., Golub I. V. *Harakteristiki fazopovorotnogo transfor-matora, vpolnenogo po sheme „mnogougolinik”* [Characteristics of the Phase-shifting Transformer Realized According to the "Polygon" Connection] *Problems of the regional energetics*, 3(35) 2017, pp. 1-8. doi:10.5281/zenodo.1188531
- [10] Golub I. V. *Odnotransformatornoe fazoreguliruiuscee ustroistvo dlea upravlenia potokami moscinosti v electriceskih seteah* [One Core Phase Shifting Transformer for Control of the Power Flow Distribution in Electric Networks] *Problems of the regional energetics*, 2(31), 2016, pp.1-10. doi:10.5281/zenodo.1208188.
- [11] Boșneaga V. A., Suslov V. M. *Trehelementnoe reaktorno-kondensatornoe ustroistvo dlea sveazi asinhrono rabotaiuscih energisistem peremennogo toka* [Three-element Reactor-Capacitor Device for Flexible Link Between Non-Synchronous Power Systems] *Problemele energeticii regionale*, 2(31), 2016, pp.39-47.(in Russian), doi:10.5281/zenodo.1208200.
- [12] Golub I. V., Zaițev D. A., Zubareva I. G. *Modifitirovannoe dvuhtransformatornoe fazoreguliruiuscee ustroistvo, vpolnennoe na osnove klassiceskoï odnotransformatornoï shemy «Delta Connection»* [Modified Two-core Phase-shifting Transformer Based on the Classical «Delta Connection» Scheme]). *Problemele energeticii regionale*, 1(30), 2016, pp.25-30. ISSN 1857-0070. [http://journal.ie.asm.md/assets/files/04\\_01\\_30\\_2016.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/04_01_30_2016.pdf) (дата посещения 13.03.2018).
- [13] Ryjov Iu. P. РЫЖОВ Ю.П. *Dalinye elektroperedaci sverhvisokogo napreajenia* [Long-distance power transmission of ultrahigh voltage]: ucebnik dlea VUZov? Iu. P. Ryjkov. M.: Izdateliskii dom MEI, 2017.-488 s.
- [14] Alexandrov Gh. N. *Peredacia electriceskoï energii* [Transmission of electrical energy.] St-

Petersburg: Izd-vo Politehniceskogo Universiteta, 2007. 412 с. (Energetica v politehniceskom universitete).

[15] [https://ru.wikipedia.org/wiki/Linia\\_elektroperedaci](https://ru.wikipedia.org/wiki/Linia_elektroperedaci) [Power transmission line]

[16] <http://leg.co.ua/info/spravka/propusknaya-sposobnost-linii-elektroperedachi-110-1150-kv.html> (дата посещения 13.03.2018).

[17] Alexandrov Gh. N. Rejimy raboty vozdušnih linii elektroperedaci [Operating modes of overhead power lines]. The second edition of the Center for Training Energy. St. Petersburg, 2006. <http://www.xn--c1adbmahetqny4b7f.xn--p1ai/metod/AlexandrovLEP.pdf> -1150-kv.html (дата посещения 13.03.2018).

[18] Alexeev B. A. *Povyshenie propusknosti vozdušnyh linii elektroperedaci i primeneie provodov novih marok* [Increase the capacity of overhead transmission lines and use wires of new brands] ЭЛЕКТРО [ELEKTRO] 3/2009. pp. 45-50. <http://www.elektro-journal.ru/sites/default>

[files/pdf\\_files/arts/2009\\_03\\_10.PDF](#) (дата посещения 13.03.2018).

[19] <http://multimedia.3m.com/mws/media/12279500/part-22.pdf>. Inovatii v razvitiu mirovoi I rossiiskoi energetiki [Innovations in the development of world and Russian energy].

[20] Postolati V., Berzan V.. Particularități ale regimului sistemului electroenergetic Republicii Moldova la realizarea interconexiunii cu România [Particularities of the regime of the Republic of Moldova's electro-energetic system in achieving the interconnection with Romania]. EMERG 4. An II/2016. București:Editura AGIR,2016. -pp.103-120. ISSN 2457-5011.

[21] Electric energy. Electromagnetic compatibility. of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. (EN 50160:2010, NEQ) GOST 32144-2013. [http://www.kuzesc.ru/laws/GOST/GOST\\_523144-2013.docx](http://www.kuzesc.ru/laws/GOST/GOST_523144-2013.docx) (дата посещения 13.03.2018).

#### Сведения об авторах.



**Постолатий В.М.** Академик АНМ, доктор хабилитат технических наук, зав. Лабораторией управляемых линий электропередачи. Области научного интереса: управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи, компактные ВЛ, оборудование регулирования режимов в энергосистемах, энергобезопасность. Автор более 250 научных публикаций, 30 патентов на изобретения, в том числе 21 зарубежного патента. E-mail: [postolati@rambler.ru](mailto:postolati@rambler.ru)



**Берзан В.П.** Доктор хабилитат технических наук, зам. директора по науке Института энергетики, Республика Молдова. Область научных интересов: энергетика, установившиеся и переходные процессы в электрических цепях, математическое моделирование, диагностика энергооборудования. Автор более 350 научных публикаций, 39 патентов на изобретения, в том числе 1 зарубежного патента, 12 монографий, 3 учебных пособий. E-mail: [berzan@ie.asm.md](mailto:berzan@ie.asm.md)



**Быкова Е. В.** Доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории управляемых линий электропередачи Института энергетики, Республика Молдова. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые линии электропередачи, энергетическая безопасность, моделирование процессов в энергетике. E-mail: [elena-bicova@rambler.ru](mailto:elena-bicova@rambler.ru)



**Бошняга В.А.**, окончил Кишиневский политехнический институт в 1971 г. Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в Институте Электродинамики Академии наук Украины в 1988 г. 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)



**Суслов В.М.**, окончил Кишиневский политехнический институт в 1972 г. Научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачей 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)



**Ермураки Юрие** - научный сотрудник Института энергетики, Республика Молдова. Область научных интересов: эффективность электротехнического и энергетического оборудования и использования электроэнергии, разработка преобразователей электрической энергии. Автор и соавтор 45 научных публикаций, 22 патента. E-mail: [ermurachi.iurie@ie.asm.md](mailto:ermurachi.iurie@ie.asm.md)



**Григораш Георге.** Окончил Технический университет «Георге Асаки», Яссы, факультет электротехники. Автор 12 монографий, 185 научных статей. Рецензент международных журналов: International Journal of Electrical Power & Energy Systems, IEEE Transactions on Power Systems, Energy, WSEAS Transactions on Power Systems, Journal of Energy and Power Engineering и др.  
E-mail: [ggrigor@ee.tuiasi.ro](mailto:ggrigor@ee.tuiasi.ro)



**Гаврилаш Михай.** Профессор, Технический Университет «Георге Асаки», Яссы. Область научных интересов - энергетические системы, передача и распределение энергии, системы с искусственным интеллектом, управление энергосистемой и устойчивостью. Автор 12 монографий, 210 научных статей. Член IEEE с 2013 года.  
E-mail: [mgavril@tuiasi.ro](mailto:mgavril@tuiasi.ro)



**Истрате Думитру-Марчел.** Профессор, Технический Университет «Георге Асаки», Яссы. Область научных интересов - техника высоких напряжений, переходные электромагнитные, чистые технологии. Автор 13 монографий, 135 научных статей, 17 патентов. Член СИГРЕ и НКР-МСУ. E-mail: [mistratel@tuiasi.ro](mailto:mistratel@tuiasi.ro)