

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ МОЛДОВЫ, УКРАИНЫ И РУМЫНИИ В СОСТАВЕ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПОДСТАНЦИИ 400 кВ ВУЛКАНЕШТЫ

В. М. Постолатий, В. П. Берзан, Е. В. Быкова

*Институт энергетики Академии наук Молдовы*

**Аннотация.** Выполнены расчеты режимов и анализ совместной работы энергосистем Молдовы, Украины и Румынии в составе объединенной электроэнергетической системы при асинхронной межсистемной связи Молдова-Румыния. Определены потоки мощности по внутрисистемным и межсистемным связям энергосистем Молдовы, Румынии и Украины при мощности вставки постоянного тока 500-600 МВт. Проиллюстрирован способ управления потоками мощности с помощью средств фазового регулирования.

**Ключевые слова:** объединенная энергосистема, вставка постоянного тока, потоки мощности, фазорегулирующие устройства.

### Введение

Электроэнергетическая система Молдовы в настоящее время работает синхронно с энергосистемой Украины и стран СНГ. С энергосистемой Румынии синхронная работа осуществлялась в прошлые годы. В настоящее время нет этой связи, что является одной из изучаемых проблем в электроэнергетическом секторе Молдовы [1-5].

Оставшиеся межсистемные линии электропередачи Вулканешты – Исакча напряжением 400 кВ и четыре ВЛ-110 кВ сохранились и могут быть использованы в будущем как линии связи [6].

Восстановление параллельной работы энергосистем Молдовы и Румынии является одной из актуальных задач, над решением которой работают представители обеих энергосистем при участии ряда других организаций [7-10].

В качестве одного из вариантов решения указанной проблемы является создание вставок постоянного тока (ВПТ), которые позволяют объединить энергосистемы, которые работают несинхронно, с разными частотами переменного тока, что и имеет место в нашем случае. Рассматриваются варианты создания ВПТ в трех пунктах связи энергосистем Молдовы и Румынии: на подстанции 330 кВ Бельцы через автотрансформаторную связь 330/400 кВ по ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава; на подстанции Унгены при связи через автотрансформатор 400/330 кВ по ВЛ-330 кВ Унгены – Страшены; на подстанции

400 кВ Вулканешты при связи по ВЛ-400 кВ Вулканешты – Исакча [7]. В качестве первой из них рассматривается ВПТ на подстанции Вулканешты и сооружение дополнительной ВЛ-400 кВ Вулканешты – Кишинев с заходом на подстанцию 330 кВ в Кишиневе через автотрансформатор 400/330 кВ [11].

Институтом энергетики Академии наук Молдовы предлагается альтернативный вариант связи энергосистем Молдовы и Румынии, а именно, с помощью фазорегулирующих устройств (ФРТ) трансформаторного типа [12, 13] позволяющих осуществлять связь энергосистем, работающих на разных частотах. Кроме того, в качестве вариантов ВЛ Вулканешты – Кишинев предлагается вариант двухцепной УСВЛ-330 кВ [5] или вариант одноцепной компактной ВЛ-330 кВ с улучшенными параметрами и повышенной пропускной способностью, по сравнению с ВЛ традиционной конструкции.

Заход ВЛ-330 кВ на подстанцию 400 кВ Вулканешты предлагается осуществить через автотрансформатор напряжением 330/400 кВ.

Применение ФРТ имеет ряд преимуществ по сравнению с ВПТ, как технического, так и экономического характера. Однако, в настоящее время предпочтение отдано варианту ВПТ и по нему ведутся уже проектные работы и решаются организационно-финансовые вопросы [11].

Основная цель создания ВПТ состоит в том, чтобы обеспечить дополнительные возможности передачи мощности из энергосистемы Румынии в энергосистему Республики Молдовы и осуществлять при необходимости обменные потоки мощности.

© Постолатий В. М., Берзан В. Б.,  
Быкова Е. В., 2018

Вариант ВПТ-400 кВ в Вулканештах расчитан на передачу максимальной величины мощности в размере до 600 МВт.

Создание и включение в работу данной ВПТ равносильно строительству независимого источника мощности, подобно новой электростанции указанной мощности.

В обсуждаемых материалах, связанных со строительством данной ВПТ, не уделено достаточного внимания анализу новых режимных особенностей работы энергосистемы Республики Молдова, режимов перетока мощности по высоковольтным сетям и режима работы существующих электростанций, задействованных в энергосистеме Молдовы. Новые режимные особенности касаются и энергосистемы Украины, с которой энергосистема Молдовы связана 6-ью ВЛ-330 кВ и 14-тью ВЛ-110 кВ.

Выполненные до настоящего времени исследования режимов энергосистемы [11, 12] показали, что при передаче мощности через ВПТ по ВЛ-400 кВ Вулканешты – Кишинев, изменяемой в пределах от 100 до 600 МВт, соответственно должны быть разгружены на эту величину мощности действующих в энергосистеме электростанций, в частности, Кишиневской ТЭЦ-2 и Молдавской ГРЭС, или же они могут быть сохранены при условии соответствующего роста нагрузки.

Режим работы Кишиневской ТЭЦ-2 связан с обеспечением теплоснабжения г. Кишинева, аналогично, как и Бельцкая ТЭЦ. Изменения режима работы будут касаться в первую очередь Молдавской ГРЭС, а также уменьшения перетока мощности по межсистемным ВЛ-330 кВ из энергосистемы Украины.

Молдавская ГРЭС является в настоящее время основным поставщиком электроэнергии в Республику Молдова. Собственными источниками Республики Молдова покрывает примерно 20-25% потребляемой электрической мощности. Остающийся дефицит мощности Республика Молдова на 3/4 покрывает за счет Молдавской ГРЭС и 1/4 за счет перетока мощности из энергосистемы Украины.

Цель настоящей работы состоит в моделировании объединенной энергосистемы, включающей энергосистемы Молдовы, Украины, Румынии и других стран при их параллельной синхронной работе для расчета режимов их работы при изменении баланса генерации и соответствующего потребления мощности в случае сооружения и введения в работу нового источника мощности 600 МВт в виде ВПТ на подстанции Вулканешты.

## 1. Исходная расчетная схема исследуемой объединенной энергосистемы

Исходная условная схема исследуемой объединенной энергосистемы приведена на рис. 1.

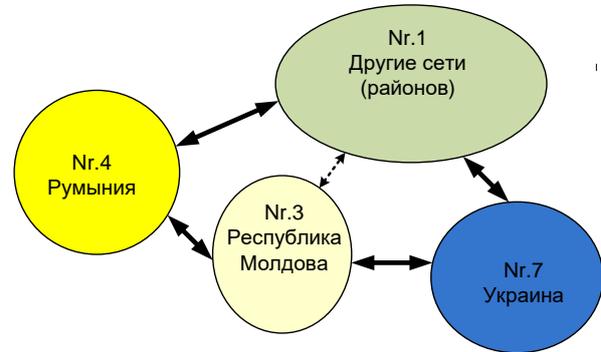


Рис.1. Выделенные зоны участков сетей в расчетной схеме установившегося режима

Общие данные, характеризующие объединенную энергосистему, приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Параметры объединенной энергосистемы

№ п/п	Название	Значение
1	Узлов: ( $N_u$ )	5110
2	Ветвей: ( $N_v$ )	7820
3	Районов: ( $N_a$ )	4
4	Число отключенных узлов: ( $N_u$ откл)	198
5	Число отключенных ветвей: ( $N_v$ откл)	407
6	Число балансир. узлов: ( $N_{бу}$ )	2
7	Число узлов с задан. ( $N_{ген}$ )	855
8	Число трансформаторов: ( $N_{Тр}$ )	2334
9	Число ЛЭП: ( $N_{ЛЭП}$ )	5486
10	Число выключателей: ( $N_{выкл}$ )	
11	$P_{ген}$ : ( $P_g$ ), МВт	122723
12	$P_{наг}$ : ( $P_n$ ), МВт	119339
13	Потери $P$ (переменные): ( $dP$ ), МВт	3134
14	$P_{баланс. узла}$ : ( $P_{бу}$ ), МВт	-94
15	Постоянные потери: ( $dP_{пост}$ ), МВт	250,04
16	Минимальное отклонение $V$ (%) ( $dP_{min}$ )	-21,86
17	Максимальное отклонение $V$ (%) ( $dP_{max}$ )	16,7

Рассматриваемая объединенная энергосистема включает в себя энергосистемы: Молдовы,

України, Румунії, Росії (європейської частини), Білорусії та ін. Всі вони сгруповані в райони: Молдова (район 3); Румунія (район 4); Україна (район 7).

Остальні енергосистеми складають район під назвою (остальня мережа). Схема містить лінії електропередачі напругою 110-750 кВ, трансформатори та компенсуючі пристрої. Всі елементи енергосистеми характеризуються своїми схемами заміщення, параметри яких включені в загальну розрахункову схему. Розрахунки виконувалися з використанням програмного комплексу RASTRWIN.

## 2. Аналіз результатів розрахунку вихідної схеми

В вихідній схемі прийнято умову, що введені в роботу наступні нові елементи:

- вставка постійного струму (ВПТ) на підстанції 400 кВ Вулканешты (енергосистема Молдови);
- звичайна трифазна одноцепна ВЛ-400кВ Вулканешты – Кишинев, довжиною 158 км, характеризується наступними параметрами: провід в фазах  $3 \times AC-300/39$ ,  $r_0=0,03249$  Ом/км;  $X_0=0,31$  Ом/км;  $\nu_0=3,79 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Вихідним розраховувалася режим об'єднаної енергосистеми при передачі через вставку постійного струму потужності, рівної 600 МВт при умові самобалансу ВПТ по реактивній потужності.

Укрупнені результати розрахунку представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри вихідного режиму

№-н	Район	$P_{ген}$	$P_{наг}$	$D_p$	$P_{потр}$	$P_{вн}$
1	Остальня мережа	78460	77769	2144,93	79914	-1454
3	Молдова	1727	1151	78,31	1230	497
4	Румунія	10267	10016	274,84	10291	-25
7	Україна	32418	30502	933,87	31436	982
	Всього	122871	119439	3182	-	-

В таблиці 1 (і інших таблицях, в яких сведені дані розрахунку режиму для позначених зон або районів розрахункової схеми рис.1), прийняті наступні позначення:

- $P_{ген}$  - активна потужність генеруючих джерел для зон рис.1;
- $P_{наг}$  - активна споживана потужність (потужність навантаження зони в розрахунковій схемі);
- $D_p$  - потужність втрат в електричних мережах відповідної зони;
- $P_{потр} = P_{ген} + D_p$  - загальна активна потужність споживання в виділеній зоні розрахункової схеми (з урахуванням втрат в мережах);
- $P_{вн}$  - активна обмінна потужність розрахункової зони, де знак "мінус" вказує на дефіцит (приток ззовні), а знак "плюс" на надлишок активної потужності в розраховуваній зоні (відтік в інші мережі, які не належать розраховуваній розрахунковій зоні).

В розрахунках прийнято, що збільшення генерації потужності через ВПТ супроводжується відповідним зростанням споживаної енергії

(т.е. навантаження в розраховуваній розрахунковій схемі), а потужність діючих електростанцій в енергосистемі Молдова залишається незмінною.

Слід зазначити, що ВЛ-400 кВ Вулканешты – Кишинев по суті є шунтуючою лінією по відношенню до ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев. В утвореному замкнутому контурі діють задіяні енергоблоки МГРЭС, що працюють на шини 330 кВ, а також блоки, що працюють на шини 400 кВ. Між шинами 330 кВ і 400 кВ на МГРЭС існує автотрансформаторна зв'язь. Через різницю кутів векторів напруг на шинах 400 кВ підстанції Вулканешты спостерігається перепад потужності в 86 МВт по ВЛ-400 кВ Вулканешты – Кишинев в бік Кишинева. Ця величина потужності додається до тієї, яка передається через вставку ВПТ з енергосистеми Румунії, т.е. по ВЛ-400 кВ Вулканешты – Кишинев потік потужності становить  $600+86=686$  МВт.

Додана потужність 86 МВт є циркулюючою в утвореному замкнутому контурі ліній електропередач між ВПТ (Вулканешты) – підстанцією 330 кВ (Кишинев) - шинами 330 кВ МГРЭС - шинами 400 кВ МГРЭС. Ця циркулююча потужність призводить до збільшення додаткових втрат активної

мощности в системе, и, соответственно, электроэнергии.

Для того, чтобы не допустить циркуляции мощности в указанном замкнутом контуре, необходимо на подстанции 400 кВ отключить связь ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты с ВЛ-400 кВ Вулканешты – Кишинев. При этом линия электропередачи 400 кВ МГРЭС – Вулканешты должна оставаться в работе, так как по ней передается мощность более 300 МВт от МГРЭС для электроснабжения потребителей Юга Молдовы и южной части Украины (район Болграда).

Следующая особенность состоит в том, что при выдаче мощности 600 МВт от ВПТ Вулканешты на подстанцию 330 кВ Кишинев значительно возрастает по сравнению с исходным значением поток мощности по двум ВЛ-330 кВ в страну МГРЭС, величина которого достигает 447 МВт.

Возникает естественный вопрос: целесообразно ли осуществлять электроснабжение потребителей в регионе еще и от ВПТ Вулканешты при получении этой энергии из энергосистемы Румынии если МГРЭС может полностью обеспечить потребителей региона электроэнергией?

Третья особенность состоит в том, что при вводе в работу ВПТ на подстанции Вулканешты и передаче по ней мощности 600 МВт существенно уменьшится величина потока мощности из энергосистемы Украины в энергосистему Молдовы по ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС – Граница – подстанция Бельцы.

Это должно быть обязательно учтено при согласовании режимов энергосистем и в коммерческом плане взаимоотношений сторон, по крайней мере, это относится в первую очередь к Молдове и к Украине. В сложившейся реально структуре энергосистем Молдовы и Украины и параметрах межсистемных связей существует переток мощности из энергосистемы Украины в энергосистему Молдовы по ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС – Бельцы, который в большей своей части идет в зачет поставленной в Республику Молдова электроэнергии от Молдавской ГРЭС, согласно существующим контрактам.

Эту часть мощности МГРЭС поставляет в Одесскую энергосистему, а из Украины такая же величина мощности возвращается Республике Молдова по ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС – Бельцы.

По данной ВЛ 330 кВ Днестровская ГЭС – Бельцы также осуществляется и упомянутая выше поставка части объемов электроэнергии из Украины в Республику Молдова, согласно прямым контрактам.

Проведенный анализ свидетельствует о возникновении ряда новых вопросов, режимного характера, которые касаются энергосистем региона, при введении в работу ВПТ на подстанции Вулканешты. Вопросов будет не меньше, если в перспективе будут сооружены ВПТ еще в Унгенах и Бельцах.

Ниже рассмотрен один из вариантов технических решений по регулированию потоков мощности, передаваемой от Молдавской ГРЭС в энергосистему Республики Молдова по ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев в новых режимных условиях энергосистемы.

### 3. Результаты расчетов параметров режимов объединенной энергосистемы при установке ФРТ на шинах 330 кВ МГРЭС

Фрагмент расчетной схемы показан на рис. 2 с ВПТ мощностью 600 МВт при ее выдаче в систему по одноцепной ЛЭП 400 кВ Вулканешты-Кишинев.

Для того, чтобы иметь возможность регулировать распределение потоков мощности в сетях высокого напряжения энергосистемы Молдовы в расчетной схеме введены устройства регулирования фазового сдвига. В качестве фазорегулирующих устройств выбраны трансформаторные устройства. Место их установки на подстанции 330 кВ МГРЭС выбрано в начале каждой цепи отходящей двухцепной ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев.

В расчетных схемах приняты параметры схем замещения каждого из двух ФРТ:

- напряжение 330/330 кВ;
- активное сопротивление  $r=1$  Ом;
- индуктивное сопротивление  $X=15$  Ом;
- диапазон регулирования угла сдвига трехфазных систем векторов выходного напряжения по отношению к входному  $0\div 40$  эл. град.

В базовом режиме работы энергосистемы при включении ВПТ на подстанции Вулканешты и отсутствии фазорегулирующих устройств на входе ВЛ 330 кВ отходящих в сторону Кишинева от МГРЭС, величина потока мощности по ВЛ Вулканешты – Кишинев составляет 686 МВт, из которого 428 МВт передается от подстанции Кишинев в сторону Молдавской ГРЭС по двум цепям 330 кВ Кишинев – МГРЭС.

Исходный режим объединенной энергосистемы характеризуется расчетными данными, приведенными в таблице 3.

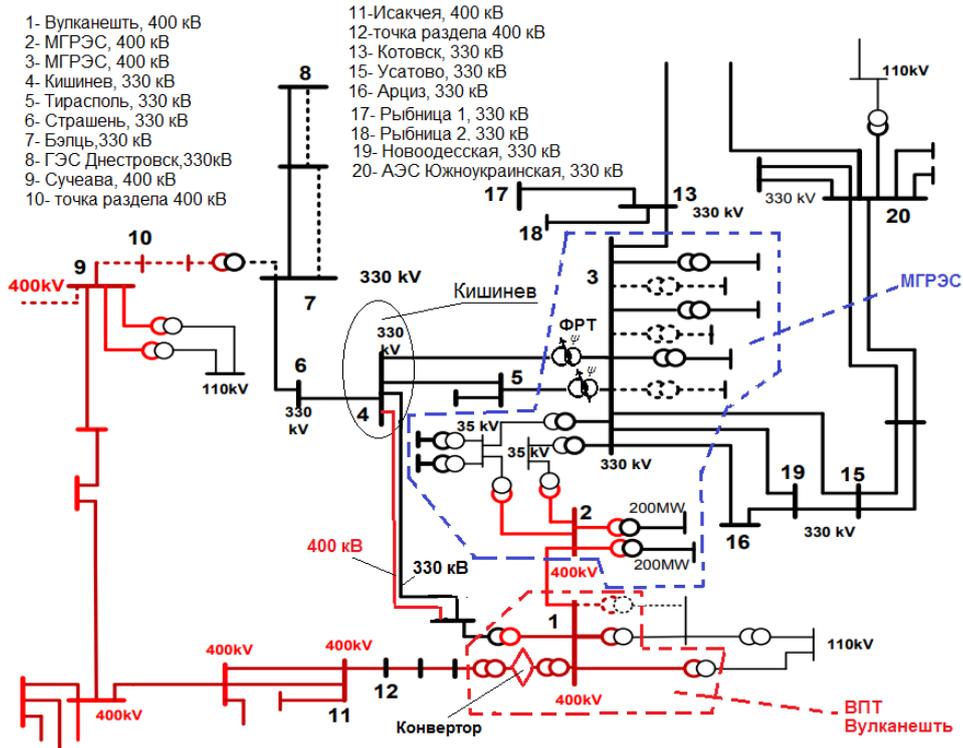


Рис.2. Участок расчетной схемы замещения энергосистемы Молдовы при добавлении в узле Вулканешты ВПТ и одноцепной ВЛ 400 кВ в сторону Кишинева

Таблица 3

Данные исходного режима объединенной энергосистемы

№-н	Район	$P_{ген}$	$P_{наг}$	$D_p$	$P_{потр}$	$P_{вн}$
1	Остальная сеть	78460	77769	2144,17	79913	-1453
3	Молдова	1727	1151	79,02	1230	496
4	Румыния	10267	10016	274,84	10291	-25
7	Украина	32418	30502	934,69	31437	981
	Всего	122872	119439	3183	-	-

Введение фазового сдвига векторов напряжений в начале ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев с помощью ФРТ по отношению к системе векторов напряжений шин 330 кВ МГРЭС позволяет существенно изменить режим и обеспечить выдачу мощности от МГРЭС в сторону Кишинева по ВЛ-330 кВ в требуемых пределах.

В таблицах 4-6 приведены результаты расчетов режимов объединенной энергосистемы при введении с помощью ФРТ на МГРЭС углового сдвига векторов напряжений в начале ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев в пределах:  $10 \pm 40$  электрических градусов.

Таблица 4

Данные расчета режима объединенной энергосистемы при  $\delta_{ФРТ} \text{ МГРЭС} = 10$  градусов

№-н	Район	$P_{ген}$	$P_{наг}$	$D_p$	$P_{потр}$	$P_{вн}$
1	Остальная сеть	78470	77769	2135,13	79904	-1434
3	Молдова	1727	1151	90,38	1242	485
4	Румыния	10267	10016	274,84	10291	-25
7	Украина	32418	30502	942,2	31445	973
	Всего	122882	119439	3193	-	-

Таблица 5

Данные расчета режима объединенной энергосистемы при  $\delta_{фрт} \text{ МГРЭС} = 20$  градусов

№-н	Район	$P_{ген}$	$P_{наг}$	$D_p$	$P_{потр}$	$P_{вн}$
1	Остальная сеть	78491	77769	2119,14	79888	-1397
3	Молдова	1727	1151	115,7	1267	460
4	Румыния	10267	10016	274,84	10291	-25
7	Украина	32418	30502	953,43	31456	962
	Всего	122902	119439	3213	-	-

Таблица 6

Данные расчета режима объединенной энергосистемы при  $\delta_{фрт} \text{ МГРЭС} = 30$  градусов

№-н	Район	$P_{ген}$	$P_{наг}$	$D_p$	$P_{потр}$	$P_{вн}$
1	Остальная сеть	78522	77769	2097,8	79867	-1345
3	Молдова	1727	1151	153,81	1305	422
4	Румыния	10267	10016	274,84	10291	-25
7	Украина	32418	30502	969,34	31472	946
	Всего	122933	119439	3246	-	-

Таблица 7

Данные расчета режима объединенной энергосистемы при  $\delta_{фрт} \text{ МГРЭС} = 40$  градусов

№-н	Район	$P_{ген}$	$P_{наг}$	$D_p$	$P_{потр}$	$P_{вн}$
1	Остальная сеть	78572	77769	2068,95	79838	-1265
3	Молдова	1727	1151	201,26	1353	374
4	Румыния	10267	10016	274,84	10291	-25
7	Украина	32418	30502	1000,54	31503	915
	Всего	122984	119439	3297	-	-

На основании полученных данных построена зависимость величины выдаваемой мощности МГРЭС в энергосистему Молдовы по ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев при изменении угла ФРТ в пределах  $\delta_{фрт} = 0 \div 40$  электрических градусов. В рассматриваемом режиме работает связь ВПТ 600 МВт Вулканешты через линию 400 кВ с Кишиневом, т.е. Кишинев питается от двух источников, МГРЭС и ВПТ Вулканешты. Характер зависимости передаваемой активной мощности по линии 330 кВ МГРЭС-Кишинев приведена на рис. 3.

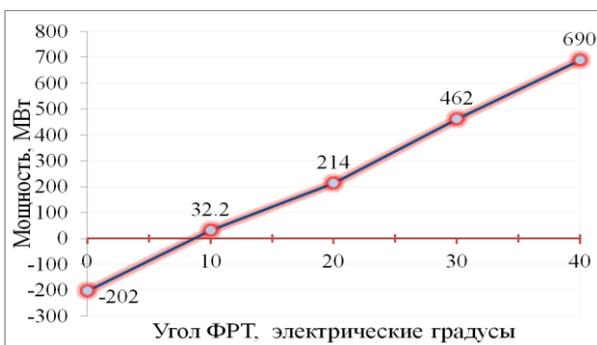


Рис. 3. Зависимость величины мощности (МВт) по ВЛ 330 кВ МГРЭС-Кишинев (+) и в обратном направлении (-)

При изменении угла ФРТ МГРЭС от  $0^\circ$  до  $40^\circ$  и включенных ВПТ-600 МВт на подстанции Вулканешты и ВЛ-400 кВ Вулканешты - Кишинев возможно регулировать поток мощности по ВЛ 330 кВ МГРЭС - Кишинев в широких пределах, в том числе, реализовать режим перетока как в сторону Кишинева, так и в обратную сторону от Кишинева на шины 330 кВ МГРЭС. Характеристика представленная на рис. 3, характеризует возможности регулирования перетока активной мощности в республиканской энергосистеме при применении устройств фазового регулирования. Применение ФРТ для управления потоком и направлением выдачи мощности одного из крупных генерирующих источников (МГРЭС) в Молдавской энергосистеме является возможным, причем это регулирование характеризуется широким диапазоном изменения потока мощности по ВЛ 330 кВ МГРЭС-Кишинев.

На рис.4 приведена характеристика перетока мощности по ВЛ 330 кВ МГРЭС-Кишинев при регулировании с помощью ФРТ угла сдвига фаз на шинах 330 кВ МГРЭС для случая, что одноцепная линия связи ВПТ 600 кВт Вулканешты-Кишинев имеет напряжение 330 кВ. Качественно, перетоки мощности по ВЛ 330 кВ МГРЭС-Кишинев, что для ВЛ 400 кВ, что для ВЛ 330 кВ Вулканешты-Кишинев подобны.

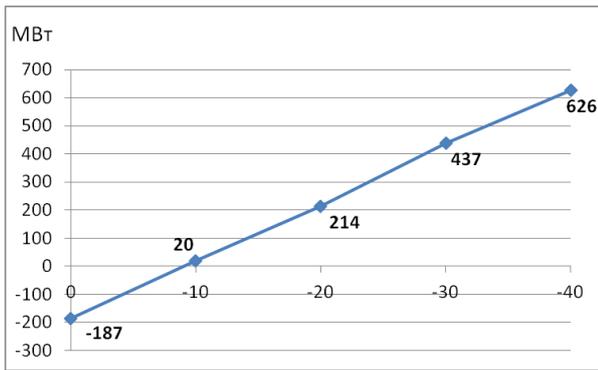


Рис.4. Характеристика передачі потужності по ВЛ 330 кВ МГРЭС-Кишинев при включених ВПТ-600 МВт на підстанції Вулканешты і ВЛ-330 кВ Вулканешты – Кишинев

На рис.5 приведені залежності змінення втрат (в МВт) в енергосистемах України, Румунії і Молдова при регулюванні потоку потужності по ЛЭП 330 МГРЭС-Кишинев з допомогою смонтованого на шини 330 кВ МГРЭС фазорегулятора за рахунок змінення кута в межах 0-40 електричних градусів.

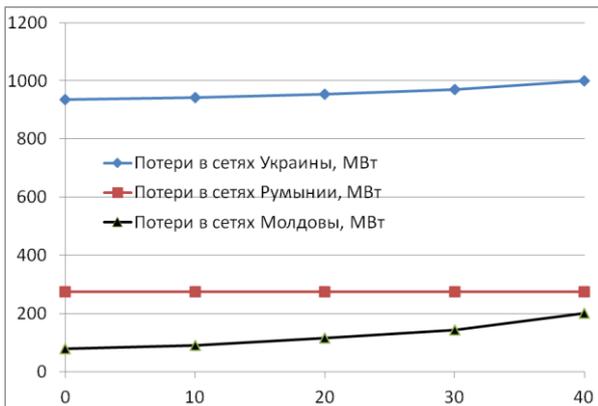


Рис.5. Втрати потужності в мережах енергосистем Румунії, Молдови, України при роботі ВПТ 600 МВт і ЛЭП 400 кВ Вулканешты-Кишинев

Поворот векторів вихідного напруги ФРТ-330 кВ на кожні 10 градусів супроводжується зміненням перекачування потужності в розмірі порядку 200 МВт. Дослідований діапазон  $\delta_{ФРТ}$  в межах 40 електричних градусів забезпечує змінення величини передаваної потужності більше, ніж на 800 МВт. Регулювання потоку потужності від МГРЭС при такому способі призводить до змінення втрат в електричних мережах Молдови і України. Цей ефект відсутній в енергосистемі Румунії, оскільки ВПТ в Вулканештах повністю розв'язує енергосистему

Румунії від енергосистем Молдови в режимному плані.

Застосування засобів фазового регулювання величини потоку потужності в складних системах може вимагати комплексного застосування і інших засобів регулювання, в частині, джерел реактивної потужності того або іншого знаку. В розглянутих варіантах, починаючи з кута ФРТ  $\delta_{ФРТ}=20$  градусів і більше, виявилася необхідною установка джерел реактивної потужності ємкісного типу, так як рівні напруги в деяких вузлах схеми (на підстанції 330 кВ Кишинев і на шини МГРЭС) виявились зниженими.

При цьому можуть бути використані резерви реактивної потужності генеруючих джерел, в частині, в розглянутому випадку – блоків МГРЭС.

#### 4. Дискусія

Проведені дослідження режимів об'єднаної енергосистем, включаючи енергосистему Молдови, України, Румунії і інших країн, при створенні умов їх паралельної роботи з використанням вставки постійного струму (ВПТ), спорудження якої передбачається на існуючій підстанції Вулканешты і включення її в розсітку ВЛ-400 кВ Вулканешты (Молдова) – Ісакача (Румунія), а також будівництво нової ВЛ-400 кВ Вулканешты – Кишинев, дозволили виявити нові режимні особливості роботи енергосистем.

1. Основна особливість полягає в тому, що за допомогою ВПТ передбачається передача з енергосистем Румунії в енергосистему Молдови потужності величиною 600 МВт. В зв'язі з цим відбувається змінення балансу генерації в енергосистемі Молдови, а також змінення потоків потужності по існуючим внутрішньосистемним висковольтним лініям.

2. В нинішній час баланс потужності в енергосистемі Республіки Молдова підтримується за рахунок генерації на власних електростанціях, а також за рахунок отримання електроенергії від Молдавської ГРЭС (МГРЭС), а також поставок з енергосистем України. При отриманні електроенергії через ВПТ з енергосистем Румунії цей баланс зміниться. Створення нового ринку електроенергії призначено удешевити електроенергію для споживачів Республіки Молдова і підвищити енергетичну безпеку. На цьому ґрунтуються головні цілі і техніко-економічні обґрунтування спорудження ВПТ і створення умов для спільної роботи енергосистем.

3. Основываясь на историческом положительном опыте создания объединенных энергосистем, следует полагать, что сооружение ВПТ будет полезным в качестве общесистемного объекта объединенной энергосистемы, так как будут созданы новые условия для осуществления дополнительных возможностей по обеспечению обменных межсистемных перетоков мощности и повышению энергобезопасности в общих интересах энергосистем. В этом контексте исследование режимов объединенной энергосистемы в новых условиях при сооружении ВПТ являются важными, так как позволяют выявить новые особенности работы энергосистем и предвидеть необходимость осуществления соответствующих технических и режимных мероприятий. В частности, в новых условиях одной из главнейших является задача технического осуществления регулирования потоков мощности по внутрисистемным и межсистемным связям. Объединенная энергосистема должна располагать техническими средствами, чтобы быть управляемой, а каждая из входящих в нее энергосистем должна быть защищена от несогласованных действий.

4. Выполненное моделирование режимов объединенной энергосистемы при введении в работу ВПТ и передаче по ней мощности порядка 600 МВт без изменения мощности существующих источников приводит к следующим режимным особенностям:

- изменение направления потока мощности по ВЛ-330 кВ Молдавская ГРЭС – Кишинев в сторону МГРЭС. Величина мощности, которую должна будет принять на свои шины 330 кВ Молдавская ГРЭС со стороны подстанции Кишинев, составит более 280 МВт. При этом вырабатываемую электроэнергию МГРЭС будет передавать не в сторону Кишинева, а в энергосистему Украины, хотя по существующим контрактам МГРЭС более половины потребляемой мощности поставляет в энергосистему Республики Молдова;
- произойдет заметное снижение величины потока мощности по существующей ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС (Украина) – Бельцы (Молдова), по которой Украина поставляет часть электроэнергии в энергосистему Молдовы по существующим контрактам;
- из-за разности угловых сдвигов напряжений в ряде замкнутых контуров появятся циркулирующие потоки мощности, что будет сопровождаться дополнительными потерями электроэнергии.

5. Для устранения этих негативных явлений в работе показана эффективность применения фазорегулирующих устройств трансформаторного типа для управления потоками мощности в энергосистеме. На примере установки фазорегулирующих устройств (ФРТ) на отправном конце двухцепной ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев показано, что применение ФРТ при введении углового сдвига между входным напряжением и выходным в пределах  $0 \div (+40)$  электрических градусов позволяет регулировать поток мощности в пределах от -282 МВт до +690 МВт, т.е. порядка 200 МВт на каждые 10- электрических градусов углового сдвига векторов напряжений, обеспечиваемых с помощью ФРТ:

- благодаря этому обеспечивается возможность выдавать производимую на МГРЭС электроэнергию в энергосистему Республики Молдова (более 600 МВт), а не принимать от нее на свои шины мощность порядка более 280 МВт, как это может иметь место при непринятии соответствующих мер. Этот расчет и результаты анализа являются иллюстративными. Однако они обращают на себя внимание и подтверждают тезис о том, что энергосистема должна быть управляемой;
- рассмотренный способ фазового регулирования потока мощности может оказаться полезным и целесообразным для управления режимами сложных электроэнергетических систем, с целью достижения заданных технических и экономических показателей энергосистем.

### Выводы

1. Разработанная математическая модель объединенной энергосистемы в которой как часть входит и энергосистема Республики Молдова. Математическая модель учитывает топологию электрических сетей и позволяет определять характер взаимовлияния режима энергосистемы при изменении топологии сетей и мощностей источников генерации.

2. Расчет режимов в объединенной энергосистеме при реализации межсистемной асинхронной связи энергосистемы Республики Молдова и Румынии через вставку постоянного тока в Вулканештах приводит к количественным и качественным изменениям режима не только энергосистемы Молдовы, но и в энергосистеме Украины с образованием замкнутых контуров циркуляции мощности. Это приводит к росту потерь мощности и энергии в сетях Молдовы и Украины.

3. Установлена количественная характеристика эффекта регулирования потоками мощности в энергосистеме Республики Молдова при монтаже в начале ВЛ 330 кВ со стороны МГРЭС фазорегулирующих устройств (ФРТ). Изменение угла сдвига между входным и выходным напряжениями фазорегулятора на каждые десять градусов, приводит к изменению передаваемая мощность по двухцепной линии 330 кВ МГРЭС-Кишинев примерно на 200 МВт.

4. Принудительное регулирование потоками мощности при совместной работе вставки постоянного тока в Вулканештах и МГРЭС приводит к росту потерь в энергосистемах Молдовы и Украины. С этой точки зрения ВПТ в Вулканештах следует рассматривать не как объект национального значения Молдовы, а как объект интернациональный, который влияет на энергоснабжение и режим энергосетей в нашем регионе.

#### Список использованной литературы

- Zaițev, D., Tîrșu, M., Golub, I., Gore, N. Interconexiune dirijată a sistemelor energetice [Электронный ресурс]. *Problemele energeticii regionale*, 3(14) 2010, pp. 10-17. ISSN 1857-0070. Режим доступа: <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-314-2010>
- Постолатий, В. М., Голуб, И. В., Быкова, Е. В., Шевченко, Н. К., Суслов, В. М., Горе, Н. С. Моделирование вариантов развития электроэнергетической системы Республики Молдова с учетом параллельной работы с энергосистемами соседних стран [Электронный ресурс]. *Problemele energeticii regionale*, 1(15) 2011, pp. 18-30. ISSN 1857-0070. Режим доступа: <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-115-2011>
- Калинин, Л. П., Зайцев, Д. А., Тыршу, М. С., Голуб, И. В. Варианты развития транспортной сети Молдовы при параллельной работе с энергосистемой Украины [Электронный ресурс]. *Problemele energeticii regionale*, 1(18) 2012, pp 24-34. ISSN 1857-0070. Режим доступа: <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-118-2012>
- Зайцев, Д. А., Голуб, И. В., Калинин, Л. П., Тыршу, М. С. Режимы энергосистемы Молдовы с учетом развития топологии межсистемных связей [Электронный ресурс]. *Problemele energeticii regionale*, 2(25) 2014, pp. 22-29. ISSN 1857-0070. Режим доступа: [http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronni\\_jurna1-225-2014](http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronni_jurna1-225-2014).
- Постолатий, В. М., Берзан, В. П., Быкова, Е. В., Андронати, Н. Р. Режим энергосистемы Республики Молдова при включении вставки постоянного тока на подстанции Вулканешты [Электронный ресурс]. *Problemele energeticii regionale*, 3(32) 2016, pp 1-14. ISSN 1857-0070. Режим доступа: [http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronni\\_jurnal-n332-2016](http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronni_jurnal-n332-2016).
- STRATEGIA ENERGETICĂ a Republicii Moldova pînă în anul 2030 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lex.justice.md/md/346670/> (accesat 12.03.2018).
- Strategii de cheltuieli in domeniul energetic: 2013 – 2015, 2014-2016, 2015-2017, 2016-2018 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mec.gov.md/ro/content/strategii-de-cheltuieli-domeniul-energetic>
- Raport privind implementarea SSC in domeniul energetic pentru 2013 și 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mec.gov.md/ro/content/strategii-de-cheltuieli-domeniul-energetic>.
- Cinci proiecte care vor consolida securitatea energetică a Moldovei [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://capital.market.md/ro/content/cinci-proiecte-care-vor-consolida-securitatea-energetica-moldovei?page=5>
- REZUMAT NETEHNIC. Raport privind EVALUAREA IMPACTULUI SOCIAL și ASUPRA MEDIULUI [Электронный ресурс]. Proiectul privind interconectarea electrică între Bălți (Moldova) și Suceava (România). Режим доступа: <http://www.transelectrica.ro/>, <http://www.moldelectrica.md/>, <http://ebrd.com/>.
- Proiectul de interconectare a sistemelor electroenergetice Moldova-România. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.moldelectrica.md/ro/finances/mold\\_rom\\_project](http://www.moldelectrica.md/ro/finances/mold_rom_project) (accesat 13.03.2018)
- Postolati, V., Berzan, V. Particularități ale regimului sistemului electroenergetic al Republicii Moldova la realizare interconexiunii cu România [Электронный ресурс]. *EMERG 4. Energie. Mediu. Eficiență. Resurse. Globalizare. Serie nouă. An. II, 2016. Publicație semestrială a AGIR și CNR-CME. București: Editura AGIR, 2016. pp. 103-120. ISSN 2457-5011.*
- Постолатий, В. М., Берзан, В. П., Быкова, Е. В. Режимы энергосистемы Молдовы при введении в работу вставки постоянного тока на подстанции Вулканешты для связи с энергосистемой Румынии [Электронный ресурс]. *Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2017.*

№ 25 (101), pp.230-239. ISSN 2221-3805. Режим доступу: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=907>

### References

1. Zaitsev, D., Tirsu, M., Golub, I., Gore, N. (2010). Controlled intersystem communication. [Interconexiune dirijată a sistemelor energetice]. Problems of the regional energetics, 3(14), pp. 10-17. ISSN 1857-0070. Access mode: <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-314-2010>.
2. Postolati, V. M., Golub, I. V., Bykova, E. V., Shevchenko, N. K., Suslov, V. M., Gore, N. S. (2011). 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. [Modelirovanie variantov razvitia elektroenergeticeskoi sistemi Respubliki Moldova s ucetom paralelnoi raboti s energosistemami sosednih stran]. Problems of the regional energetics, 1(15), pp. 18-30. ISSN 1857-0070. <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-115-2011>.
3. Calinin, L., Zaitsev, D., Tirshu, M., Golub, I. (2012). Options for development of power transmissions of moldavian power system in parallel with power system of Ukraine [Varianti razvitia transportnoi seti Moldovi pri paralelnoi rabote s energosistemoi Ukraini]. Problems of the regional energetics, (18) 2012, pp 24-34. ISSN 1857-0070. Access mode: <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-118-2012>
4. Zaitsev, D., Golub, I., Kalinin, L., Tirshu, M. (2014). Operational regimes of moldavian power system under development of network interconnections [Rejimi energosistemi Moldovi s Uchetom razvitia topologii mejsistemnih sveazei]. Problems of the regional energetics, 2(25), pp. 22-29. ISSN 1857-0070. Access mode: [http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronnyj\\_zhurnal-225-2014](http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronnyj_zhurnal-225-2014).
5. Postolaty, V., Berzan, V., Bykova, E., Andronaty, N. (2016). Mode of Operation of the Republic of Moldova Power System with Back-to-Back Installation at the Substation Vulcanesti [Rejim energosistemi Respublici Moldova pri vklucenii vstavki postoiannogo toka na podstantii Vulkanesti]. Problems of the regional energetics, 3(32), pp 1-14. ISSN 1857-0070. Access mode: [http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronnyj\\_zhurnal-314-2010](http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronnyj_zhurnal-314-2010).
6. ENERGY STRATEGY of the Republic of Moldova until 2030 (2013). Access mode: <http://lex.justice.md/md/346670/>. (access 12.03.2018).
7. Expenditure strategies in the energy field: 2013 – 2015, 2014-2016, 2015-2017, 2016-2018 (2016). Access mode: <http://www.mec.gov.md/ro/content/strategii-de-cheltuieli-domeniul-energetic>
8. Report on the implementation of SSC in the energy field for 2013 and 2015 (2016). Access mode: <http://www.mec.gov.md/ro/content/strategii-de-cheltuieli-domeniul-energetic>.
9. Five projects that will strengthen Moldova's energy security (2016). Access mode: <http://capital.market.md/ro/content/cinci-proiecte-care-vor-consolida-securitatea-energetica-moldovei?page=5>
10. NONTCHNIC SUMMARY. (2017). Report on SOCIAL AND ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT. The Electric Interconnection Project between Bălți (Moldova) and Suceava (Romania). Access mode: <http://www.transelectrica.ro/>, <http://www.moldelectrica.md/>, <http://ebrd.com/>.
11. The interconnection project of the Moldova-Romania power systems (2017). Access mode: [http://www.moldelectrica.md/ro/finances/mold\\_rom\\_project](http://www.moldelectrica.md/ro/finances/mold_rom_project) (accesat 13.03.2018)
12. Postolaty, V., Berzan, V. (2016). Particularities of the regime of the power system of the Republic of Moldova in achieving the interconnection with Romania. EMERG 4. Energie. Mediu. Eficiență. Resurse. Globalizare. Serie nouă. An.II, 2016. Publicație semestrială a AGIR și CNR-CME. București: Editura AGIR, 2016. pp.103-120. ISSN 2457-5011.
13. Postolati, V. M., Berzan, V. P., Bykova, E. V. (2017). Modes of the Moldova's power system with back-to-back instalation at the substation Vulcanesti for connection with the power system of Romania. [Rejimi energosistemi Moldovi pri vvedenii v rabotu vstavki postoiannogo toka na podstantii Vulkanesti dlea sveazi s energosistemoi Rumini]. Electrotechnic and Computer Systems. № 25 (101), pp.230-239. ISSN 2221-3805. Access mode: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=907>

## PECULIARITIES OF WORK OF THE ENERGY SYSTEMS OF MOLDOVA, UKRAINE AND ROMANIA IN THE COMPOSITION OF THE UNITED ENERGY SYSTEM WHEN BtB IS SWITCHED ON AT 400 kV SUBSTATION VULCANESTI

V. M. Postolati, V. P. Berzan, E. V. Bykova

*Institute of Power Engineering of the Academy Science of Moldova*

**Abstract.** For the parallel operation of the electricity systems of Moldova and Romania, it is planned to build of the back-to-back instalation (BtB). The construction of a BtB at a Vulcanesti substation with a capacity of 600 MW will affect the operation mode of the energy systems of Moldova and Ukraine. The purpose of this is to simulate and analyze the operating modes of the integrated power system, which includes the energy systems of Moldova, Ukraine, Romania and other countries when the BtB change of the generation power balance of the in the electric power system of Moldova. To solve this problem, a calculation scheme has been developed for an integrated electric power system for the new working conditions caused by the creation of a direct current channel at the border of the energy systems of Moldova and Romania. The mode of electricity injection into the Moldovan energy system from the Romanian energy system at the level of 500-600 MW is considered. The change in the power generation balance in the Moldovan energy system leads to a change in power flows across the high-voltage intra-system lines of both Moldova and Ukraine, to a decrease in the power flow over the 330 kV overhead line Dnestrovskaya HPP (Ukraine) to Beltsy (Moldova), and the MRPP will not transfer energy Chisinau in the energy system of Ukraine. In circuits of the Moldovan energy system, circulating power flows appear, which leads to additional losses of electricity. Installation of the phase regulator on the MRPP tires allows to regulate the transmitted power through the MRPP-Chisinau line. The change in the phase angle between the input and output voltages of the phase regulator for every ten degrees in the line MRPP-Chisinau by about 200 MW. Forced regulation of power flows at the joint operation of BtB in Vulcanesti and MRPP leads to an increase in losses in the energy systems of Moldova and Ukraine. Therefore, the BtB in Vulcanesti should be viewed not as an object of national importance in Moldova, but as an international object that affects the energy supply and the regime of energy networks in our region.

**Keywords:** integrated power system, Back-to-Back instalation, phase-regulating devices.

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМ МОЛДОВИ, УКРАЇНИ ТА РУМУНІЇ В СКЛАДІ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ПРИ ВКЛЮЧЕННІ ВСТАВКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ПІДСТАНЦІЇ 400 кВ ВУЛКАНЄШТИ

В. М. Постолатий, В. П. Берзан, Е. В. Быкова

*Інститут енергетики Академії наук Молдови*

**Анотація.** Для паралельної роботи електроенергетичних систем Молдови та Румунії планується побудувати вставки постійного струму (ВПС). Будівництво ВПС на підстанції Вулканешти потужність 600 МВт вплине на режим роботи енергосистем Молдови і України. Вивчення особливостей режимів електроенергетичних Молдови, Румунії та України має практичний інтерес. Метою цієї є моделювання і аналіз режимів роботи об'єднаної енергосистеми, що включає енергосистеми Молдови, України, Румунії та інших країн при зміні балансу генерації ВПС в електроенергетичній системі Молдови. Для вирішення цього завдання розроблена розрахункова схема інтегрованої електроенергетичної системи для нових умов роботи, викликаних створенням каналу постійного струму на кордоні енергетичних систем Молдови та Румунії. Розглянуто режим інжекції електроенергії в молдавську енергосистему від румунської енергосистеми на рівні 500-600 МВт. Изменение баланса генерации в энергосистеме Молдовы приводит к изменению потоков мощности по внутрисистемным высоковольтным линиям как Молдовы, так и Украины, к снижению потока мощности по ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС (Украина) - Бельцы (Молдова), а МГРЭС будет передавать энергию не в

сторону Кишинев а в енергосистеме України. У ряді замкнених контурів енергосистеми Молдови з'являються циркулюючі потоки потужності, що призводить до додаткових втратами електроенергії. Установка на шинях МГРЕС фазорегулятора дозволяє регулювати передачі потужності по лінії МГРЕС-Кишинів. Зміна кута зсуву фази між вхідним і вихідним напругами фазорегулятора на кожні десять градусів, призводить до зміни передана потужність по Дволянцюзговий лінії 330 кВ МГРЕС-Кишинів приблизно на 200 МВт. Примусове регулювання потоками потужності при роботі ВПС в Вулканешти і МГРЕС призводить до зростання втрат в енергосистемах Молдови та України. Тому, ВПС в Вулканешти слід розглядати не як об'єкт національного значення Молдови, а як об'єкт інтернаціональний, який впливає на енергопостачання і режим енергомереж в нашому регіоні.

**Ключові слова:** об'єднана енергосистема, вставка постійного струму, фазорегулювальні пристрою.

Получено 14.03.2018



**Постолатий Виталій Михайлович**, доктор хабилитат технических наук, академик, заведующий лабораторией управляемые линии электропередачи Института энергетики Академии наук Молдовы. Ул. Академическая, 5, МД 2028, Кишинэу, Республика Молдова, E-mail: vpostolati@rambler.ru, тел. +373 22-735388

**Postolatiy Vitaliy**, doctor habilitat of technical sciences, academician, head of the laboratory controlled power transmission lines of the Institute of Power Engineering the Academy of Sciences of Moldova. 5, Academy str., MD 2028, Chisinau, Republic of Moldova, E-mail: vpostolati@rambler.ru, тел. +373 22-735388

**ORCID ID:** 0000-0001-8709-9493



**Берзан Владимир Петрович**, доктор хабилитат технических наук, зам.директора по науке Института энергетики Академии наук Молдовы. Ул. Академическая, 5, МД2028, Кишинэу, Республика Молдова, E-mail: berzan@ie.asm.md, тел. +373 22 735384

**Vladimir Berzan**, Dr. of Science, Deputy Director for Science of the Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova. 5, Academy str, MD2028, Chisinau, Republic of Moldova, E-mail: berzan@ie.asm.md, тел. +373 22 735384.

**ORCID ID:** 0000-0001-7645-7304



**Быкова Елена Михайловна**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института энергетики Академии наук Молдовы. Ул. Академическая, 5, МД2028, Кишинэу, Республика Молдова, E-mail: elena-bicova@rambler.ru, тел. +373 22 735388

**Elena Bykova**, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova. 5, Academy str, MD2028, Chisinau, Republic of Moldova, E-mail: elena-bicova@rambler.ru, tel. +373 22 735388

**ORCID ID:** 0000-0003-2073-8769