

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ МОЛДАВСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПО УСЛОВИЯМ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Постолатий В.М., Голуб И.В.
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. В работе выполнены моделирование и анализ установившихся режимов энергосистемы Молдовы при параллельной работе с энергосистемой Украины по условиям статической устойчивости. Анализ включает в себя проверку запаса по статической устойчивости заданного режима, нахождения предельных по статической устойчивости режимов и определение области устойчивости энергосистемы в контролируемых координатах режима. Параметрами для анализа являются перетоки активной мощности по контролируемым сечениям и напряжения в контрольных узлах схемы. Рассмотрены два варианта состояния схемы электроэнергетической системы Молдовы: с одноцепным транзитом Днестровская ГЭС – Бэлць – Стрэшень – Кишинев 330кВ и двухцепным. Исследования показали целесообразность ввода двухцепного транзита для повышения запаса по статической устойчивости, а также снижение общесистемных потерь мощности. Исследования проведены с учетом методических указаний по устойчивости энергосистемы, а также программы RastrWin.

Ключевые слова: статическая устойчивость, режим энергосистемы, утяжеление режима.

MODELAREA REGIMURILOR TRANZITORII ALE SISTEMULUI ENERGETIC DIN MOLDOVA ÎN CONDIȚII DE STABILITATEA STATICĂ

Vitalie Postolati, Irina Golub
Institutul de Energetică al AȘM

Rezumat. În lucrare este realizată modelarea și analiza regimurilor staționare ale sistemului energetic al Moldovei la funcționarea în paralel cu sistemul energetic al Ucrainei în termeni de stabilitate statică. Analiza include verificarea rezervei de stabilitate statică a unui regim dat, determinarea limitelor privind stabilitatea statică a regimurilor și determinarea regiunelor stabilității sistemului energetic referitor la parametri controlate. Parametri de analiza sunt fluxurile de putere activă sunt controlate prin secțiuni controlate și tensiunile în nodurile de control. Sunt considerate două variante de stare ale sistemului de energetic a Republicii Moldova: cu tranzit de energie cu un singur circuit Hidrocentrala Dnestrovsk - Bălți - Strășeni – Chișinău 330kV și cu două circuite. Studiile au demonstrat fezabilitatea de folosire a tranzitului cu două-circuite pentru îmbunătățirea rezervei de stabilitate statică, precum și a reducerea pierderilor sumare de putere la nivel de sistem. Investigațiile au fost efectuate luând în considerare indicațiile metodice referitor la stabilitatea sistemului energetic, precum și programul de calcul RastrWin.

Cuvinte-cheie: stabilitatea statică, regimul sistemului energetic

SIMULATION OF THE TRANSITIONAL REGIME OF THE MOLDOVAN POWER UNDER STATIC STABILITY

Vitaly Postolaty, Irina Golub
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The paper presents the outcome of the Moldovan power system static stability modeling and analysis, considering the operation in parallel with the Ukrainian power system and the established operation regimes. The analysis includes verification of the reserve of static stability and definition of the static stability limits for a given operation mode, and the determination of the power system stability domain of the controlled system nodes. Parameters used for the analysis are the active power flows via controlled sections and the voltage levels at the controlled system nodes. Two options of Moldovan power system scheme are considered: a single-circuit transit Dniester HPP - Balti - Straseneni – Chisinau 330kV and a double-circuit transit. Studies have shown that the

implementation of the double-circuit transit would lead to better static stability parameters and lower power system losses. The analysis has been carried out based on the power system stability.

Key words: static stability, power system operation mode.

Введение

Современное состояние электроэнергетической системы Молдовы характеризуется некоторой стабильностью. Баланс электроэнергии обеспечивается благодаря работе основных источников правобережных и левобережных районов Днестра, а также за счет перетоков электроэнергии из энергосистемы Украины. В последние годы наблюдается некоторый рост потребления электроэнергии, в связи с чем требования к энергосистеме возрастают. Учитывая перспективы намечаемого роста экономики страны, требуется рассмотрение вариантов дальнейшего развития энергетики и, в первую очередь, электроэнергетики [1]. Формирование правильных направлений развития электроэнергетики может быть осуществлено на основе детальных исследований стационарных и переходных режимов электроэнергетической системы, в том числе статической устойчивости. При этом необходим учет комплекса факторов, структуры и возможного состояния электроэнергетической системы. Исходными являются заданные требования к энергосистеме и, соответственно, к оборудованию и системам управления.

При моделировании режимов высоковольтных сетей за основу была взята база данных, содержащая информацию по энергосистемам Молдовы и Украины. Для выполнения расчета установившегося режима работы энергосистемы используется программа «RatsWin». Расчеты проведены для режима зимнего максимума нагрузки 2008 г., который соответствует уровню нагрузок 2011-2012 гг.

При расчетах режимов энергосистемы Молдовы учтены существующие высоковольтные сети 110-330 кВ Молдавской ЭС и смежные с ними сети 110-330 кВ юго-западных районов ОЭС Украины (Винница), юго-западных районов Южной энергосистемы ОЭС Украины (Одесса) и собственные генерирующие источники. Это позволило оценить характеристики энергосистемы, уровни потерь, величины перетоков мощности, транзитные возможности энергосистемы и сформулировать новые задачи по управлению параметрами режимов межсистемных и внутрисистемных высоковольтных связей, а также основные требования к устройствам регулирования перетоков мощности и поддержания параметров режимов на заданном уровне.

Анализ статической устойчивости энергосистем включает в себя проверку статической устойчивости заданного режима, нахождения предельных по статической устойчивости режимов, определение области статической устойчивости энергосистемы в контролируемых координатах режима. В нашем случае такими координатами являются перетоки активной мощности по контролируемым сечениям и напряжения в контрольных узлах схемы.

Вычисление предельного по статической устойчивости перетока в сечении осуществляется утяжелением режима (увеличением перетока). Будем постепенно утяжелять режим, увеличивая нагрузку энергосистемы. Изменения режима будут продолжаться до нарушения статической устойчивости. Одним из основных признаков нарушения устойчивости при утяжелении режима является снижение напряжения в одном или нескольких узлах схемы ниже допустимого. Этот принцип можно использовать для остановки процесса утяжеления.

Исследование установившихся режимов энергосистемы Молдовы при существующей схеме сетей при увеличении нагрузки до предельной величины

В расчетах принимаются варианты схем энергосистемы (таблица 1): исходная схема, (все сетевые элементы, определяющие устойчивость, находятся в работе, по состоянию нагрузок и генерации на период 2012 г.); схема с увеличенной нагрузкой в Молдавской энергосистеме в 1,2 раза; в 1,4 раза, в 1,5 раза, в 1,6 раза.

Таблица 1. Сравнимые показатели при различных вариантах расчета

	В целом по Молдове					Всего по Украине				
	Рген	Рнаг	Др	Рпотр	Рвн	Рген	Рнаг	Др	Рпотр	Рвн
Исходный режим	847	1218	18,14	1238	-391	25054	24503	160,9	24663	390
1,2Рн	847	1451	23,92	1476	-630	25315	24503	183,5	24686	629
1,4Рн	847	1647	32,05	1681	-834	25548	24503	212,89	24715	833
1,5Рн	847	1733	38,01	1770	-924	25660	24503	233,15	24737	924
1,6Рн	847	1804	46,74	1851	-100	25769	24503	261,24	24763	1005

Моделирование выполнено при существующей структуре электрических сетей и генерирующих источников (рис.1).

Таблица 2. Перетоки по линиям при различных вариантах нагрузки по Молдове

Наименование	Нормальный режим	1,2Рн	1,4Рн	1,5Рн	1,6Рн
330 кВ					
Бэлць - Дн.ГЭС	155,9+j18,5	194+j12	228+j44	244+j62	259+j83
Рыбница 1 - Котовск	88,4+j12,9	108+j7	125+j32	132+j39	139+j49
Рыбница 2 - Котовск	128,5+j25,1	156+j24	181+j50	192+j59	203+j70
МГРЭС - Котовск	64,4-j46,9	73-j11	79+j8	81+j15	83+j25
МГРЭС - Н.Одесская	11-j174,8	58-j180	96-j50	112-j129	126-j101
МГРЭС - Усатово	133,5-j139,8	196-j143	242-j107	262-j82	279-j48
МГРЭС - Арциз	-82+j15,2	-83+j22	-84+j15	-85+j10	-85+j4
Итого:	499,7-j289,8	702-j269	867-j1	938-j26	1004+j82
110 кВ					
Дн. ГЭС - БСЗ	-21,5+j4,3	-29+j3	-35-j1	-39-j3	-42-j6
Окница - Шахты	12-j4,9	18-j4	23-j1	26+j0	28+j2
Немия - Отачь	-10,2+j4,6	-15+j4	-19+j2	-21+j1	-23-j1
Васильевка - Кр. Окна	2,6-j17,8	3-j18	9-j15	12-j13	14-j4
МГРЭС - Староказачье	-28-j13	-25-j13	-22-j12	-20-j11	-19-j10
МГРЭС - Беляевка	-8,6-j5,3	-5-j6	-1-j5	0,7-j5,5	2,4-j4

Продолжение таблицы 2

Вулкэнешть – Болград 1	-23-j	-23-j	-23+j1	-23-j0	-23-j0
Вулкэнешть - р-н Рени	-14,4+j3	-16-j4	-17-j4	-17-j4	-18-j5
Етулия - Буджак	-6-j1,3	-6-j1	-6-j2	-6-j2	-6-j2
Итого:	-97,1-j31,4	-98-j40	-91-j35	-87,3-j37,5	-86,8-j40
Всего 330+110кВ	402,6-j321,2	604-j309	776-j36	850,7-j63,5	917,4+j42

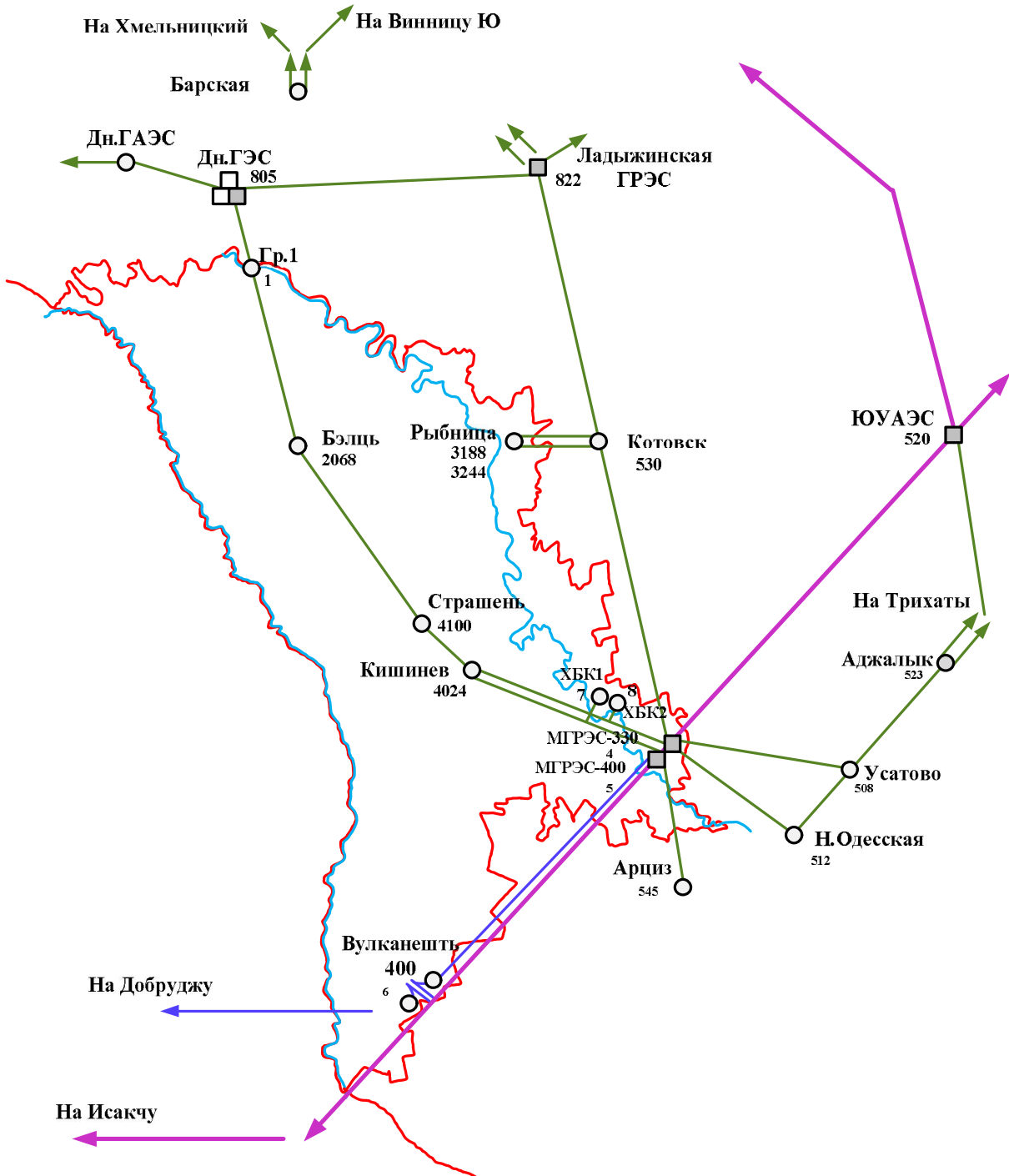


Рис. 1. Схема Молдавской энергосистемы 330 кВ

Исследование установившихся режимов энергосистемы Молдовы при введении второй цепи 330 кВ Кишинев -Стрэшень - Бэлць – Днестровская ГЭС и при увеличении нагрузки в энергосистеме до предельной величины

Рассмотрим вариант введения в работу второй цепи межсистемной линии электропередачи Бэлць - Днестровская ГЭС-330 кВ и внутрисистемных Бэлць-330 кВ – Стрэшень-330 кВ, Стрэшень-330 кВ – Кишинев-330 кВ (рис. 2).

Это позволит оценить характеристики энергосистемы, уровни потерь, величины перетоков мощности, а также выявить предельные установившиеся режимы энергосистемы. Расчеты, как и в предыдущем случае, проведены для пяти режимов при различных нагрузках P_n в энергосистеме Молдовы.

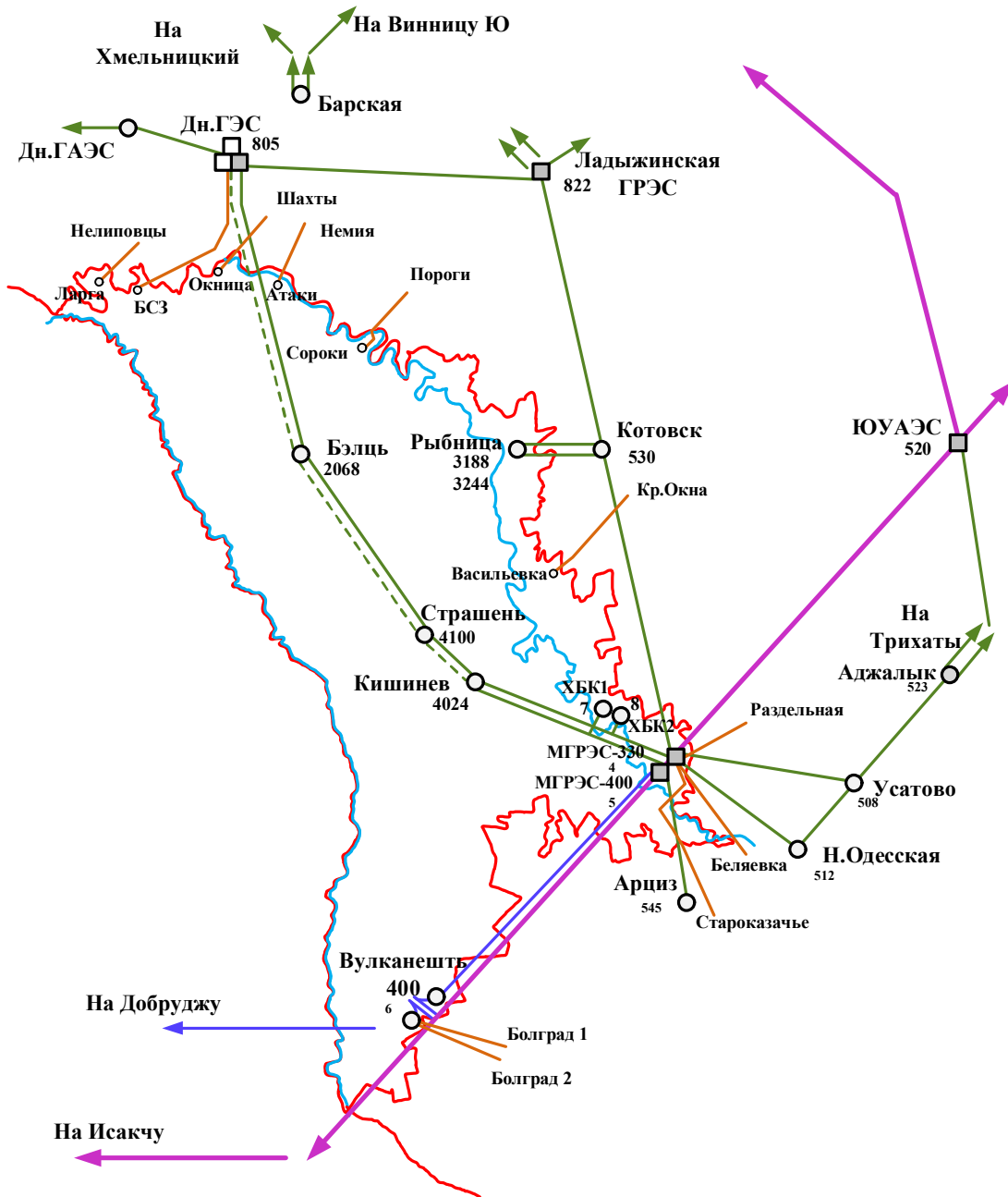


Рис. 2. Схема Молдавской энергосистемы при введении новых линий Днестровская ГЭС – Бэлць – Стрэшень – Кишинев -330 кВ

В соответствии со схемой, приведенной на рис.2 составлены таблицы 2, 3, в которых приведены перетоки по линиям.

Таблица 3. Перетоки по линиям при различных вариантах нагрузки по Молдове при введении в схему сети новой линии Бэлць - Днестровская ГЭС-330 кВ

Наименование	Нормальный режим	1,2P _н	1,5P _н	1,6P _н	1,7P _н
330 кВ					
Бэлць - Дн.ГЭС	96-j1	121+j7	155+j34	165+j46	175+j62
Бэлць - Дн.ГЭС	96-j1	121+j7	155+j34	165+j46	175+j62
Рыбница 1 - Котовск	85+j12	104+j16	129+j33	136+j40	142+j51
Рыбница 2 - Котовск	125+j24	152+j31	189+j53	200+j62	210+j74
МГРЭС - Котовск	57+j13	64-j4	71+j6	72+j14	73+j23
МГРЭС - Н.Одесская	6-j159	52-j179	109-j154	125-j132	136-j102
МГРЭС - Усатово	126-j118	188-j143	260-j113	278-j86	292-j49
МГРЭС - Арциз	-82+j24	-83+j22	-84+j14	-85+j9	-86-j2
Итого:	509+j224	719-j243	984-j93	1056-j1	1117+j119
110 кВ					
Дн.ГЭС - БСЗ	-19-j5	-26+j3	-34-j2	-37-j4	-39-j7
Окница - Шахты	9-j5	14-j4	21-j1	23+j1	25+j2
Немия - Отачь	-8+j5	-12+j4	-18+j1	-19	-21-j1
Васильевка - Кр.Окна	-4-j17	2-j19	10-j15	12-j13	15-j11
МГРЭС - Староказачье	-29-j13	-25-j13	-21-j12	-19-j11	-18-j10
МГРЭС - Беляевка	-9-j5	-5-j6	-j6	2-j5	3-j4
Вулкэнешть – Болград 1	-23	-23	-23	-23	-23
Вулкэнешть - р-н Рени	-14-j3	-16-j4	-18-j4	-18-j5	-18-j5
Етулия - Буджак	-8-j1	-8-j1	-9-j2	-9-j2	-9-j2
Итого:	-105-j34	-99-j40	-92-j41	-88-j39	-85-j38
Всего 330+110кВ	404+j190	620-j283	892-j134	968-j40	1032+j81

Ниже, на рис. 3-6 показаны потери в энергосистеме при одноцепном и двухцепном транзите Днестровская ГЭС – Бэлць-330кВ при различных вариантах нагрузки в Молдавской энергосистеме.

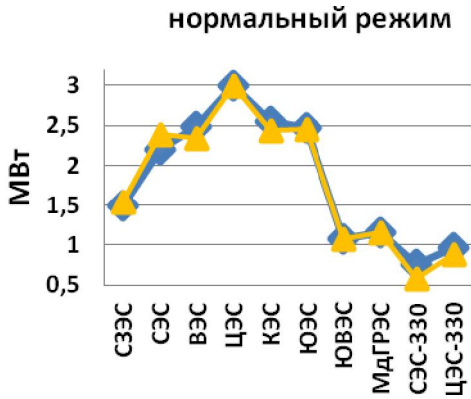


Рис. 3. Потери в энергосистеме по Молдове в нормальном режиме

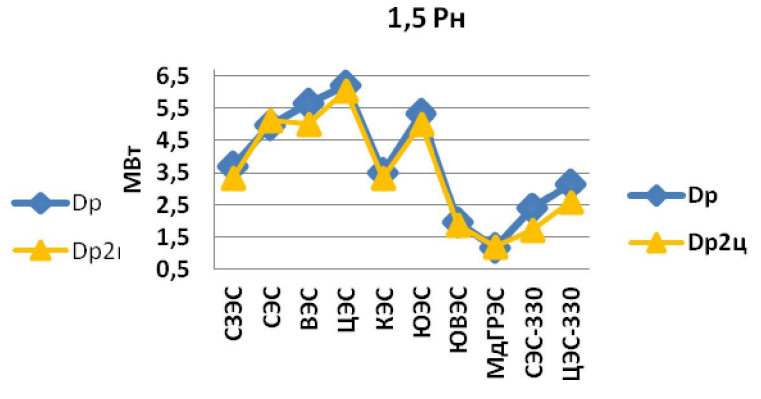


Рис. 5. Потери в энергосистеме при увеличении нагрузки по Молдове в 1,5 раза

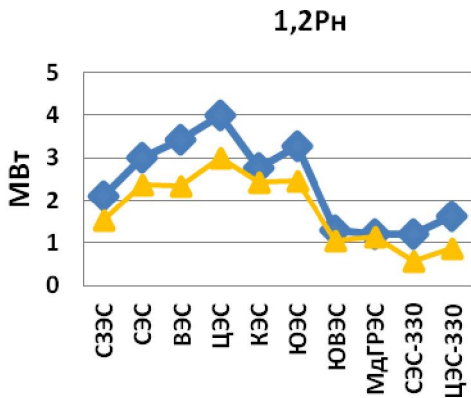


Рис. 4. Потери в энергосистеме при увеличении нагрузки по Молдове в 1,2 раза

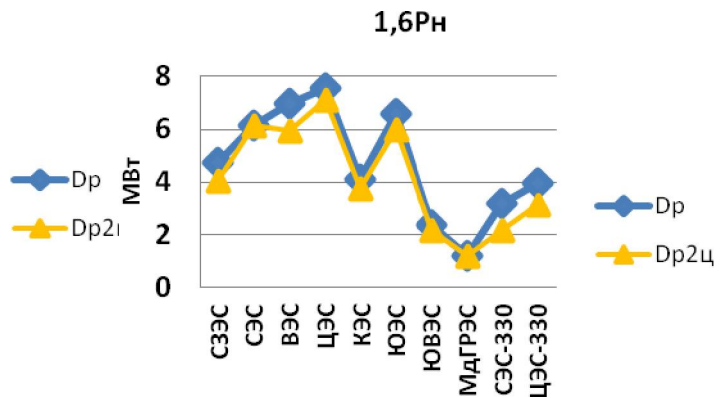


Рис. 6. Потери в энергосистеме при увеличении нагрузки по Молдове в 1,6 раза

Исходя из методических указаний [2], можно определить предельно допустимые нагрузки в энергосистеме при заданной структуре и уровнях генерации, при условии сохранения в синхронной работе источников и межсистемных связей, используя следующие коэффициенты:

- коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности

Коэффициент запаса статической (апериодической) устойчивости по активной мощности (k_p) в сечении вычисляется по формуле (1)

$$K_p = \frac{P_{np} - (P + \Delta P_{нк})}{P_{np}}, \quad (1)$$

где P_{np} – предельный переток активной мощности в рассматриваемом сечении по аperiodической статической устойчивости;

P – переток в сечении в рассматриваемом режиме, $P > 0$;

ΔP – амплитуда нерегулярных колебаний активной мощности в этом сечении. Расчетная амплитуда нерегулярных колебаний активной мощности сечения может быть определена по выражению:

$$\Delta P_{нк} = K \sqrt{\frac{P_{н1} \times P_{н2}}{P_{н1} + P_{н2}}}, \quad (2)$$

где $P_{н1}, P_{н2}$ – суммарные мощности нагрузки с каждой из сторон рассматриваемого сечения, МВт; коэффициент K принимается равным 1,5 при ручном регулировании и 0,75 при автоматическом регулировании (ограничении) перетока мощности в сечении.

- **коэффициент запаса по напряжению**

Значения коэффициента запаса по напряжению K_u относятся к узлам нагрузки и вычисляются по формуле:

$$K_u = \frac{U - U_{кр}}{U}, \quad (3)$$

где U – напряжение в узле в рассматриваемом режиме;

$U_{кр}$ – критическое напряжение в узлах нагрузки 110 кВ и выше.

По условиям устойчивости энергосистем нормируются минимальные коэффициенты запаса статической аperiodической устойчивости по активной мощности в сечениях и по напряжению в узлах нагрузки.

Показатели устойчивости должны быть не ниже, приведенных в таблице 4.

Таблица 4. Показатели устойчивости энергосистемы

Режим, переток в сечении	Минимальные коэффициенты запаса по активной мощности	Минимальные коэффициенты запаса по напряжению
Нормальный	0,20	0,15
Утяжеленный	0,20	0,15
Вынужденный	0,08	0,10

Результаты расчета статической устойчивости энергосистемы

По формулам, приведенным выше, были проведены расчеты коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности и коэффициента запаса по напряжению для рассматриваемых режимов. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Коэффициенты запаса статической устойчивости

Наименование параметра	Нормальный режим	Режим при 1,2 $P_{наг}$	Режим при 1,4 $P_{наг}$	Режим при 1,5 $P_{наг}$
K_p	0,533	0,311	0,12	0,038
K_u	0.143	0.141	0,09	0.056

Как видно из таблицы 5, режим энергосистемы при увеличении нагрузки в 1,5 раза не проходит по запасу статической устойчивости.

На рис. 7 приведены графики зависимости коэффициента запаса по активной мощности и коэффициента запаса по напряжению для варианта одноцепного транзита Днестровская ГЭС – Бэлць-330 кВ.

Из данных, приведенных в таблице 6 и на графике 7, видно, что нагрузка энергосистемы Молдовы при существующей схеме электрических сетей 330 кВ по пределу статической устойчивости не должна превышать следующих значений по отношению к исходной величине $P_{наг}=1218$ МВт:

- по активной мощности (при $K_p=0,2$), $P_m=1,32$ $P_{наг}=1607$ МВт;
- по напряжению (при $K_u=0,15$), $P_m=1,24$ $P_{наг}=1510$ МВт.

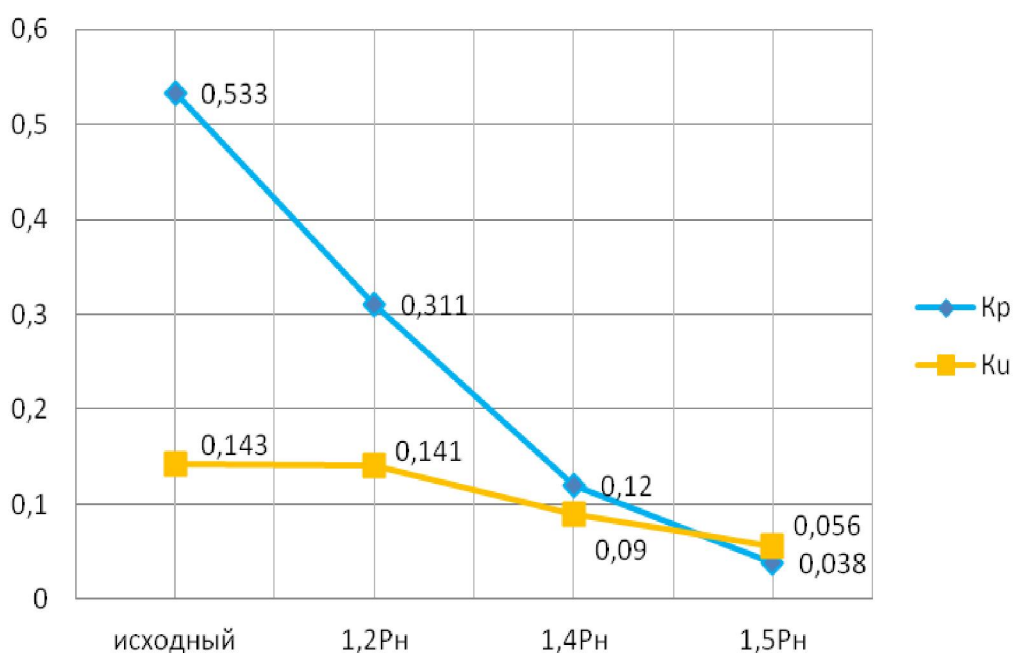


Рис .7. Графики зависимости коэффициента запаса по активной мощности и коэффициента запаса по напряжению

В случае, если будет введена вторая цепь ВЛ-330 кВ Бэлць – Гр.1 – ДнГЭС, запас по статической устойчивости увеличится и, как следует из таблицы 6 и рис. 8. составит:

- по активной мощности $P_m=1,38$ $P_{наг}=1680$ МВт;
- по напряжению $P_m=1,27$ $P_{наг}=1546$ МВт.

Таблица 6. Коэффициенты запаса статической устойчивости

Наименование параметра	Нормальный режим	Режим при 1,2 $P_{наг}$	Режим при 1,5 $P_{наг}$	Режим при 1,6 $P_{наг}$
K_p	0,58	0,37	0,128	0,031
K_u	0,154	0,154	0,101	0,062

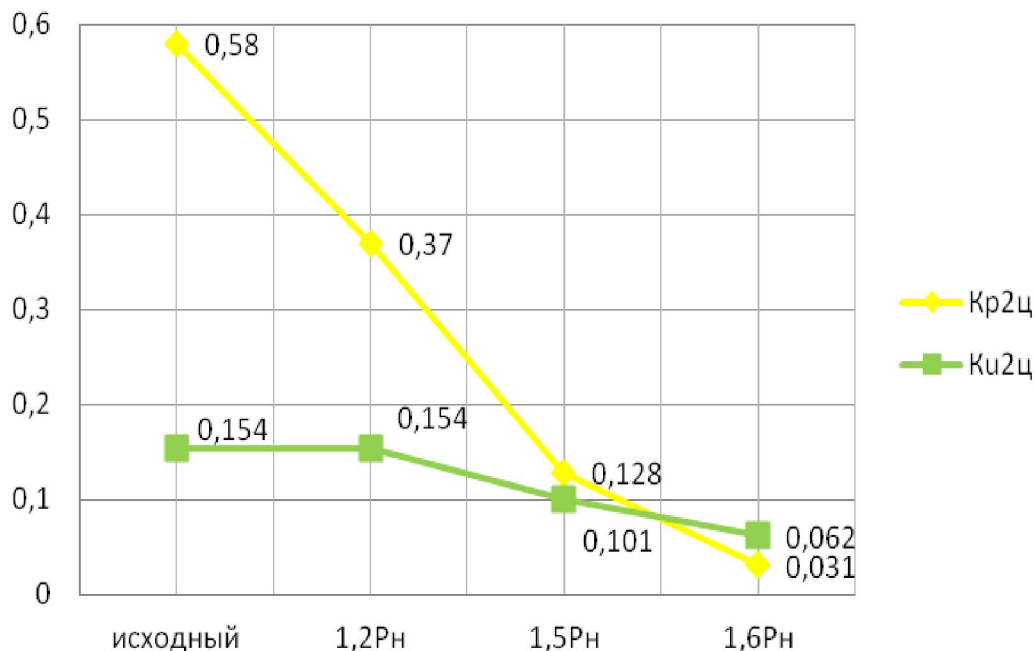


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента запаса по активной мощности и коэффициента запаса по напряжению для варианта двухцепного транзита Днестровская ГЭС – Бэлць-330 кВ

Для наглядного сравнения коэффициенты запаса по активной мощности и по напряжению для вариантов одноцепного и двухцепного транзитов сопоставлены с нормативными показателями устойчивости на рис. 9 и 10 соответственно.

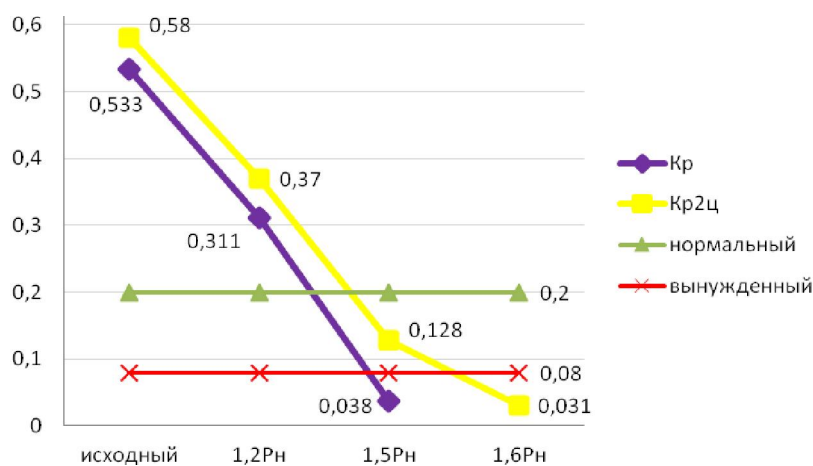


Рис. 9. Коэффициенты запаса по активной мощности

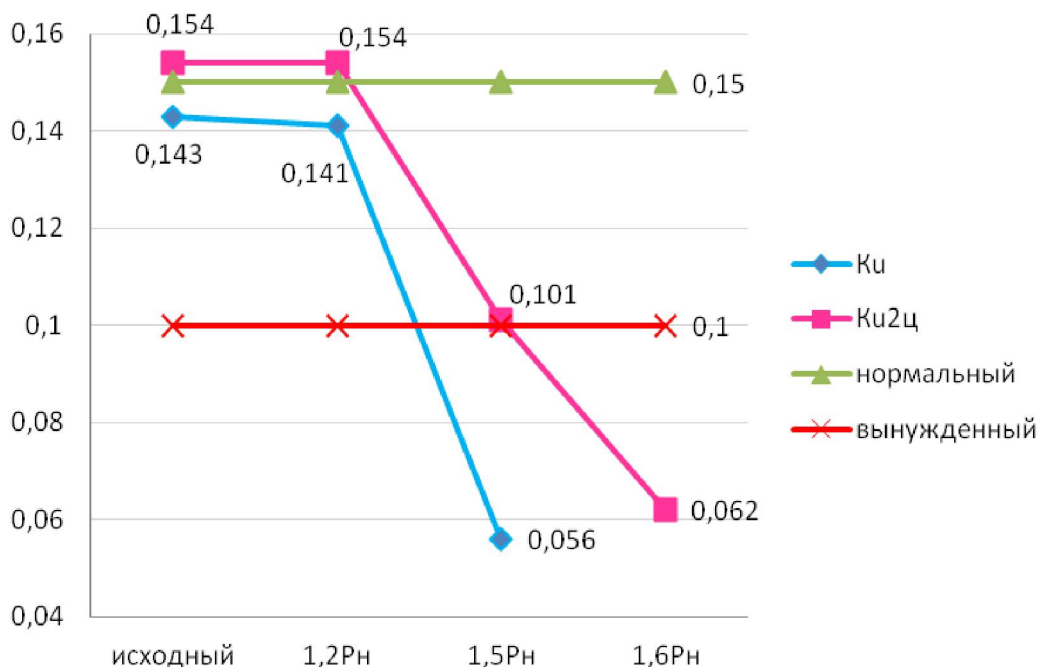


Рис. 10. Коэффициенты запаса по напряжению

В работе также был рассчитан запас статической устойчивости для варианта одноцепного транзита в случае потери связи Днестровская ГЭС – Бэлць-330 кВ (n-1) (см. рис. 11-12).

n-1

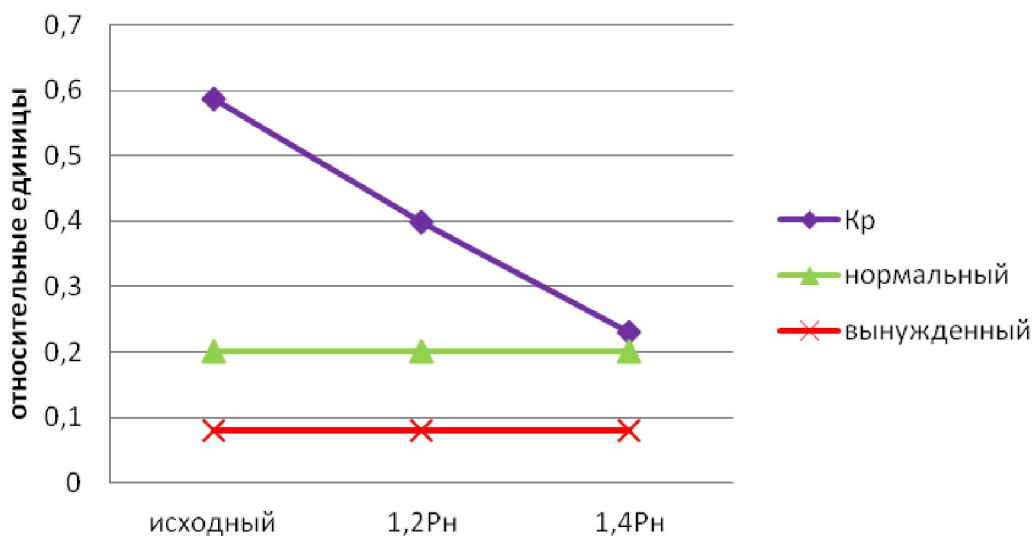


Рис. 11. Коэффициенты запаса по активной мощности

В случае отключения ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС – Бэлць в исходной схеме предел мощности по уровню снижения напряжения составит $Ku=1,12$, т.е. $P_m=1,12 \cdot 1218 = 1364$ МВт.

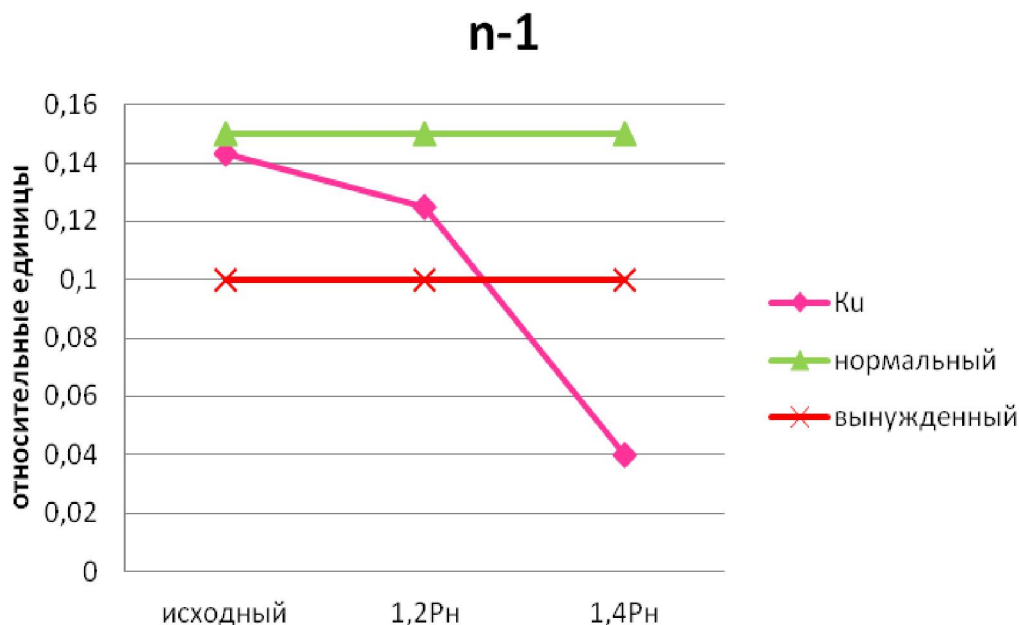


Рис. 12. Коэффициенты запаса по напряжению

Выводы

В работе определен запас статической устойчивости при различных стратегиях развития межсистемных высоковольтных связей энергосистемы Молдовы.

Для варианта схемы энергосистемы одноцепного транзита Днестровская ГЭС-Бэлць- Стрэшень – Кишинев 330 кВ расчеты показали, что постепенное увеличение нагрузки в энергосистеме Молдовы с 1218МВт до 1647МВт (в 1,4 раза) не нарушает статической устойчивости энергосистемы. Для варианта двухцепного транзита предел статической устойчивости системы достигает уровня полуторакратного увеличения нагрузки (до 1762МВт).

Таким образом, введение в работу второй цепи Днестровская ГЭС- Бэлць-Стрэшень – Кишинев 330 кВ создает возможности увеличения транзитных перетоков мощности. Достигаемые при этом улучшения режимных параметров объединенной энергосистемы обеспечивают снижение общесистемных потерь мощности.

Полученные результаты могут быть полезны для оценки состояния режимов и технических характеристик энергосистемы при работе ее в настоящее время и с учетом новых требований, связанных с перспективами развития.

Литература

- [1] Моделирование вариантов развития электроэнергетической системы Республики Молдова с учетом параллельной работы с энергосистемами соседних стран. Постолатий В.М., Голуб И.В., Быкова Е.В., Шевченко Н.К.,Суслов В.М., Горе Н.С. "Problemele energeticii regionale». № 1(15), 2011.
- [2] Методические указания по устойчивости энергосистем. Москва, изд-во "НЦЭНАС", 2004г.,9с.
- [3] Probabilistic static voltage stability security assessment for power transmission system Dongtao Wang; Yixin Yu Power and Energy Engineering Conference(APPEEC), 2010 Asia-Pacific Publication Year: 2010, Page(s): 1 – 4

- [4] K.S.Pandya, 2S.K.Joshi A SURVEY OF OPTIMAL POWER FLOW METHODS Journal of Theoretical and Applied Information Technology Page(s):450-458
[5] ThanhLong Duong , Yao JianGang , VietAnh Truong A new method for secured optimal power flow under normal and network contingencies via optimal location of TCSC Electrical Power and Energy Systems 52 (2013) 68–80.

Сведения об авторах:



Постолатий Виталий Михайлович, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики Академии наук Молдовы; доктор технических наук, академик АН Молдовы. Область научных интересов: энергетические системы, управляемые линии электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности, проблемы передачи энергии, режимы энергетических систем, переходные электромеханические процессы, электрические станции, теплоэнергетика, экономика энергетики, вопросы управления энергетическим комплексом.



Голуб Ирина Владимировна окончила Кишиневский политехнический институт в 1989 году. Область научных интересов связана с исследованиями режимов энергосистем, управляемых линий электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности.