ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС И МОДЕЛИРОВАНИЕ УГРОЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОЛДОВЫ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ МЕЖСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Быкова Е.В.
Институт энергетики АНМ

Аннотация. В работе выполнено моделирование группы сценариев реализации угроз энергетической безопасности для Молдавской энергетической системы, которые возникают при отключении (или ограничении перетоков электроэнергии) ВЛ 330 кВ Бельцы - Днестровская ГЭС. Для выполнения анализа использован вычислительный комплекс для мониторинга энергетической безопасности, который разработан в ИЭ АНМ.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, угрозы, сценарии, моделирование.

SISTEMUL DE CALCUL ŞI MODELAREA PERICOLELOR DE SECURITATE ENERGETICĂ A MOLDOVEI ÎN CAZUL DEBRANŞĂRII CONEXIUNILOR INTERSISTEMICE

Bîcova E.V.
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat. În lucrare este efectuată modelarea uniu grup de scenarii de punere în aplicare a pericolelor securității energetice ale Republicii Moldova, care apar la debranşarea (sau limitarea fluxurilor energiei electrice) liniilor aeriene 330 kV Bălți-Nistru CHH. Pentru implementarea analizei este utilizat complexul de calcul pentru monitorizarea securității energetice elaborat în AŞM.

Cuvinte–cheie: securitatea energetică, scenariu, modelare, pericol de debranşare.

COMPUTER SYSTEM AND MODELLING OF THREATS TO ENERGY SECURITY OF MOLDOVA IN CASE OF INTERSYSTEM COMMUNICATION DISCONNECTION

Bykova E.V.
Institute of Power Engineering of the ASM

Abstract. In the paper modeling of a group of scenarios of threats to energetic security of Moldovan energy system, which occur in case of disconnecting (or limitation of cross-flows of electricity) of 330 kV transmission line Balti-Dniester HPS. It was used for analysis a software application for energy security monitoring. The application has been developed in IE ASM.

Key words: energy security, threat, scenario, modeling.

Введение

Для управления процессами в энергетике и обеспечения энергетической безопасности страны необходим мониторинг состояния энергетической безопасности с определенной периодичностью, например, ежегодно. В настоящее время в ИЭ АНМ разработан вычислительный комплекс, который объединяет накопление и систематизацию данных, определение уровня энергетической безопасности страны и тенденций ее изменения на перспективу [1-2].

Целью настоящей статьи является описание структуры вычислительного комплекса и иллюстрация его применения для моделирования угроз энергетической безопасности при отключении межсистемной ВЛ-330 кВ.

Вычислительный комплекс для мониторинга и анализа индикаторов энергетической безопасности

Вычислительный комплекс для расчета и анализа, позволяющий выполнять оценку состояния энергетической безопасности по секторам энергетики, разработан для общей системы индикаторов (более 40) и имеет дополнительные связи с системами

индикаторов экономической и экологической безопасности. В его структуру входят информационный, расчетный, аналитический модули, реализованные в программе EXCEL. Модульное построение позволяет нарастить комплекс дополнительными Приложениями по мере необходимости (рис.1 и 2).

Информационный модуль предназначен для сбора, хранения и систематизации показателей энергосистемы и всего ТЭК, а также некоторых показателей экономики, которые далее используются для расчета индикаторов (база данных EXCEL). В качестве индикаторов используются как сами первичные показатели, так и синтетические, рассчитанные на основе первичных.. Хранение и сортировка данных удобна также в программе ACCESS, работа над созданием которой в настоящее время также проводится и которую удобно использовать для выполнения различных обзоров, анализа состояния ТЭК и других запросов. Данные в ней сохраняются в виде ТАБЛИЦ, имеющих связи между собой. Это позволяет формировать ЗАПРОСЫ на выборку необходимой информации и получать ее в виде ФОРМ, ОТЧЕТОВ (в терминах ACCESS).

Таким образом, база данных ACCESS по энергетике представляет собой библиотеку показателей ТЭК и некоторых экономических данных, которые связаны с энергетикой. В обе базы данных (ACCESS и EXCEL) внесены одни и те же показатели энергетики.

На текущий момент в базу входит большое количество таблиц (более 150), которые содержат данные по каждому блоку системы энергетической безопасности (всего 10 блоков) и каждой сфере системы индикаторов экономической безопасности (всего 12 сфер). Построена Главная кнопочная форма для некоторых экономических сфер, которая позволяет осуществлять более оперативный переход к соответствующим таблицам.

Разработанная база данных является Приложением вычислительного комплекса для анализа и мониторинга индикаторов энергетической безопасности.

Расчетный модуль предназначен для расчета текущих фактических, пороговых значений индикаторов и балльной оценки состояния, которая позволяет определить степень кризисности индикатора по принятой шкале и итоговую оценку состояния энергетической безопасности.

Аналитический модуль объединяет все применяемые методы для проведения анализа динамики состояния, ее описания с использованием статистического и других видов анализа, которые необходимы в данном исследовании. Также имеются Приложение «Прогноз» и Приложение «Сценарии» для выполнения моделирования рисков(угроз) энергетической безопасности и прогнозирования значений индикаторов.

Работа по пополнению данных проводится ежегодно для осуществления мониторинга состояния энергетической безопасности в прошедший год и корректировки необходимых мероприятий по обеспечению энергетической безопасности.

Из определения энергетической безопасности [3]:

«Энергетическая безопасность – это состояние защищенности страны (региона), ее граждан, общества, государства и экономики от угрозы дефицита в обеспечении потребностей в энергии экономически доступными топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР) приемлемого качества в нормальных условиях и в чрезвычайных обстоятельствах, а также от угрозы нарушения стабильности топливо- и энергоснабжения», следует, что приоритетными являются следующие факторы:

1. обеспечение ТЭР согласно потребности в нормальной ситуации;
2. экономическая доступность ТЭР;
3. качество ТЭР;

4. бесперебойность поставок ТЭР.

При анализе целесообразно использовать понятия «*нормальная*» ситуация, «*чрезвычайная*» ситуация, ситуация «*с ограничениями энергоснабжения*», [4].

Под *нормальной* понимается ситуация, при которой потребление энергии в стране находится на уровне многолетнего среднего без недоотпуска потребителям, за исключением случаев аварий.

Под *чрезвычайной* понимается ситуация, при которой потребление энергии в стране внезапно ограничено вследствие стихийного бедствия или аварии и может быть восстановлено до нормального уровня в течение достаточно короткого времени (день, несколько дней).

Под ситуацией *с ограничением энергоснабжения* понимается ситуация, в которой принудительно и на продолжительный период ограничивается потребление электроэнергии или топлива на определенную величину, отличающуюся от уровня многолетнего среднего. При этом имеет место недоотпуск электроэнергии (топлива) потребителям, которые вынужденно не имеют возможности сохранить тот уровень жизни, который у них был при *нормальной* ситуации с энергообеспечением.

Рис. 1.Структура вычислительного комплекса для анализа безопасности

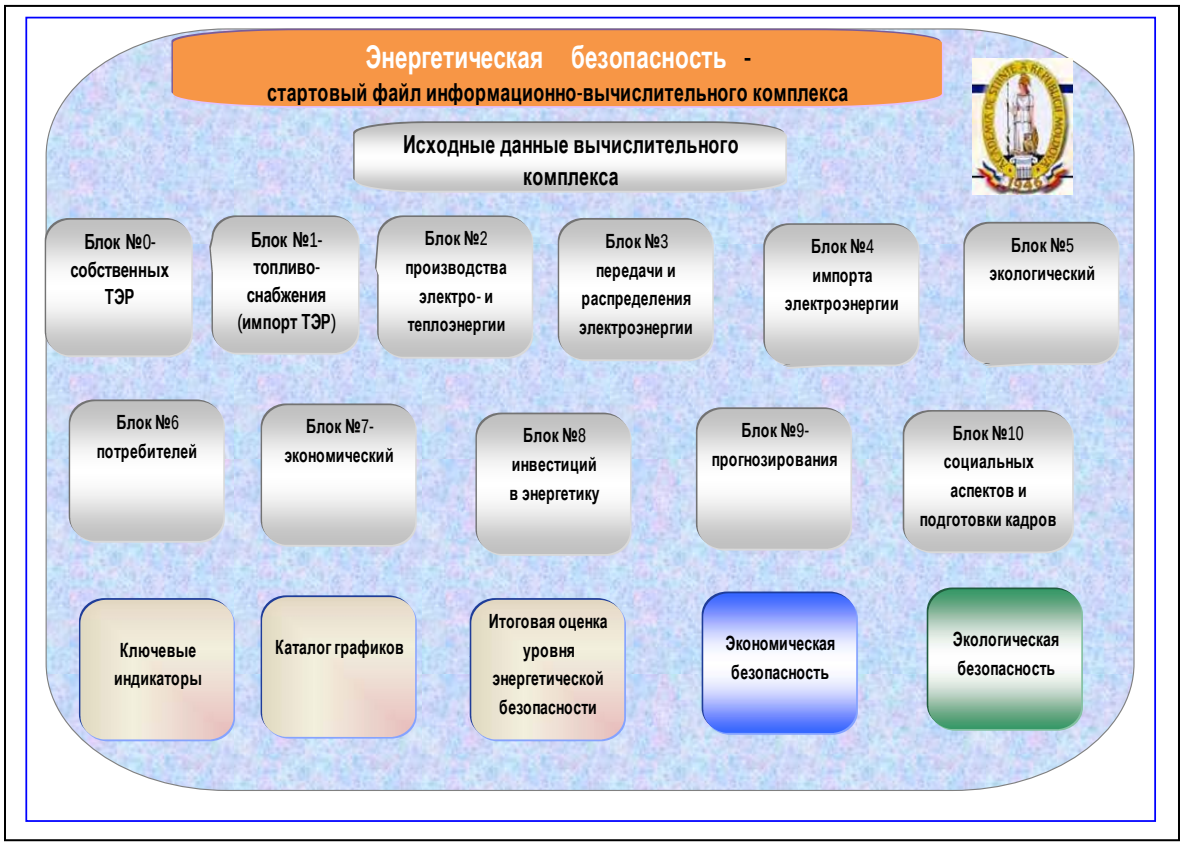


Рис.2. Стартовая страница вычислительного комплекса

Ситуацию с *нормальным* среднемноголетним энергообеспечением можно оценить через коэффициент **к**=1; ситуация *чрезвычайного* характера оценивается по шкале, все пороги которой составляют 30% от порогов нормальной ситуации,[1], что определяет **к**=0,3; ситуация *с ограничением энергообеспечения* может быть описана интервалом (0,3-1) и **к**=0,9; 0,8;0,7-..0,3 .

Энергообеспечение потребителей можно разделить на 3 составляющие: топливообеспечение (импортированное топливо) и электрообеспечение (выработка на собственных источниках за счет импортированного топлива плюс импорт электроэнергии из соседней энергосистемы), теплообеспечение. Обеспеченность каждым видом энергии учитывается через коэффициенты $\mathbf{к}_{т}$ и $\mathbf{к}_{ээ}$, $\mathbf{к}_{тэ}$, которые позволяют учесть приоритетные факторы, вытекающие из определения энергетической безопасности. Каждый их данных коэффициентов может быть ограничен по отдельности. Их общее влияние является произведением $\mathbf{к}= \mathbf{к}_{т} * \mathbf{к}_{ээ} * \mathbf{к}_{тэ}$.

Применение вычислительного комплекса для моделирования угроз энергетической безопасности

Постановка задачи. Определить, насколько изменится общая итоговая оценка состояния энергетической безопасности страны, если будет отключена межсистемная связь (мсс) по ВЛ-330 кВ Кишинев-Бельцы- Днестровская ГЭС (ВЛ №1), по которой осуществляется импорт электроэнергии в Молдову в объеме Аимп=2,9 млрд. кВт*ч, при отключенной двухцепной ВЛ№2 Кишинев-Молдавская ГРЭС.

Дополнительные условия - в качестве исходных данных принят электробаланс 2007 года.

Электроэнергия. Выработка электроэнергии на собственных источниках – Асоб=1,1 млрд. кВт*ч. Максимально возможная выработка электроэнергии на собственных источниках Правобережья оценивается на уровне А соб макс=2 млрд. кВт*ч. Потребление электроэнергии – Апотр=4 млрд. кВт*ч.

Пропускные способности ЛЭП. Пропускная способность отключенной ВЛ №1 $P_{ВЛ №1}$=360 МВт, пропускная способность сечения с учетом других межсистемных ЛЭП- Р мсс= 1430 МВт. Воздушная линия 330 кВ Кишинев - Молдавская ГРЭС (ВЛ №2)- отключена, то есть имеет место автономная работа энергосистемы Правобережья (рис.3).

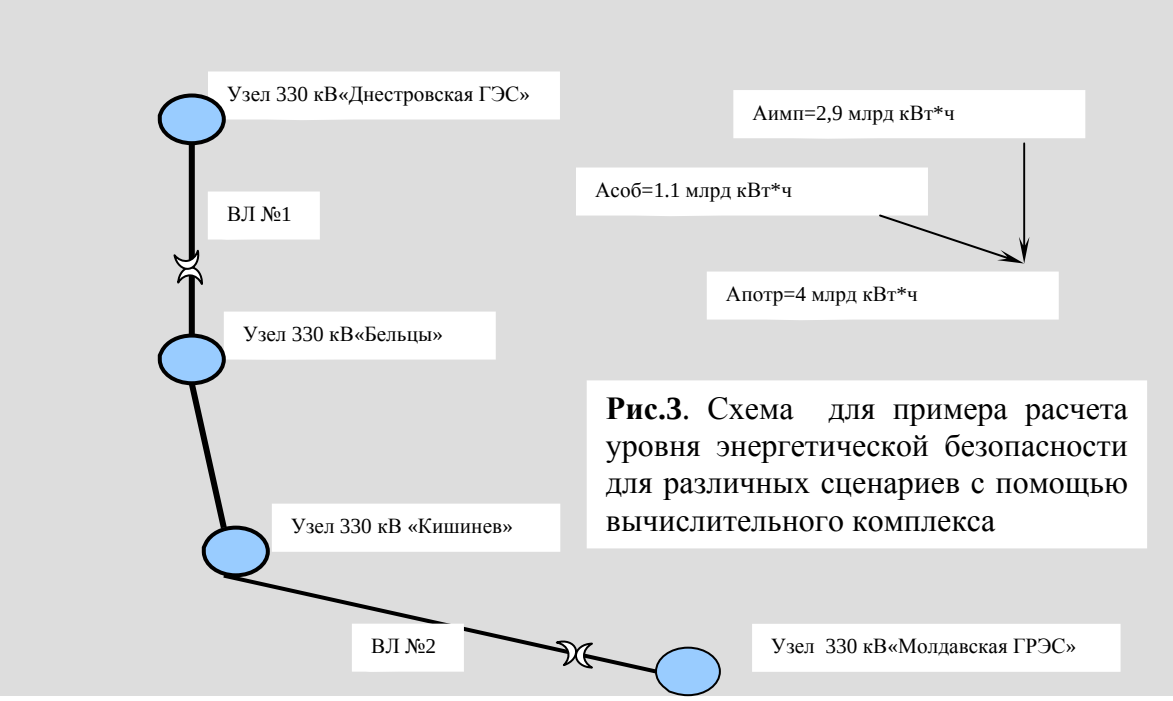


Рис.3. Схема для примера расчета уровня энергетической безопасности для различных сценариев с помощью вычислительного комплекса

Топливо: Суммарное потребление топлива (2007 г) в стране составило 2942 тыс. тут, в том числе природного газа- 1526 тыс. тут или 1323 млн. куб. м . На производство электроэнергии и теплоэнергии затрачено 715 тыс. тут природного газа или 620 млн. куб. м (по данным ТЭБ).

Отдельно для производства электроэнергии затрачено 310 тыс. тут топлива, из них 310 тыс. тут составил природный газ (269 млн. куб. м)

Потребление собственных ТЭР (древесины) для производства теплоэнергии составило 8 тыс. тут.

Далее рассмотрены сценарии по условию поставленной задачи. Коэффициенты ограничения по топливу и теплоснабжению равны 1, так как рассматриваются ограничения только по электроэнергии.

Сценарий А (исходный- текущая ситуация для 2007 г)

По ВЛ №1 осуществляется импорт электроэнергии в объеме Аимп=2,9 млрд. кВт*ч. Собственное производство Асоб=1,1 млрд. кВт*ч. Потребление электроэнергии А потр= 4 млрд. кВт*ч. ВЛ №2- отключена. Ограничений по электропотреблению нет- $\mathbf{к}_{ээ}$.=1.

Имеет место ситуация с *нормальным* энергообеспечением **к**=1.

Сценарий В

ВЛ №1 – отключена, импорт электроэнергии прекращен (Аимп=0 млрд. кВт*ч). Собственное производство электроэнергии Асоб=1,1 млрд. кВт*ч. Потребление электроэнергии уменьшается до текущих объемов ее производства на собственных источниках А потр= 1,1 млрд. кВт*ч (в исходном варианте 4 млрд. кВт*ч) и составляет 0,275 от потребности**,** т.е. **к**$_{ээ}$.=0,275. ВЛ №2- отключена. Имеет место ситуация *с ограничением энергообеспечения* **к**=0,275.

Сценарий С

ВЛ №1 – отключена, импорт электроэнергии прекращен Аимп=0 млрд. кВт*ч. Собственное производство увеличено до максимально возможного Асоб=2 млрд. кВт*ч. Потребление электроэнергии увеличивается до объемов ее производства на собственных источниках А потр= 2 млрд. кВт*ч, что все равно ниже потребности в 2 раза, т.е. **к**$_{ээ}$.=0, 5. ВЛ №2- отключена.

Имеет место ситуация *с ограничением энергообеспечения* **к**=0, 5.

Сценарии D1- D5

В вариантах D1- D4 ВЛ №1 включена, но имеются ограничения по потреблению электроэнергии по сравнению с исходным вариантом на 10, 20, 30, 40%, т.е. А потр= 3,6; 3.2; 2,8; 2,4 млрд. кВт*ч. Коэффициент ограничения по электропотреблению **к**$_{ээ}$.=0, 9;0,8;0,7;0,6.

Собственное максимально возможное производство электроэнергии -А соб=2 млрд. кВт*ч .

Величина необходимых объемов импортируемой электроэнергии для удовлетворения баланса составит Аимп=1,6;1,2;0,8;0,4 млрд. кВт*ч.

ВЛ №1 включена и по ней осуществляется импорт, ВЛ №2-отключена.

Имеет место ситуация *с ограничением энергообеспечения* **к**=0, 9;0,8;0,7;0,6.

В варианте D5 ВЛ №1 включена, но по ней осуществляется только переток в Одесскую энергосистему, без передачи потоков электроэнергии для обеспечения электробаланса в Молдове, т.е. А имп=0 млрд. кВт*ч . В отличие от случая отключения данной ВЛ (сценарий С) , в этом сценарии в исходных данных не уменьшается пропускная способность сечения.

Имеет место ситуация *с ограничением энергообеспечения* **к**=0, 5.

Сценарий Е

ВЛ №1- отключена, но ВЛ №2- включена. В этом случае не возникает сложной ситуации по удовлетворению спроса на электроэнергию, так как имеются достаточные установленные мощности на МГРЭС для покрытия нагрузки на Правом берегу. Режим такой работы не приведет к ухудшению энергетической безопасности Правобережья при наличии договоров о поставке электроэнергии. Имеет место ситуация с *нормальным* энергообеспечением **к**=1.

Сценарий К

ВЛ №1- включена и ВЛ №2- включена, имеются возможности поставок электроэнергии и с Украины и от МГРЭС. В этом случае Молдавская энергосистема работает в проектном варианте, с наилучшими режимными показателями, и ограничений по покрытию баланса не возникает. Имеет место ситуация с *нормальным* энергообеспечением **к**=1.

Описанные сценарии и исходные данные систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для сценариев отключения межсистемной ВЛ 330 кВ

Сценарии	ВЛ№1	Аимп, млрд. кВт*ч	Асоб, млрд. Вт*ч	Апотр, млрд. кВт*ч	ВЛ№2	ограничения	$к_{ээ}$
А (исходный)	включена	2,9	1,1	4	отключена	Нет	1
В	отключена	0	1,1	1,1	отключена	1,1:4=0,275	0,275
С	отключена	0	2	2	отключена	2:4=0,5	0,5
D1	включена	1,6	2	3,6	отключена	0,9*4=3,6	0,9
D2	включена	1,2	2	3.2	отключена	0,8*4=3,2	0.8
D3	включена	0,8	2	2,8	отключена	0,7*4=2,8	0,7
D4	включена	0,4	2	2.4	отключена	0,6*4=2,4	0,6
D5	включена	0	2	2	отключена	2:4=0,5	0,5
Е	отключена	0…2,9	1,1….2	4	отключена	Ограничений нет при наличии договоров о поставках с МГРЭС	1
К	включена	0…2,9	1,1….2	4	включена	Ограничений нет при наличии договоров о поставках с МГРЭС или из Украинской энергосистемы	1

Для описанных сценариев и приведенных исходных данных с помощью вычислительного комплекса (Приложение «Сценарии») рассчитаны значения индикаторов и найдена итоговая оценка состояния энергетической безопасности для каждого из сценариев (табл.2 и рис.4).

Таблица 2. Итоговый уровень энергетической безопасности при отключении межсистемной ВЛ 330 кВ Бельцы-Днестровская ГЭС

	Сценарии					ВЛ №2-отключена		
	A	**B**	**C**	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**
Итоговый с учетом коэффициентов обеспеченности	4.42	17,17	8,66	4,77	5,35	6,02	7,08	8,58

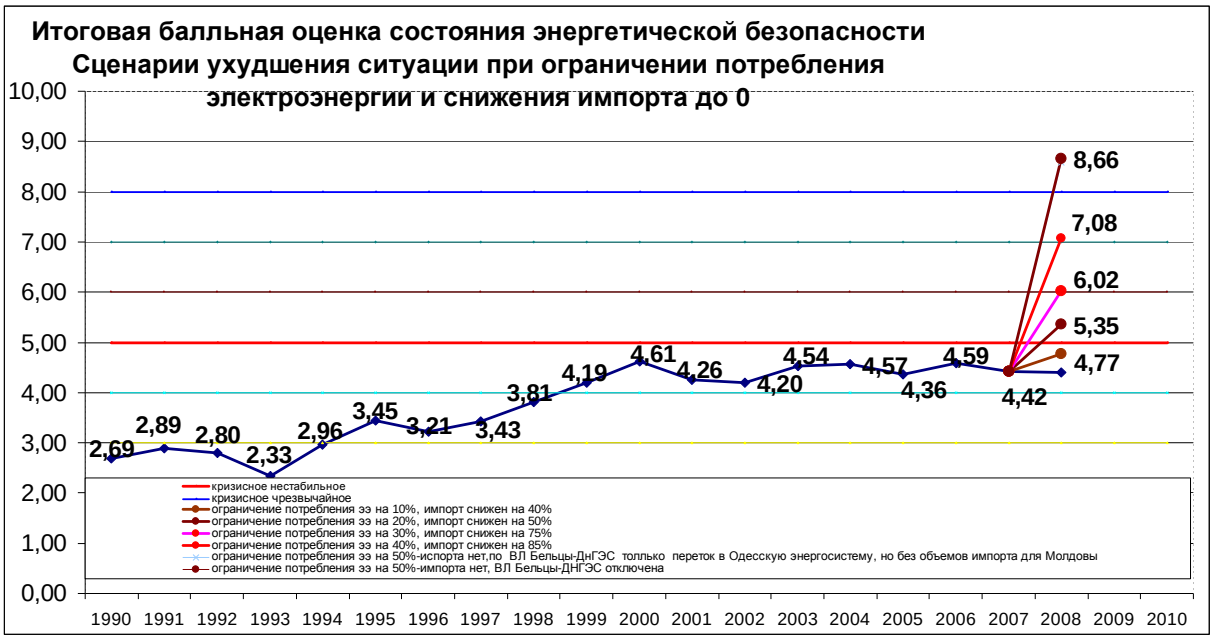


Рис. 4. Итоговая оценка уровня энергетической безопасности для ряда сценариев, которые могут иметь место при отключении межсистемной ВЛ 330 кВ (сценарии А,С, D1- D5).

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее тяжелым вариантом является развитие ситуации по сценарию В , степень ухудшения ситуации для сценариев А, С, D1- D5 отражена на графике итогового уровня энергетической безопасности (рис.4).

В данном примере рассмотрены сценарии развития ситуации при отключении только одного элемента энергосистемы. С помощью данного вычислительного комплекса возможно исследование ряда и других задач.

Заключение

Для мониторинга и анализа энергетической безопасности разработан вычислительный комплекс, в котором имеются модули: информационный (базы данных по энергетике Excel и Access), расчетный, аналитический, прогнозирования. Моделирование рисков (угроз) осуществляется в Приложении «Сценарии», с помощью которого выполнен анализ уровней энергетической безопасности при сценариях А-К отключения системообразующих ЛЭП 330 кВ Бельцы – Днестровская ГЭС (полное отключение и ограничение перетоков различного уровня) при отключенной двухцепной ВЛ 330 кВ Кишинев-Молдавская ГРЭС. Установлено, что наиболее тяжелым является сценарий отключения ВЛ-330 кВ Бельцы – Днестровская ГЭС при отсутствии перетока по ВЛ-330 кВ МГРЭС – Кишинев. При этом степень кризисности увеличивается более чем в два раза по сравнению с текущим уровнем энергетической безопасности. Развитие таких сценариев в действительности недопустимо, так как это приведет к перебоям электроснабжения потребителей. В связи с этим необходимы мероприятия по поддержанию в работе, своевременному ремонту и расширению данной ЛЭП 330 кВ Бельцы – Днестровская ГЭС путем строительства второй цепи для повышения надежности энергосистемы и обеспечения энергетической безопасности.

Литература

1. Быкова Е.В. Методы расчета и анализ показателей энергетической безопасности (на примере энергосистемы Молдовы). Серия «Энергетическая безопасность», Книга №2. Монография. Кишинев, Типография АН РМ, 158 с.,2005.

2.Быкова Е.В. Мониторинг индикаторов энергетической безопасности. Серия «Энергетическая безопасность», книга №4. Монография. Кишинев. Типография АНМ, 162 с., 2008.

3.Благодатских В.Г., Богатырев Л.Л., Бушуев В.В., Воропай Н.И. и др. Влияние энергетического фактора на экономическую безопасность регионов России. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 1998 г. 195 с.

4. Быкова Е.В., Михалевич А.А., Постолатий В.М.,Фисенко С.П., Шнип А. И., Римко Д.В., Гродецкий М.В. Методические подходы к решению проблемы энергетической безопасности Молдовы и Беларуси. Серия «Энергетическая безопасность», книга №5. Monografia.Chisinau,100p, 2010, ISBN 978-9975-62-275-2.

Сведения об авторе.

Быкова Елена Витальевна, д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории управляемых электропередач Институт энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и

управление ими, управляемые электропередачи, энергетическая безопасность, моделирование процессов в энергетике.

INTERCONEXIUNE DIRIJATĂ A SISTEMELOR ENERGETICE

D.ZAIȚEV, M.TÎRŞU, I.GOLUB, N.GORE
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiințe a Moldovei

Rezumat. În lucrare sunt descrise rezultatele cercetărilor legate de utilizarea noilor instalații de dirijare cu regimurile de transport a energiei electrice şi distribuirea ei în bază de IPC (Interphase Power Controller), ținând cont de dezvoltarea interconexiunilor externe ale sistemului energetic al Moldovei. A fost examinată varianta utilizării unei IPC clasice pe LEA Bălți-Suceava. A fost propusă şi cercetată metoda de dirijare cu fluxurile de putere pentru această secțiune cu utilizarea transformatorului de reglare a decalajului de fază (TDF), racordat în paralel IPC şi s-a dovedit eficiența lui tehnică.
Cuvinte-cheie: linie de transport a energiei electrice, transformator de reglare a decalajului de fază, IPC, putere transmisă, schemă echivalentă de substituire.

УПРАВЛЯЕМАЯ МЕЖСИСТЕМНАЯ СВЯЗЬ

Д. ЗАЙЦЕВ, М. ТЫРШУ, И.ГОЛУБ, Н.ГОРЕ
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. В статье описаны результаты исследований связанных с применением новых устройств управления режимом передачи и распределения электроэнергии на базе IPC (Interphase Power Controller) с учетом развития внешних связей Молдавской энергосистемы. Рассмотрен вариант применения классического IPC на ВЛ Бельцы-Сучава. Предложен и исследован метод управления потоками мощности в этом сечении на базе применения ФРТ (фазорегулирующий трансформатор), включенного параллельно IPC и доказана его техническая эффективность.
Ключевые слова: линия электропередачи, фазорегулирующий трансформатор, IPC, передаваемая мощность, эквивалентная схема замещения.

CONTROLLED INTERSYSTEM COMMUNICATION

D. ZAITEV, M.TIRSU, I.GOLUB, N.GORE
Institute of power of engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. There are described results of researches regarding application of the new means for control of mode of electric power transmission and distribution on the basis of IPC (Interphase Power Controller) taking into account development of external connections of the Moldavian power supply system. The variant of application of classical IPC on base of High Voltage Line Beltsy-Suceava is considered. The management method by power flows in this section on the basis of application of PST (Phase Shift transformer), connected in parallel with IPC is offered and investigated and its technical efficiency is proved.
Keywords: transmission line, phase shift transformer, IPC, transmission capacity, equivalent scheme of replacement.

1. Introducere

Tehnologia IPC este o direcție relativ nouă şi de perspectivă în dezvoltarea tehnicii de transport şi distribuție a energiei electrice [1-3]. Această direcție îşi găseşte aplicarea sa, în special, la menținerea unui nivel stabil al fluxului de putere activă în condițiile fluctuațiilor semnificative ale unghiului δ dintre nodurile respective ale rețelei electrice. Soluția tehnică menționată poate fi rațională şi în condițiile dezvoltării rețelelor electrice externe ale sistemului energetic al Moldovei cu sistemele energetice ale Uniunii Europene.

Analiza preliminara a scenariilor posibile pentru schimb de energie cu țările din Europa de Vest demonstrează faptul, că pentru transmiterea puterii în direcția vest, este necesară utilizarea mijloacelor de dirijare speciale, ce asigură sarcina efectivă destinată construcției de noi linii de transport a energiei electrice de tensiune înaltă.

2. IPC nedirijat

Varianta instalaţiei IPC nedirijate este cea mai simplă realizare practică a tehnologiei IPC. Schema principială a acestei instalaţii este reprezentată în Fig.1.

Elementele de bază ale instalaţiei sunt conductanţele capacitive şi inductive $B1$ şi $B2$, conectate la tensiunea liniară de la capătul liniei de transmisie şi convertizorul de fază (Transformator de multiplicare a fazelor TMF), ce asigură racordarea tensiunii liniei şi substaţiei de transformatoare de la capătul liniei de primire. De remarcat, că în schema IPC o importanţă esenţială o are dispozitivul de conversie a decalajului de fază a tensiunilor de alimentare $\left(0^\circ \div 180^\circ\right)$. Această instalaţie suplimentară este o parte integrantă a fiecărei soluţii tehnice şi implică anumite cheltuieli suplimentare. De aceea, reducerea costului acestui convertizor se consideră drept o sarcină actuală la proiectarea instalaţiilor corespunzătoare.

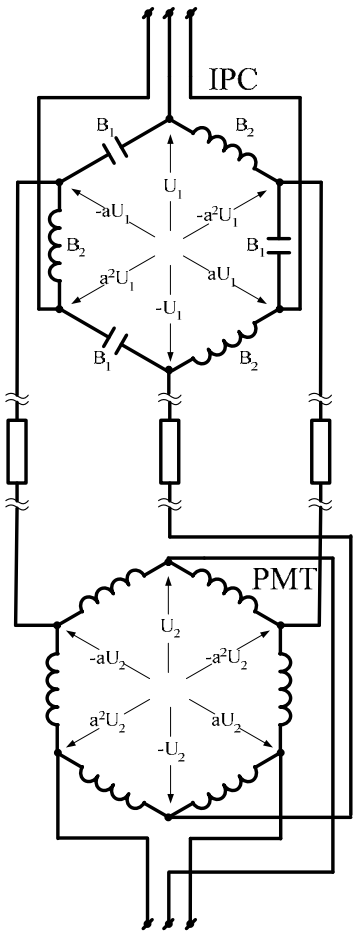


Fig.1. Schema principială a instalaţiei

Varianta ce posedă cei mai atractivi indicatori economici este prezentată în Fig.1. Această soluţie tehnică propusă (TMF în schemă de hexagon) asigură o reducere semnificativă a puterii de calcul (tipice) a instalaţiei în comparaţie cu alte soluţii tehnice posibile (în special, [2]).

Efectul menţionat este condiţionat de faptul, că curentul sarcinii în fiecare înfăşurare a transformatorului este de $\sqrt{3}$ mai mic decât curentul de sarcină de la intrare (sau ieşire) a instalaţiei. Aceasta înseamnă că puterea lui de calcul va fi de $\sqrt{3}$ mai mică decât puterea sarcinii.

Transformatorul examinat posedă capacităţi de autotransformator, adică poate transmite energia electrică atât pe cale electromagnetică, cât şi electrică.

De menţionat, că complexul de calcul „RASTR” aplicat la efectuarea experimentelor de calcul nu oferă o simulare directă a dispozitivului IPC. De aceea, s-a decis reprezentarea IPC în modelul de calcul sub aspectul unei scheme echivalente de substituire prezentate în Fig.2, şi în concordanţă cu cerinţele softului de calcul pentru prezentarea datelor.

Diagrama vectorială a tensiunilor de la începutul liniei de transmitere este arătată în Fig.3. În corespundere cu diagrama vectorială pot fi alcătuite ecuaţiile iniţiale ale echilibrului circuitelor ce conţin conductibilităţi reactive pare $B1$ şi $B2$:

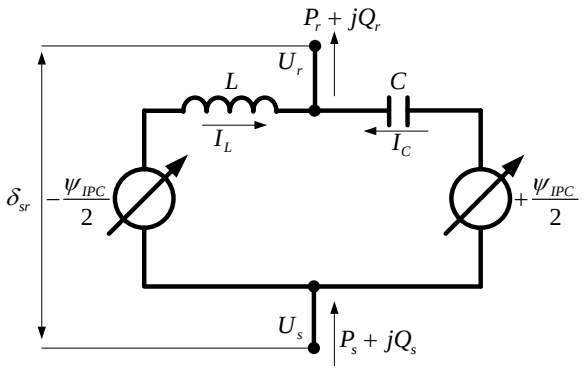


Fig.2. Schema echivalentă de substituire a IPC

$$\begin{cases} U_S e^{-j\frac{\pi}{3}} + U_{B1} - U_r e^{j\delta_{sr}} = 0 \\ U_S e^{j\frac{\pi}{3}} + U_{B2} - U_r e^{j\delta_{sr}} = 0 \end{cases}.$$

În aceste condiţii tensiunile aplicate la inductanţele reactive pare $B1$ şi $B2$ se determină în felul următor:

$$\begin{cases} U_{B1} = U_r e^{j\delta_{sr}} - U_S e^{-j\frac{\pi}{3}} \\ U_{B2} = U_r e^{j\delta_{sr}} - U_S e^{j\frac{\pi}{3}} \end{cases}.$$

Curenții inductanțelor reactive respective depind de tensiunile aplicate lor şi se supun condițiilor:

$$I_{B1} = -jB1U_{B1}; I_{B2} = jB2U_{B2}.$$

Curentul de la ieşirea din instalație constituie suma curenților îmbinați ai inductanțelor. În cazul $|-B1| = |B2| = B$, obținem:

$$I_r = I_{B1} + I_{B2} = jB\left(U_{B2} - U_{B1}\right).$$

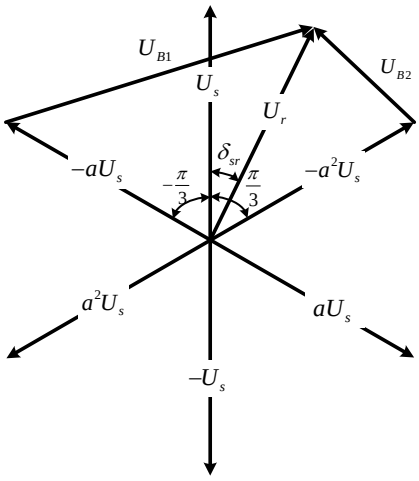


Fig.3 Diagrama vectorială la capătul de transmisie a liniei

Să dezvăluim valoarea $\left(U_{B2} - U_{B1}\right)$:

$$U_{B2} - U_{B1} = -U_S e^{j\frac{\pi}{3}} + U_S e^{-j\frac{\pi}{3}} = U_S\left(e^{-j\frac{\pi}{3}} - e^{j\frac{\pi}{3}}\right).$$

Atunci, curentul de la ieşirea din instalație va obține expresia:

$$I_r = 2BU_S \sin\frac{\pi}{3}.$$

Puterea deplină la ieşire din IPC:

$$S_r = I_r U_r^* = I_r U_r e^{-j\delta_{sr}} = 2BU_S U_r \sin\frac{\pi}{3} e^{-j\delta_{sr}}.$$

Respectiv componenta activă şi reactivă a puterii la ieşire:

$$P_r = S_m \cos\left(-\delta_{sr}\right), \quad Q_r = S_m \sin\left(-\delta_{sr}\right).$$

Valoarea S_m determină puterea de bază a instalației:

$$S_m = 2BU_S U_r \sin\frac{\pi}{3} = \frac{U_r U_s}{X_{LC}},$$

unde $X_{LC} = \dfrac{1}{2B\sin\frac{\pi}{3}}$ - rezistența internă a IPC.

În calitatea obiectului de cercetare este selectată linia electrică preconizată pentru construcție, ce va asigură schimbul de putere dintre nodurile substației Bălți-330 kV a sistemului energetic al Moldovei şi substația Suceava-400 kV a sistemului energetic al României.

Drept bază principală pentru executarea analizei comparative a diferitor variante de realizare a racordărilor electrice menționate, este complexul de calcul „RASTR” destinat efectuării calculelor regimurilor normale ale sistemelor energetice, baza informațională a

datelor structurii reţelelor sistemului energetic al României, Moldovei şi Ucrainei, atât şi rezultatele cercetărilor la această tematică efectuate în cadrul IE AŞM.

Problema tranzitului de energie electrică în direcţia „Vest-Est” este legată de divergenţa standardelor de menţinere a frecvenţei curentului alternativ în ţările Europei de Vest şi Est, fapt ce poate conduce la schimbări evidente ale unghiului δ şi oscilări bruscate ale fluxurilor de putere şi, prin urmare, la posibila dezvoltare a proceselor tranzitorii periculoase ce pot contribui la încălcarea stabilităţii statice. În legătură cu cele expuse mai sus, toate încercările de calcul din cadrul prezentei lucrări s-au efectuat ţinându-se cont de oscilaţiile statice ale unghiului δ dintre substaţia Bălţi şi substaţia Suceava în diapazon de $\left(-30^{\circ} \div +30^{\circ}\right)$.

Presupunând că puterea maximă transmisă prin intermediul IPC este la nivel de 200MW, ceea ce de fapt practic corespunde sarcinii corespunzătoarea a LEA-220 kV, determinăm valoarea rezistenţei necesare a elementelor capacitive şi inductive ale IPC $\left|X_L\right| = \left|X_C\right| = 280Om$.

Parametrii LEA-220 kV corespund parametrilor unui circuit al LEDA-220 kV cu decalaj de fază dintre circuite egal cu 180°.

Rezultatele principale obţinute pentru cazul IPC nedirijat sunt prezentate în Tabelul 1.

Tabelul 1

Rezultatele de calcul pentru cazul IPC nedirijat

δ	*(grade)*	-30	-20	-10	0	10	20	30
U_s	*(kV)*	242.2	239	236	233	230	227	224
U_r	*(kV)*	265.2	251.5	257.9	253.6	248.9	244.2	239
δ_{SR}	*(grade)*	36.4	26.2	18.5	9.1	0.9	11.2	22.1
I_C	(A)	-574	-500	-421	-338	-251	-162	-73
I_L	(A)	75	-52	-111	-187	-266	-344	-420
$P_r + jQ_r$	*P – (MW) Q – (MVar)*	-185-j136	-198-j104	-206-j70	-209-j33	-205+j3	-194+j39	-178+j72

Caracteristicile de lucru ale instalaţiei construite în conformitate cu Tabela 1 sunt reprezentate în figurile:

- Fig.4 – dependenţa puterii active (P_r) şi reactive (Q_r) la oscilaţiile statice ale unghiului δ;
- Fig.5 – graficul modificării tensiunilor la intrare (U_s) şi ieşire (U_r) din IPC la oscilaţiile statice ale unghiului δ;
- Fig.6 – caracterul modificării curenţilor $(I_C),(I_L)$ în elementele IPC la oscilaţiile statice ale unghiului δ;

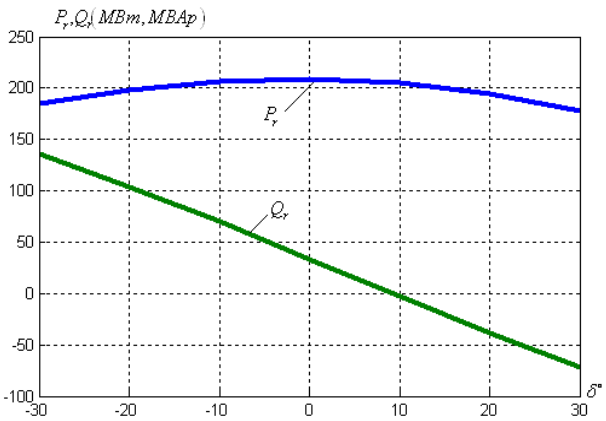


Fig.4. Dependenţa puterii active şi reactive de oscilatia statică a unghiului

Analiza caracteristicilor Fig.4 denotă că la aplicarea tehnologiilor IPC nivelul de putere activă transmisă (P_r) la modificarea unghiului δ este destul de stabil. Aceasta indică faptul că IPC împiedică trecerea

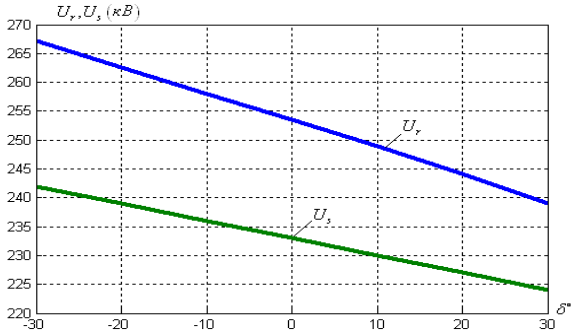


Fig.5. Variaţia tensiunilor la intrarea şi ieşirea IPC la oscilarea statică a unghiului

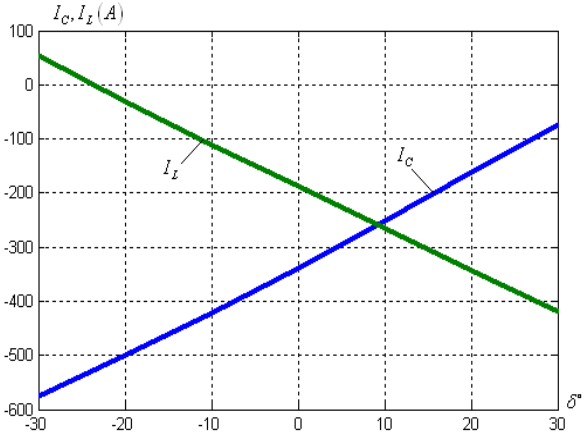


Fig.6. Caracterul modificării curenţilor în elementele IPC la oscilaţiile statice ale unghiului

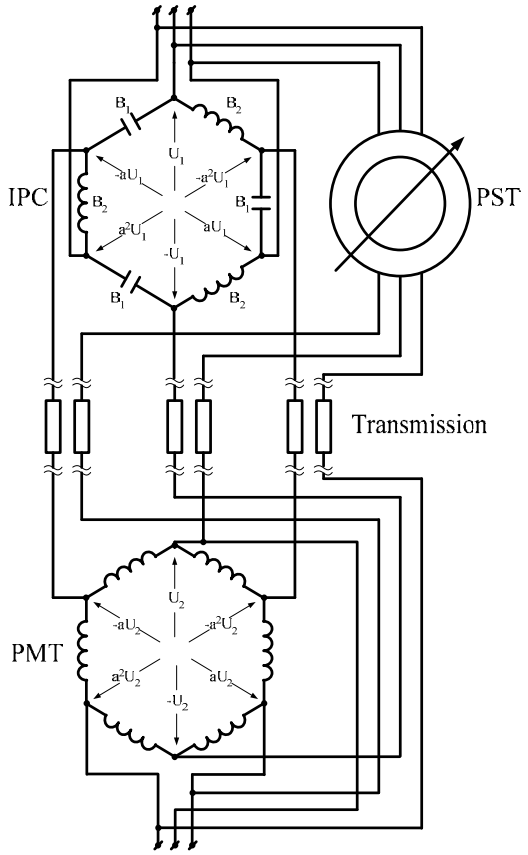


Fig.7. Schema IPC cu conexiune paralelă a liniei din aceiaşi clasă de tensiune

perturbaţiilor dintr-un sistem energetic în altul. Diapazonul fluctuaţiei puterii active şi reactive practic coincide cu rezultatul teoretic scontat.

De remarcat faptul, că la oscilarea unghiului δ au loc fluctuaţii semnificative de tensiune, atât la intrarea în dispozitiv, cât şi la ieşirea din instalaţie (Fig.5).

Totodată, U_r întotdeauna depăşeşte U_s şi trece peste limita admisă, ceea ce conduce la necesitatea utilizării instalaţiilor de compensare transversală – a reactoarelor dirijate.

O caracteristică extrem de importantă a regimului examinat constă în faptul, că o astfel de instalaţie creată poate fi examinată şi în calitate de reglator de putere reactivă în nodul U_s.

În cele ce urmează, toate experimentele legate de utilizarea IPC s-au efectuat cu instalarea reactorului de şuntare pe şinele tensiunii de ieşire a dispozitivului.

Caracterul modificării curenţilor în elementele capacitive şi inductive ale IPC la oscilaţiile unghiului δ, este reprezentat în Fig.6. Unghiul δ la care are loc egalitatea curenţilor I_L şi I_C corespunde $Q_r = 0$, ceea ce confirmă corectitudinea calculelor efectuate.

Astfel, coincidenţa practică a rezultatelor obţinute cu cercetările teoretice efectuate anterior în domeniul IPC confirmă compatibilitatea şi capacitatea de funcţionare a modelului propus de instalaţie în conformitate cu cerinţele complexului de calcul „RASTR”. Caracteristicile construite în baza acestor calcule pot fi considerate drept fiabile.

3. *Varianta IPC cu racordare paralelă a liniei din aceiaşi clasă de tensiune*

Dirijarea cu conexiunea dotată cu IPC poate fi efectuată prin intermediul instalaţiilor suplimentare (în acest caz TDF) racordate paralel după cum este ilustrat în Fig.7. O linie funcţionează în regim de IPC, cealaltă linie este dotată cu transformator de reglare a decalajului de fază. Prima linie lucrează în regim de bază, a doua linie exercită funcţiile de manevrare şi asigură reglajul nivelului de putere activă transmisă între nodurile sistemelor energetice corespunzătoare.

Această configuraţie de conexiune electrică are sens în cazurile care există probleme cu transferul de putere activă în reţea cu grad ridicat de

neomogenitate, fapt ce conduce la „blocajul” unor ramuri ale acesteia şi necesitatea de redistribuire forţată a fluxurilor de putere.

Această soluţie poate fi pusă în aplicare atât pentru liniile obişnuite cu dublu circuit, cât şi pentru LEDA, inclusiv şi în cazul special de funcţionare paralelă a două linii ***compacte***. În acest caz presupunem că parametrii respectivi ai liniei compacte corespund parametrilor LEDA din aceiaşi clasă de tensiune. Principala diferenţă a acestor linii de LEDA este lipsa conexiunii reciproc reglabile (electromagnetice) dintre circuite.

În experimentele de calcul se considera că parametrii corespunzători ai liniilor compacte corespund parametrilor LEDA cu aceiaşi clasă de tensiune. Principala diferenţă a acestor linii de LEDA constă în lipsa cuplării reciproc dirijate (reglate) dintre circuite.

Să demonstrăm, că varianta IPC cu conectare paralelă a liniilor compacte de o clasă de tensiune, poate asigura o reglare profundă a puterii active transmise între sisteme energetice. Parametrii liniilor compacte îi considerăm egali cu parametrii LEDA-220 kV care funcţionează în regim de racordare în contrafază a circuitelor. Rezistenţa echivalentă a transformatorului de reglare a decalajului de fază este egală cu $X_{ФРТ} = 25Om$.

Principalii parametri verificaţi la reglarea unghiului defazajului ψ în intervalul indicat de $\pm 30^{\circ}$ sunt prezentaţi în Tabelul 2.

Graficele din fig.8 şi fig.9 corespund condiţiilor de calcul specificate şi s-au obţinut cu luarea în consideraţie a instalării reactorului de şuntare dirijat pe şinele tensiunii de ieşire a IPC.

Din examinarea graficelor (fig.8) se arată că în procesul reglării unghiului ψ în intervalul de $\pm 30^{\circ}$, valoarea puterii active P_{IPC} rămâne practic neschimbată (aproximativ 200 MW). Această valoare a puterii active considerăm fiind de bază pentru varianta combinată a IPC examinate cu racordare paralelă a liniei obişnuite.

Tabelul 2

Rezultatele de calcul pentru cazul IPC nedirijate cu conectare paralelă a liniei din aceiaşi clasă de tensiune

ψ	-30	-20	-10	0	10	20	30
$P_{ФРТ} + jQ_{ФРТ}$	-205-j36	-122-j32	-35-j34	54-j45	144-j65	232-j96	319-j135
$P_{IPC} + jQ_{IPC}$	187+j158	196+j136	202+j122	204+j115	204+j117	201+j128	194+j147
$P_{\Sigma} + jQ_{\Sigma}$	-18+j122	74+j104	167+j88	258+j70	347+j52	433+j33	514+j12
$Q_{ш}$	-j70	-j69	-j78	-j98	-j126	-j164	-j207
Q_{r}	j58	j39	j19	-j3	-j25	-j47	-j69

Respectiv, puterea activă ce trece prin transformatorul de reglare a defazajului $(P_{ФРТ})$ se schimbă de la 205 MW până la 319 MW. În acest caz, puterea activă rezultativă (P_{Σ}) a două linii ce funcţionează paralel, variază în limita de la 18 MW până la 514 MW.

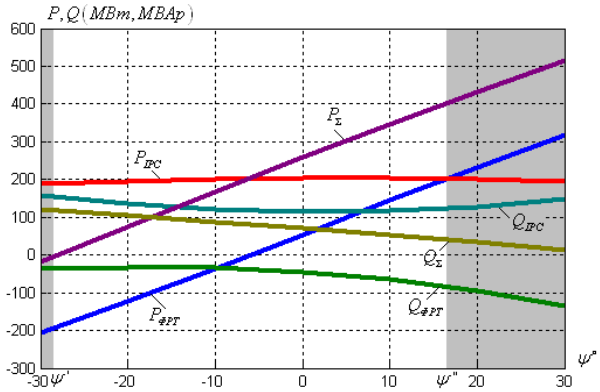


Fig.8. Caracteristicile energetice a IPC cu conectare paralelă a TDF

Curba $Q_{ФРТ}$ caracterizează puterea reactivă la capătul liniei de recepţie ce conţine TDF. Curba Q_{IPC} caracterizează puterea reactivă de la sfârşitul liniei dotate cu IPC. Curba Q_{Σ} caracterizează fluxul total al puterii reactive de pe şinele substaţiei de primire.

Fig.9 caracterizează echilibrul puterilor reactive pe şinele tensiunii U_r.

Curba Q_r caracterizează puterea reactivă la ieşirea din IPC.

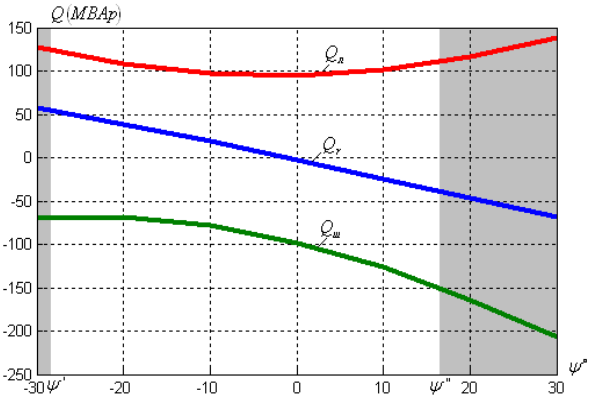


Fig.9. Bilanţul puterilor reactive pe şinele tensiunii de iesire

Curba Q_L caracterizează puterea reactivă de la începutul liniei dotate cu IPC.

Curba $Q_ш$ caracterizează puterea reactivă generată de reactorul de compensare transversală dirijat.

Limitând intervalul de variere a puterii active cu valorile $P_\Sigma = 0MW$ şi $P_\Sigma = 400MW$, stabilim diapazonul de reglare a unghiului ψ necesar.

Valoarea aproximativă a acestui interval este între $\psi' \approx -28^\circ$ şi $\psi'' \approx 17^\circ$.

Astfel, dirijarea completă şi absolută a conexiunii electrice examinate se asigură la un interval suficient de mic de reglare al unghiului defazajului (ψ). Valoarea decalajului de fază (împreună cu puterea de trecere care în acest caz este de 200 MW) determină puterea estimată a TDF. În special, când $\psi = \pm 30^\circ$ puterea estimată a TDF cu executare constructivă din două transformatoare, care a fost aprobată pentru reţelele de înaltă tensiune, este egală cu puterea tranzitată. Eficacitatea variantei combinate examinate constă în faptul că prin TDF calculat la puterea tranzitată de 200 MW, se poate dirija cu regimul transportului combinat de energie electrică în diapazon de la 0 MW până 400 MW.

Varianta analizată a IPC cu conexiune paralelă a TDF este destul de competitivă în comparaţie cu LEDA-220 kV cu defazaj reglabil dintre tensiunile trifazate ale reţelelor în intervalul de la 0° până la 180°.

Concluzii

Atenţia principală este acordată opţiunii de modelare a variantelor de realizare a conexiunii electrice dintre şinele de 330 kV a substaţiei Bălţi din cadrul sistemului energetic al Moldovei cu substaţia Suceava-400 kV a sistemului energetic al României bazate pe IPC, ce asigură localizarea proceselor oscilatorii în sistemele energetice adiacente, menţinând în acelaşi timp un anumit nivel al schimbului de putere activă între ele.

În prezenta lucrare este dată o imagine de ansamblu a tehnologiei IPC.

S-a propus realizarea unei instalaţii de conversie a decalajului de fază a tensiunilor de alimentare în schemă de hexagon, fapt ce permite reducerea puterii lui calculate de $\sqrt{3}$ ori.

S-a propus o soluţie tehnică originală care vizează îmbunătăţirea gestionării cu schimbul de putere activă între sistemele energetice.

Rezultatele lucrării efectuate pot fi luate în consideraţie la selectarea parametrilor joncţiunii electrice Bălţi-Suceava şi proiectarea mijloacelor de dirijare cu regimurile de funcţionare.

Bibliografie

1. J.Brochu, P.Pelletier, F.Beauregard, G.Morin, “The Interphase Power Controller, A New Concept for Managing Power Flow Within AC Networks”, Paper No.93 SM 435-8 PWRD, IEEE/PES 1993 Summer Meeting, Vancouver,BC.
2. K.Habashi, J.Lombard, SMourad, F.Beauregard, G.Morin, P.Pelletier, J.Brochu “The Design of a200MW Interphase Power Controller Prototype”, IEEE Transactions PWRD, Vol.9, No.2, April 1994
3. G.Sybille, Y.Haj-Maharsi, F.Beauregard, G.Morin, P.Pelletier, J.Lemay, J.Brochu “Simulator Demonstration of the Interphase Power Controller Technology”, IEEE Transactions PWRD, Vol.11, No.4, Octoberl 1996

Date despre autori:

Dmitrii Zaitev was born on 10.04.1963. Graduated Technical University of Kishinev (Moldova) in 1985, Ph.D at the Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova in 2000. Mr. Zaitcev’s researches are about regimes of power systems with FACTS.

Mihai Tirsu. Was born on February, 27th, 1972. Graduated Technical University of Moldova in 1994. Dr. Tirsu has got education of the engineer in the field of automatization and management of technical systems. In 2003 has defined the thesis for a doctor's degree on the specialty «Power plants (electric part), electric networks, energy systems and their management». Mr. Tirsu is the head of the “Electrophysics and Technics of High Voltage” Laboratory since 2004. The main researches are in the areas of transport lines management and control, diagnostics of the high-voltage equipment, power electronics etc.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА СЕЛЬСКОЙ ВОЗДУШНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,38/0,22 КВ

Ю. Ф. Свергун, А. А. Мирошник
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенка (ХНТУСХ)

Аннотация. Предложен метод составления схем сетей для расчета несимметричных режимов воздушных электрических сетей 0,38/0,22 кВ и их моделирование с помощью программного продукта Electronic Workbench.
Ключевые слова: качество электрической энергии, несимметричный режим, однофазные потребители, потери электрической энергии.

Modelarea regimului asimetric al retelei aeriene electrice satesti 0,38/0,22 KV
Universitatea Națională Agrară din Harcov, Piotr Vasilenco
U. Svergun, A. Miroşnik
Rezumat: Este propusă metoda compunerii schemelor rețelelor petnru calculul regimurilor asimetrice ale rețeleor electrice aeriene, 38/0,22 kV si modelarea lor cu ajutorului produsului software Electronic Workbench.
Cuvinte-cheie: calitatea energiei electrice, regimul asimetric, consumatori monofazate pierderi de energie electrica.

DESIGN of ASYMMETRICAL MODE of RURAL AIR ELECTRIC NETWORK 0,38/0,22 KV
Kharkov National Technical University of Agriculture Petr Vasylenko (KNTUA)
U. Svergun, A. Miroshnyk
Abstract: method of networks schemes design is proposed for the calculation of the asymmetrical modes of air electric networks 0,38/0,22 kV and their design with the help of Electronic Workbench software.
Keywords: electric energy quality, asymmetrical mode, monophase users, losses of electric energy.

Эффективность использования электрической энергии определяется в основном созданием таких условий её потребления, при которых обеспечивается требуемое качество электрической энергии и минимум потерь. Актуальность проблемы улучшения качества и уменьшения потерь электрической энергии особенно возрастает в сельских электрических сетях напряжением 0,38/22 кВ.

Одним из способов достижения поставленной цели является соблюдение требований ГОСТ 13109-97, который регламентирует нормы качества электрической энергии [1]. К одним из основных показателей качества электрической энергии в сетях 0,38/0,22 кВ относят величину отклонения напряжения от номинального (U = ± 5 %) и значения коэффициентов несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательностей, которые не должны превышать 2 % [1].

Качество электрической энергии у потребителей, наряду с надёжностью электроснабжения, является одним из основных показателей режима работы сети. Низкое качество электрической энергии оказывает существенное влияние на технико-экономические характеристики элементов сети и электроприёмников. При ухудшении качества напряжения, происходит снижение эксплуатационной надёжности электродвигателей, возникает ряд отрицательных электромагнитных явлений в сетях, увеличиваются дополнительные потери электрической энергии, обусловленные несимметрией токов.

Однако, для правильной оценки эффективности использования энергии необходим более глубокий анализ режимов работы сельских сетей 0,38/0,22 кВ, а также разработка совершенных методов расчёта показателей качества электрической энергии.

Многочисленные исследования, посвященные анализу режимов работы сельских сетей напряжением до 0,38/22 кВ [2], показали, что несимметрия токов обусловлена работой коммунально-бытовой нагрузки, основную часть которой составляют

неравномерно распределённые по фазам однофазные электроприёмники, имеющие случайный характер включения.

Линию 0,38/0,22 кВ с равномерно распределенными по фазам однофазными потребителями различной мощности (рис. 1) можно рассматривать как линию с несколькими распределенными симметричными трехфазными приемниками, образованными тремя группами однофазных приемников различной мощности, соединенных "звездой", нулевая точка которых присоединена к нулевому проводу.

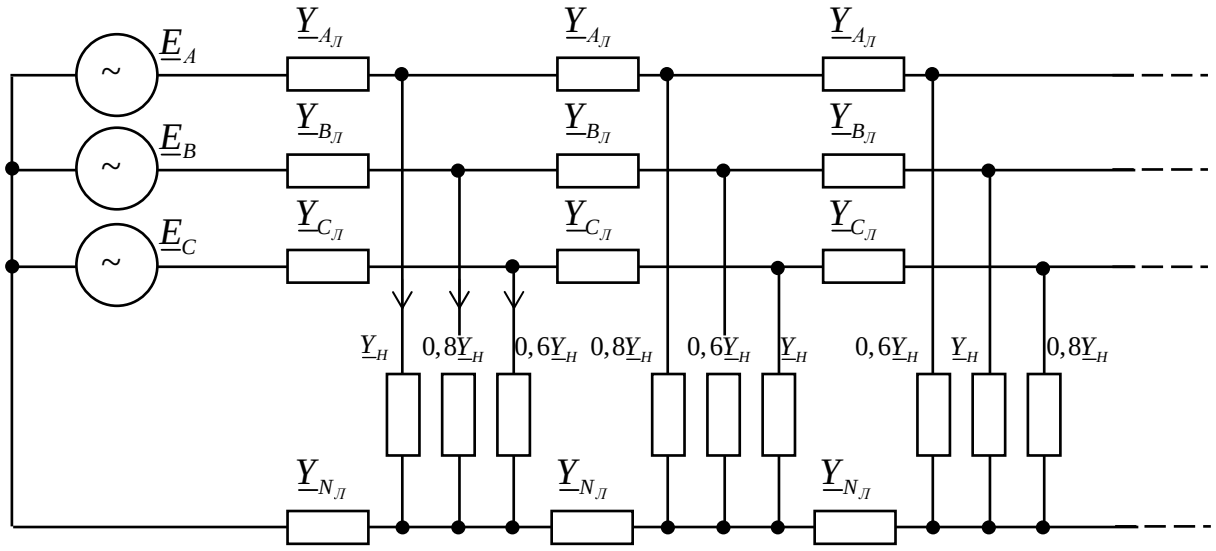


Рис. 1. Линия с равномерно распределенными по фазам однофазными потребителями различной мощности

Любой несимметричный трехфазный приемник можно заменить эквивалентным симметричным трехфазным приемником и двумя разными по мощности однофазными потребителями, которые включены на фазные напряжения. Условием эквивалентности такой замены является равенство напряжений и токов на зажимах потребителей, а для эквивалентных схем несимметричных трехфазных потребителей и равенство комплексов пульсирующих мощностей [3]. В общем случае несимметричной трехфазной системы фазных напряжений $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ на зажимах несимметричного приемника будем иметь следующие выражения для фазных токов [4]:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A \underline{Y}_{HA}, \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B \underline{Y}_{HB}, \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C \underline{Y}_{HC}, \tag{1}$$

где $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – фазные напряжения;

$\underline{Y}_{HA}$, $\underline{Y}_{HB}$, $\underline{Y}_{HC}$ – проводимости фазных проводов.

Заменим каждую группу из трех однофазных потребителей, присоединенных к фазным и нулевому проводу линии 0,38/0,22 кВ и расположенных на одном расстоянии от источника ЭДС, симметричными потребителем и двумя однофазными потребителями различной проводимости, присоединенными к двум наиболее нагруженным фазам линии в одной точке с выделенными трехфазными симметричными потребителями. Тогда будем иметь схему, представленную на рис. 2.

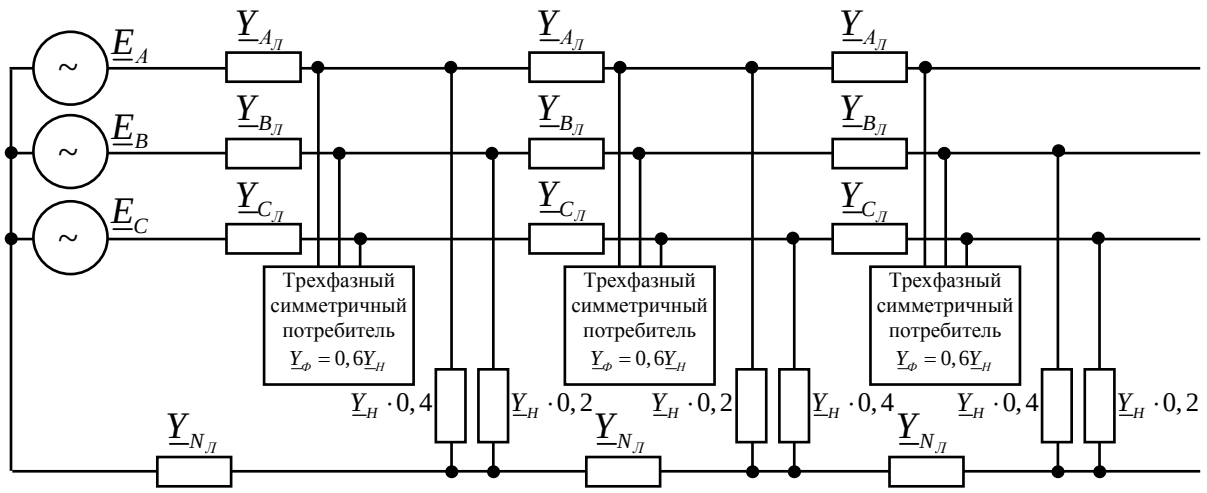


Рис. 2. Схема линии с выделенными симметричными трехфазными приемниками и разными по мощности однофазными потребителями

Если пренебрегать проводимостями фазных проводов ($\underline{Y}_{A_Л} = 83\,См$) и заменить три трехфазных симметричных потребителя с проводимостями $\underline{Y}_Ф = 0,6\underline{Y}_Н$ одним симметричным потребителем с проводимостями каждой фазы, равными $1{,}8Y_н$, то получаем схему, которая имеет вид, приведенный на рис. 3.

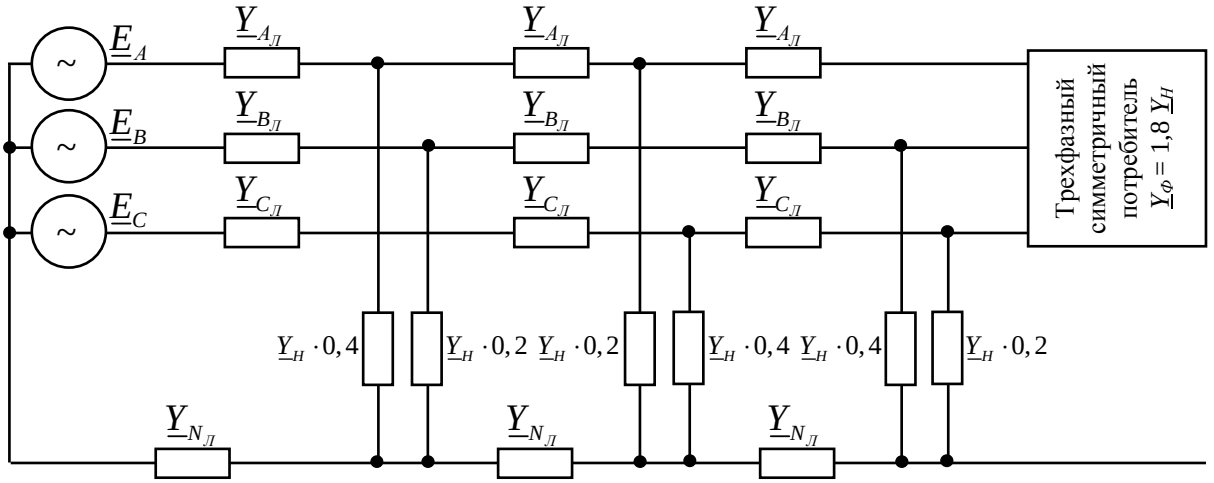


Рис. 3. Замена трех трехфазных симметричных потребителей одним симметричным потребителем с проводимостями каждой фазы, равными $1{,}8Y_н$

В полученной схеме так же можно выделить еще один симметричный трехфазный потребитель и получить схему (рис. 4) с распространенными вдоль линии однофазными потребителями, которые и будут определять уравнительный ток на участках нулевого провода.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ КАК МЕХАНИЗМ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ДИСПРОПОРЦИЙ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Л.Ю. ХМЕЛЬНИЦКИЙ
Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова

Аннотация. В статье описаны основные группы рисков, характерные, на современном этапе, для мировой экономики. Приведены основные проблемы развития мировой энергетики и взгляд на возобновляемые источники энергии, как один из механизмов механизм для решения данных проблем. Сформулированы требования, применяемые к мерам государственной поддержки развития использования возобновляемых источников энергии.
Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, меры государственного регулирования ВИЭ, система «зеленых сертификатов», тарифное регулирование ВИЭ.

UTILIZAREA SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE CA MECANIZM PENTRU DEPĂŞIREA DIVERGENȚELOR MACROECONOMICE

L.Y. HMELNI CHII
Universitatea Economică din Rusia G.V. Plehanov

Rezumat. În articol sunt desrise principalele grupe de risc, care sunt caracteristice la etapa actuală pentru economia mondială. Sunt prezentate problemele principale ale dezvoltării economiei mondiale şi opinia privitor la sursele regenerabile de energie (SRE) ca mechanism pentru rezolvarea problemelor in economie mondială. Sunt formulate cerințele fată de măsurile de suport al statului pentru dezvoltarea utilizării SRE.
Cuvinte–cheie: sursele regenerabile de energie, scheme de suport guvernamental ale SRE, certificate verzi.

THE USE OF THE RENEWABLE ENERGY SOURCES – AS THE WAY TO GET OVER MACROECONOMIC IMBALANCES

L.Y. KHMELNITSKY
Plekhanov Russian University of Economics

Abstract. The article describes major groups of current macroeconomic risks. Major challenges of modern world energy development are described and the spotlight on renewable energy sources as one of mechanisms of the described problems solution. Major requirements applied to government support schemes for renewable energy development are stated as well.
Keywords: renewable energy sources, government support schemes for renewable energy sources, green certificates, feed-in-tarrif.

Развитие мировой экономики на современном этапе характеризуется все возрастающим уровнем взаимосвязи и взаимозависимости национальных экономик отдельных государств, а также взаимным влиянием на экономическое и социальное развитие друг друга. В начале нового десятилетия мир оказался на пороге новых шоковых потрясений. Несмотря на то, что с началом выхода мировой экономики из глобального финансового кризиса, экономическое напряжение слегка спало, вероятность возникновения серьезных геополитических противоречий все больше возрастает, а растущие социальные опасения связаны с тем, что государства и общество в целом не готовы на современном этапе противостоять глобальным проблемам мировой экономики.

На сегодняшний день наиболее существенными и острыми, учитывая их влияние на мировую экономику, являются три группы рисков: риски связанные с макроэкономическим дисбалансом, теневой экономикой и ограниченностью ресурсов (на первом плане: вода, продукты питания, энергия) [1, 2].

Группа рисков связанная с макроэкономическим дисбалансом, кризисом денежно-кредитной системы, резким обесценением активов порождается растущими противоречиями между богатеющими и все более влиятельными развивающимися

странами и развитыми экономиками с высоким уровнем долговой нагрузки. Диспропорции в уровнях сбережения и потребления как внутри, так и среди национальных экономик, наряду с необеспеченность финансовых и экономических обязательств, создают огромное давление на фискальную систему в долгосрочной перспективе. Единственным решением данных диспропорций может стать проработанная экономическая программа, координируемая на глобальном уровне, однако, пока это едва достижимо с учетом конфликта интересов разных государств.

Другая группа рисков связана с развитием теневой экономики, наряду с ненадежностью государственного регулирования, контрабандной торговлей, организованной преступностью и коррупцией. Провалы в государственном регулировании социально-экономической жизни общества наряду с неравномерностью экономического развития создают благоприятные условия для процветания теневого бизнеса. В 2009 году совокупный оборот одной только контрабандной торговли по всему миру оценивается в 950 миллиардов евро и продолжает расти. Такие риски, наряду с созданием высокозатратных механизмов осуществления экономических операций, ослабляют государства, уводят в тень возможности и перспективы для развития, разрушают авторитет законодательства и подвергают страны сильному влиянию цикличности экономического развития с огромным потенциалом для развития бедности и нестабильности. Международная и всеобъемлющая кооперация в мировой экономике, как со стороны спроса, так и со стороны предложения – необходимы как воздух [3-6].

Третья группа наиболее существенных рисков связана с, растущим высокими темпами, мировым населением и возрастающим уровнем благосостояния, что создает огромное давление на ограниченные ресурсы. В предстоящие 20 лет спрос на воду, еду и энергию увеличится в среднем на 30-50% [7, 8], что, помимо прочего, усугубляется приоритетностью преодоления краткосрочных задач, над долгосрочными и глобальными проблемами. Ограниченность этих трех базовых групп ресурсов может в будущем привести к социальной и политической нестабильности, геополитическим конфликтам и непоправимому негативному воздействию на окружающую среду и климат. Таким образом, одной из отраслей, к развитию которой в ближайшие десятилетия должно быть приковано особое внимание – это энергетика. Энергетика - важнейшая отрасль жизнеобеспечения, которая развивается очень быстрыми темпами. Однако, если численность населения в условиях современного демографического взрыва удваивается за каждые 40-50 лет, то удвоение производства и потребления энергии происходит через каждые 12-15 лет [9].

В последнее десятилетие в развитии мировой энергетики проявились весьма важные тенденции, без обращения пристального внимания на которые, устойчивое развитие данной отрасли и всей мировой экономики оказывается под угрозой [10,11]:

- ✓ усиление взаимозависимости между производителями, транзитерами и потребителями наряду с усилением конкуренции за ограниченные энергоресурсы;
- ✓ высокие темпы роста энергопотребления;
- ✓ изменение региональных пропорций энергопотребления;
- ✓ растущие доля и объем потребления органического топлива;
- ✓ замедление темпов роста предложения энергии;
- ✓ недостаточный объем инвестирования, ведущего к интенсивному развитию энергетического сектора;
- ✓ изменение структуры предложения энергоресурсов и повышение роли отдельных поставщиков;
- ✓ значительный рост цен на энергоносители;
- ✓ нарастающая напряженность в обеспечении энергетических нужд транспорта и

диспропорции в нефтепереработке;

✓ рост объемов международной торговли энергоносителями, развитие инфраструктурной составляющей поставок энергоресурсов и обострение связанных с этим экономических и экологических рисков;

✓ усиление политических рисков, в том числе транзитных.

На сегодняшний день самый главный вопрос заключается в том, удастся ли переломить тенденцию опережающего роста энергопотребления за счет снижения энергоемкости мировой экономики, в первую очередь в развивающихся странах.

Современная ситуация в мировой энергетике характеризуется обострением противоречий между основными участниками рынка. Практика взаимоотношений между производителями, транзитерами и потребителями энергоресурсов, сложившаяся в последней четверти XX века, уходит в прошлое. Все хуже работают существующие механизмы регулирования мирового энергетического рынка, все очевиднее становится обострение конкуренции между потребителями, подогреваемое появлением на рынке таких мощных стран, как Китай и Индия.

В то время как главными потребителями энергоресурсов являются высокоразвитые державы и развивающиеся страны Азии, основная доля мировых запасов углеводородов сконцентрирована в сравнительно небольшой группе развивающихся стран и стран с переходной экономикой. Такие крупные потребители, как США, Евросоюз и Китай сосредотачивают как экономические, так и политические ресурсы для экспансии на одни и те же рынки, что приводит к росту конкуренции.

В ответ меняется политика стран-производителей в отношении доступа к национальным запасам углеводородов, а также стратегии национальных государственных компаний, контролирующих основные мировые углеводородные ресурсы.

Госкомпании, располагающие масштабными запасами, стремятся развивать переработку и участвовать в капитале транспортных и сбытовых структур. В свою очередь, транснациональные корпорации, под контролем которых находятся перерабатывающие мощности, транспортно-логистические схемы и дистрибуция углеводородов, проводят стратегию наращивания своей ресурсной базы. Данное противоречие все более усугубляется и в ближайшее десятилетие будет одной из тенденций, определяющих развитие мировой энергетики [12-15].

Усиление противоречий между потребителями и производителями углеводородов происходит на фоне высоких темпов роста потребления энергии в мировой экономике, невзирая на высокие цены энергоносителей.

При оценке тенденций и перспектив развития мирового энергетического рынка, преобладает подход, связанный с преимущественным развитием энергетики углеводородного сырья. А согласно прогнозам Департамента энергетики США, после 2020 г. уголь вообще станет наиболее быстро растущим топливом для электростанций, значительно обгоняя газ [16, 17]. Однако если вдуматься в такую оценку перспектив развития энергетики, возникает вопрос: за счет чего будет функционировать растущая мировая экономика, если уже после 2010 г.г. прогнозируется резкое падение темпов прироста мощностей в энергетике. Развитием ситуации может стать либо всемирный экономический кризис, основанный на резком снижении мощностей энергетики и росте цен на энергоресурсы, либо постепенная стабилизация за счет возрастающей доли мощностей альтернативных источников энергии.

Известно немало примеров, когда государства принимают меры, отодвигающие фактор общих затрат на выработку и приобретение энергоресурсов на второй план ради достижения целей экологичности, малой энергоемкости или собственной энергонезависимости.

Наиболее ярким примером может служить опыт Европейского союза в области развития отрасли альтернативной энергетики.

На заседании, проходившем 8-9 марта 2007 года в Брюсселе, Европейский Совет постановил, что для Евросоюза является обязательным условием довести долю возобновляемых источников энергии к 2020 году в потребляемой Евросоюзом энергии до 20%, из которых - это минимальная обязательная цель для всех стран-членов ЕС - 10% должно производиться с использованием биотоплива в отношении ко всему потребляемому транспортом бензину и дизельному топливу. 17 декабря 2008 года Европейский Парламент поддержал Пакет Изменений к программе «Климат ЕС», который фактически гарантирует, что в ЕС произойдут климатические изменения к 2020 году: снижение выбросов парниковых газов на 20%, повышение эффективности использования энергии на 20% и еще 20% доли отводится возобновляемым источникам энергии в смешанной энергетике ЕС [18].

В общих чертах, спрос на всю энергетику равномерно поделен на 4 сектора: (промышленность, транспорт, производство тепловой энергии и электроэнергика), с долей каждого в 25%. Если предположить, что эффективность использования энергии действительно улучшится на 20%, у промышленности и производства тепла будет по 20% возобновляемых источников, тогда сектор электроэнергетики должен будет компенсировать сниженную часть в транспортном секторе. Предполагается, что для достижения цели к 2020 году от 35 до 40% всей электроэнергии (3,200 -3,500 ТВт-ч) должно поступать от источников возобновляемой энергии [19].

Однако, очевидно, что достижение амбициозных целей, поставленных перед правительствами стран ЕС, невозможно без хорошо продуманной и тщательно проработанной системы мер государственной поддержки.

Так, еще в 2001 году, в результате принятия Европейским Парламентом Директивы 2001/77/ЕС, страны-члены разработали комплекс мер для стимулирования развития возобновляемой энергетики на национальном уровне. Основными вспомогательными финансовыми инструментами, которые применяются в различных формах, являются:

- ✓ льготные и премиальные тарифы;
- ✓ квотирование и нормативы;
- ✓ тендерные системы;
- ✓ финансовые и другие вспомогательные льготы, такие как - поддержка прямого производства, инвестиционные дотации, кредиты с низкой процентной ставкой и различные виды мер в области налогообложения.

Все меры, используемые в странах ЕС для стимулирования развития альтернативной энергетики можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Если косвенные меры нацелены на улучшение условий в долгосрочной перспективе, то задачей прямых мер является незамедлительный эффект. В рамках данной классификации меры также делятся на: обязательные и добровольные. Главной идеей последних является готовность потребителей платить больше за энергию, произведенную из возобновляемых источников. Другими важными критериями классификации является нацеленность применяемых мер на цену или количество, а так же поддержку инвестиций или непосредственного производства альтернативной энергии.

Исходя из опыта ЕС все меры, в рамках выбранных программ, должны максимально отвечать определенным критериям, а именно [20]:

- ✓ Долгосрочная перспектива и амбициозность - чтобы убедиться в высоком уровне заинтересованности и безопасности инвесторов;
- ✓ Стабильность и постоянство – политический инструмент должен оставаться активным достаточно долго для того, чтобы обеспечивать возможность и

привлекательность устойчивого, долгосрочного планирования. Изменения в политических мерах поддержки должны применяться только к новым проектам и должны быть объявлены заранее для того, чтобы дать проектам, которые находятся на стадии разработки, возможность надежного планирования, идеально отражающего наиболее характерное развитие проекта в период продолжительностью от одного года до четырех лет.

✓ Определенность в источниках финансировании. Источниками финансирования вспомогательных мер могут быть: либо государственный бюджет, либо надбавки, заложенные в тарифы на потребляемую энергию. У последних есть преимущество в том, что меры поддержки менее подвержены ограничениям в бюджете. К примеру, фонды премиальных тарифов в Голландии финансируются правительством, когда как в Германии льготные тарифы оплачиваются потребителями электроэнергии.

✓ Длительность поддержки. Длительность поддержки для отдельных проектов не должна быть неограниченной, и должна сводиться к срокам реализации проекта, чтобы избежать излишнего финансирования и стимулировать производителей к наиболее эффективному производству. Длительность поддержки также должна идеально отражать экономический период технологии, чтобы начать рефинансирование в более поздние сроки, которые значительно снижают затраты на финансирование.

Система государственной поддержки развития ВИЭ необходима на сегодняшний день для большинства видов ВИЭ, для того, чтобы они были в состоянии конкурировать с традиционными технологиями производства энергии с использованием ископаемых видов сырья, атомной энергии и крупномасштабных ГЭС.

Одним из основных инструментов поддержки развития производства энергии на основе ВИЭ является тарифное регулирование – комплекс обязательных мер, направленных на поддержание и увеличение производства энергии из возобновляемых источников. В рамках данного инструмента законодательно устанавливается цена за кВт/час, которую потребитель должен заплатить за потребляемую энергию, произведенную из возобновляемых источников. Стоит отметить, что такой тариф определяется для каждой технологии на длительный период времени (до 20 лет) исходя из специфики производства, чтобы учесть все затраты на производство возобновляемой энергии и гарантировать данному проекту прибыльность. В сочетании с гарантированным доступом к распределительным мощностям это ведет к минимизации инвестиционных рисков связанных с вложением денег в конкретный проект, поскольку инвестор выделяет деньги под установленную на длительный период цену реализации. А разница, между «завышенной» ценой на альтернативную энергию, произведенной с использованием данной технологии, и рыночной ценой на энергию, распределяется между всеми конечными потребителями энергии, что ввиду их большого числа ведет к незначительному увеличению (в Германии в среднем на 1,5 евро) ежемесячного счета за электричество [18]. Помимо всего прочего разрабатываемые для поддержки производства энергии на основе ВИЭ тарифы учитывают технологические особенности производства для того, чтобы предоставить относительно равные условия поддержки всем производителям и ликвидировать попытки производителей извлекать сверхприбыли за счет мер государственного стимулирования, финансируют которые либо государство, либо конечный потребитель. Так технологически особенные тарифы разрабатываются под конкретные технологии с целью поддержки их развития и внедрения, лишая тем самым недобросовестных производителей возможности получения сверх прибыли от использования других, более дешевых технологий. Также тарифы могут быть ступенчатыми, то есть разработанными в соответствии с условиями местоположения (например, средняя скорость ветра). Данные тарифы направлены на поддержку производителей ВЭ и обеспечение на начальных этапах необходимого для

нормального функционирования и адаптации производства. Данный вид тарифов исключает возможность получения сверх прибыли от проектов с более благоприятным местоположением. Таким образом, делается ставка на формирование рыночных, конкурентоспобоных механизмов производства возобновляемой энергии, а не выращивание целого сектора дотационных предприятий.

На практике, данный комплекс мер показал себя как наиболее эффективный, однако он не осуществим без соблюдения определенных условий [21]:

✓ обязательное предоставление доступа всех производителей энергии из ВИЭ к распределительным мощностям, а также приоритет потребления альтернативной энергии над традиционной. Другими словами, сначала должна потребляться альтернативная энергия, а лишь потом традиционная. Это ведет к сокращению объемов производства традиционной энергии, а, следовательно, и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а также дает инвесторам ВИЭ уверенность в том, что каждая единица произведенной альтернативной энергии будет продана.

✓ установление правильного фиксированного тарифа, который бы обеспечивал прибыльность технологии и достоверно отражал его затраты. Завышенный тариф приведет к неоправданным, чрезмерным прибылям, а заниженный – сведет на нет инвестиционную привлекательность.

✓ установление фиксированного тарифа на определенный период времени, что повышает инвестиционную привлекательность данных проектов. А ограниченность срока действия тарифа подталкивает производителей к инновациям, повышая тем самым общую эффективность производства альтернативной энергии.

Наиболее показательным в области применения данного комплекса мер для поддержки альтернативной энергетики является опыт Германии, правительство которой занялось разработкой законодательства в данной сфере еще в 1979 году. В 1990 году был представлен первый существенный законопроект Stromeinspeisungsgesetz (StrEg), призванный поддержать производителей электроэнергии на небольших ГЭС. В соответствии с данным законом производители возобновляемой энергии должны были получить неограниченный доступ распределительной системе, а предприятия коммунального хозяйства были обязаны выкупать данную энергию за 65-90% предполагаемой средней стоимости для конечного потребителя. Такая система тарификации обеспечила прибыльность проектов по производству ветряной энергии и в то же время оказалась неспособной поддержать производство альтернативной энергии с использованием энергии солнца. Также StrEg не обеспечивала выгодных тарифов для производства энергии при помощи таких источников, как биомасса. А резкое падение цен на электроэнергию в 1998 году, вызванное снижением государственного вмешательства в отрасль электроэнергетики в целом, свело преимущества данной системы, основанной на процентной зависимости цены альтернативной энергии от средней цены конечного потребления электроэнергии, на нет. В результате, StrEg был модифицирован в два этапа: принятием в апреле 1998 года Energy Supply Industry Act (ESIA) и Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) в 2001 году.

EEG по сути явился обновленной политикой правительства Германии в области ВИЭ. Существенными отличиями EEG от StrEg являлись дифференциация тарифа в зависимости от источника, размера и места производимой возобновляемой энергии, расширенный список подпадающих под регулирование технологий, а самое главное, процентное соотношение тарифных ставок было заменено фиксированными тарифами, период действия которых составлял 20 лет с начала эксплуатации каждой, подпадающей под регулирование технологии. Такие фиксированные ставки были основаны на научных исследованиях, что позволило обеспечить прибыльность самых современным технологиям. Например компенсация за производство электроэнергии с

использованием энергии солнца составляла 99 пфенниг за кВтч, что отражало высокий уровень затрат на производство данной энергии в тот период. Кроме того, EEG наделял регулирующие органы возможностью корректировать установленные тарифы каждые два года в соответствии с состоянием на рынке и уровнем развития технологического прогресса.

Поправки к EEG, принятые в 2004 году были нацелены на увеличение доли возобновляемой энергии в общем энергопотреблении до 12,5% к 2010 году и до 20% к 2020. Тарифные ставки в такой модификации EEG варьировались от 0,0539 евроцентов за кВт час ветряной энергии, до 0,5953 евроцентов за кВт час солнечной энергии. Помимо этого разрешалась ежегодная корректировка (уменьшение) тарифов (вместо одного раза в два года) в пределах от 1% до 6,5% в зависимости от технологии. Данные меры вводились с целью стимулирования развития технологий и сокращения издержек на производство в области альтернативной энергетики [20].

Разработка только одного EEG позволила Германии сократить выброс углекислого газа в атмосферу на 33 миллиона тонн. К 2007 году доля альтернативной энергии в общем энергопотреблении Германии преодолела рубеж в 12%, несмотря на то, что еще в 2005 году оставалась на уровне 10%. Лишь за четыре года существования EEG производство возобновляемой энергии выросло с 13,6 ТВт час до 34,9 ТВт час в результате девятикратного роста объемов производства солнечной энергии, двукратного увеличения ветряной и энергии производимой с использованием биомассы.

В 2008 году годовой оборот всей отрасли альтернативной энергетики Германии составил более 22 млрд. евро, а число занятых перевалило за 215 000 человек (больше чем число занятых в ядерной и угольной отраслях в целом). По оценкам многих специалистов, число занятых в области альтернативной энергетики в Германии достигнет 500 000 человек к 2020 году [22].

Другим, не менее важным и существенным элементом государственной поддержки развития ВИЭ в ЕС является система квотирования с использованием «зеленых сертификатов». Данная система, появилась впервые как инструмент учета и мониторинга производства и потребления электрической энергии на основе возобновляемых источников. Производители энергии на основе возобновляемых источников получают специальные «зеленые» сертификаты, подтверждающие, что они произвели и продали на рынке определенный объем возобновляемой или «зеленой» энергии. Выпускают такие сертификаты специальные органы. В каждой стране по правилам Международной ассоциации RECS (Renewable Energy Certificate System) может быть только один выпускающий орган. Количество выпускаемых сертификатов привязано к объему произведенной генераторами энергии. Обычно сертификаты кратны 1 МВт-часу. Однако движение сертификатов не привязано к движению энергии, на основании которой они выпускаются. Это дает возможность использовать сертификаты тем агентам, которые не производят энергию от ВИЭ, но покупают сертификаты для своих целей. Важно отметить, что они становятся предметом обращения на специальных рынках, получая свою рыночную цену.

Как уже было упомянуто раньше, 27 сентября 2001 года в ЕС была принята Директива 2001/77/ЕС по поддержке производства электроэнергии на основе возобновляемых источников. Этот документ ввел ряд обязательных требований для государств-членов. Одним из требований стал уровень производства и потребления возобновляемой энергии в странах – членах ЕС не ниже установленного, а также необходимость гарантирования государствами – членами ЕС происхождения электрической энергии от возобновляемых источников. Это означало, что все государства – члены ЕС должны были к указанному моменту иметь действующую

систему гарантирующих сертификатов электрической энергии от ВИЭ, так как именно наличие такой системы позволяет легитимизировать национальную систему учета производства и потребления возобновляемой энергии [18]. Стоит отметить, что Сертификаты возобновляемой энергии могут использоваться для подтверждения выполнения своих экологических или социальных обязательств не только государством, но и отдельными компаниями. Так, в рамках Директивы 2001/77/ЕС, государства-члены ЕС могут накладывать на потребителей и производителей энергии обязательства по производству или потреблению определенных объемов энергии из возобновляемых источников. В данном случае компании не имеют возможности выбора – обязательства, возлагаемые государством, не являются предметом обсуждения. Единственная альтернатива неисполнению обязательств – уплата штрафов, которые, в свою очередь, являются формой защиты покупателей от волюнтаризма продавцов или резкого увеличения цены сертификатов на свободном рынке. Покупатель может отказаться от покупки и гашения сертификатов возобновляемой энергии и предпочесть заплатить штраф, уровень которого будет ниже сложившейся цены сертификатов. Однако помимо обязательных систем подтверждения в странах ЕС существуют и добровольные, которые связаны с концепцией устойчивого развития и социальной ответственности бизнеса. Компании принимают на себя добровольные обязательства, которые будут характеризовать их как ответственных агентов той территории, на которой они ведут свою деятельность. Указанные обязательства должны иметь подтверждение, что отражается в специальных годовых отчетах по аналогии с годовыми корпоративными отчетами, готовящимися и выпускаемыми публичными компаниями, главным образом, для акционеров и инвесторов. Так же как годовые отчеты корпораций не принимаются без официального подтверждения аудиторами, так и отчеты в рамках социальной ответственности компаний имеют аналогичное подтверждение достоверности. Поэтому, несмотря на исходно добровольный характер принимаемых обязательств в рамках социальной ответственности, строгость оценки их выполнения – не ниже уровня проверки выполнения финансовых обязательств корпораций перед своими акционерами и инвесторами. Это связано с убеждением инвесторов в том, что компании, которые являются «хорошими» корпоративными гражданами на территории своего бизнеса, обладают повышенной устойчивостью по сравнению с теми, которые не уделяют этим вопросам достаточного внимания и средств. Таким образом, социальные обязательства конвертируются в рост стоимости капитализации принимающих их корпораций [23, 24].

Помимо всего прочего стоит отметить, что, хотя сами по себе зеленые сертификаты не являются формой поддержки генерации на основе ВИЭ, они часто являются элементом различных схем поддержки возобновляемых источников энергии или стоят с ними рядом. Государство выделяет производителям энергии на основе ВИЭ дотации, надбавки или оказывает другие виды финансовой помощи. Её размеры, как правило, привязываются к объемам произведенной или проданной энергии. А это, в свою очередь, должно быть подтверждено документально – гарантирующими или «зелеными» сертификатами. Важно понимать, что хотя сами по себе сертификаты не являются инструментом поддержки, без них трудно выстроить гармоничную систему, обеспечивающую справедливое перераспределение средств для компенсации повышенных расходов генераторов ВИЭ. При этом сертификаты могут быть документами, основанием для такой поддержки, либо, будучи предметом купли/продажи, служить источником выручки для генераторов возобновляемой энергии [3].

«Зеленые» сертификаты по существу являются носителями определенных прав на

возобновляемую энергию или самого главного ее «реквизита» – собственно возобновляемого характера произведенной энергии.

Премии, льготы и компенсации предоставляются как производителям, поставщикам и потребителям возобновляемой энергии в соответствии с объемом предъявленных ими «зеленых» сертификатов, так и производителям, поставщикам и потребителям любой другой энергии также в соответствии с объемом предъявленных ими «зеленых» сертификатов. Передача (переуступка) прав или реквизитов энергии, закрепляемых «зелеными» сертификатами, от субъектов рынка – генераторов возобновляемой энергии, субъектам рынка – генераторам любой другой энергии, лишает первых возможности публичного представления своей энергии как возобновляемой.

Заключение

Таким образом, резюмируя сказанное выше, стоит особо подчеркнуть, что, несмотря на намечающиеся тенденции по выходу мировой экономики из глобального финансового кризиса, вероятность возникновения серьезных геополитических противоречий и потрясений возрастает с каждым годом. А социальные опасения связаны с тем, что государства и общество в целом не готовы на современном этапе противостоять глобальным проблемам мировой экономики.

Продолжающийся экономический рост развивающихся азиатских стран, быстрое увеличение там численности населения и высокая энергоемкость экономик резко увеличивает потребности в энергоресурсах. Опережающими темпами увеличивается потребление энергии в Африке и Латинской Америке, а также и в странах Европейского Союза возобновился рост среднедушевого потребления.

Геологические запасы нефти и газа на планете при сохранении традиционных технологий и темпов энергопотребления могут быть исчерпаны к середине - концу XXI века. Величина стоимости органического топлива и производимой с его использованием электроэнергии будут непрерывно возрастать. Ни органическое топливо, ни гидроэнергетика не могут обеспечить решение проблемы долгосрочного устойчивого энергоснабжения.

Большинство стран мира уже пришло к выводу (отражённому в реальных правительственных программах), что альтернативная энергетика – единственный путь для долгосрочной энергетической стратегии. Ресурсы возобновляемых нетрадиционных источников энергии значительно превышают по потенциалу геологические запасы топлива на планете и в состоянии обеспечить долгосрочную перспективу развития энергетики при устойчивых тарифах и без вредного воздействия на окружающую среду.

Создание альтернативной энергетики – один из важнейших вопросов национальной и глобальной безопасности. Чем раньше начнётся полномасштабный переход на экономически выгодную и экологически безопасную альтернативную энергетику, тем меньше риск энергетического кризиса, тем меньше зависимость от внешнеэкономического диктата в отношении цен на оставшиеся топливные ресурсы и тем больше экономический выигрыш для страны.

Роль государства в развитии альтернативной энергетики в ЕС, да и во всем мире, переоценить очень сложно. Только при повсеместной поддержке государства осуществимы такие масштабные проекты как переход от производства и потребления традиционной энергии, получаемой на основе ископаемого сырья, к энергии, производимой на основе ВИЭ. Внедрение же проектов ВИЭ зависит как от мер государственного финансового стимулирования, так и от нефинансовых инструментов,

таких как обеспечение свободного доступа к внешним распределительным сетям и преодоление административных барьеров, а оценка влияния используемых технологий на климат, поддерживаемых в рамках государственной политики, и принятие соответствующих ограничений и мер влияют на долгосрочные перспективы развития ВИЭ.

Литература

1. Холмс Э. Риск-менеджмент. – М.: Эксмо, 2007. – 304 с.
2. Global risks 2011 (sixth edition) \\ World Economic Forum, January 2011.
3. Трунцевский Ю.В., Петросян О.Ш. Экономические и финансовые преступления – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 288 с.
4. Уколов В.Ф., Масс А.М., Быстряков И.К. Теория управления – М.: 2007. – 704 с.
5. Управление изменениями / Пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 227 с.
6. Хальцбаур У. и др. Event- менеджмент/ Пер. с нем. – М.: Эксмо, 2007. – 384 с.
7. Мировая энергетика: прогноз развития до 2020 г.: Пер. с англ. – М.: Энергия, 2000. – 255 с.
8. World Energy Outlook 2009 \\ International Energy Agency.
9. Экономика природопользования / Под ред. К.В. Папенова – М.: ТЕНИС, ТК Велби, 2006. – 928 с.
10. Перспективы развития альтернативной энергетики и ее воздействие на окружающую среду / В.В. Алексеев, Н.А. Рустамов, К.В. Чекарев, Л.А. Ковешников. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1999. с. 152.
11. Самойлов М.В. Основы энергосбережения. – 2000.
12. Гапоненко А.Л., Панкрухин А.П. Стратегическое управление – М.: ООО «Омега-Л», 2004.
13. Петухова С.В. Бизнес-планирование: как обосновать и реализовать бизнес-проект. – М.: Омега-Л, 2007. – 191 с.
14. Смирнов Э.А. Теория организации – М.: РИОР, 2007. – 143 с.
15. Экология и экономика природопользования / Под ред. Э.В. Гирусова – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 591 с.
16. Апполонов Ю.Е., Миклашевич И.В. О комплексном использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Энергетическое строительство, №1, 1994. С. 15-18.
17. Renewable energy: Market and policy trends in IEA countries \\ International Energy Agency.
18. The impact of renewable energy policy on economic growth and employment in European Union \\ EmployRES final report 2009.
19. Key world energy statistics 2009 \\ International Energy Agency.
20. Assessment and optimization of renewable energy support schemes in the European electricity market \\ OPTRES final report 2007.
21. Шерстюк В.Ю. Совершенствование оценки экономической эффективности чистых источников энергии в Республике Казахстан. – Алматы, 2001.
22. Харгадон Э. Управление инновациями. Опыт ведущих компаний/ Пер. с англ. – М.: «И.Д. Вильямс», 2007. – 304 с.
23. Алехина И. Морально-этические аспекты управления – М.: Дело, 2007. – 104 с.
24. Смирнов Г.Н. Этика деловых отношений – М.: ТК Велби, Проспект, 2008. – 184 с.

Сведения об авторе:

Хмельницкий Леонид Юрьевич, аспирант кафедры «Внешнеэкономической деятельности» Российского Экономического Университета им. Г.В. Плеханова. Сфера научных интересов: Возобновляемые источники энергии, методы государственной поддержки развития возобновляемых источников энергии, стратегические направления развития отрасли возобновляемых источников энергии.
E-mail: khmelnitsky@gmail.com

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОЛОГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА ИЗ РАПСОВОГО МАСЛА

Слюсаренко В.В., А.О. «АЛИМЕНТАРМАШ»

Аннотация. В работе приведен краткий обзор технологий и оборудования для производства биологического топлива из рапсового масла – биодизеля. Дано описание процессов как циклического (периодического) характера, так и процессов непрерывного производства. Обосновано применение того или иного процесса в зависимости от объёмов производства.

Ключевые слова: биодизель, рапсовое масло, дизельный двигатель, метиловый эфир рапсового масла, процесс переэтерификации, метоксид.

TEHNOLOGIE ŞI ECHIPAMENTUL PENTRU FABRICAREA DE BIODIESEL DIN ULEIU DIN RAPIȚĂ

Sliusarenco V.V.
SA „Alimentarmaş”

Rezumat. Lucrare oferă o scurtă prezentare de tehnologii şi echipamente pentru producerea de biocombustibil din ulei de rapiță - biodiesel. Este prezentată descrierea proceselor atât ciclice (periodice) cât şi procese de producție continuă. Este justificată aplicarea unui sau altui proces în funcție de volumul producției.

Cuvinte–cheie: biodiesel, ulei de rapiță, motor diesel, eter metilic, proces de transeterificare de ulei de rapiță, methoxid.

TEHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR BIOFUEL PRODUCTION FROM RAPESEED OIL

Slusarenko V.V.
SA „Alimentarmash”

Abstract. The paper gives a brief overview of technologies and equipment for the production of biofuel from rapeseed oil - biodiesel. It is presented the description of the processes both cyclical (periodic) nature and processes of continuous production. It is justified the use of the type of the process in dependence of production volume.

Keywords: biodiesel, rapeseed oil, diesel engine, methyl ester of rapeseed oil, transesterification process, methoxide.

Введение

В последнее время всё более широкое применение в качестве топлива для двигателей находят топлива, производимые из растительных масел [7, с.14]. Это объясняется простотой и экологичностью процесса получения растительных масел, их сравнительно невысокой стоимостью и приемлемой воспламеняемостью в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. Исследования по применению растительных масел и топлив на их основе проводятся крупнейшими двигателестроительными фирмами: Allis Chalmers, Caterpillar, Cummins, General Motors, John Deere, Harvester (США), Perkins, Ricardo (Англия), Mercedes-Benz, Daimler-Benz, Deutz, Volkswagen, MAN, Hatz Diesel, Henkel-hauzen, Porsche (Германия), Volvo (Швеция), Isuzu, Toyota, Komatsu (Япония) [7, с.162].

Проводятся исследования по адаптации дизельных двигателей к работе на растительных маслах (в основном на рапсовом масле), а также на эфирах этих масел, и в странах СНГ: МВТУ им.Н.Э.Баумана и МГАУ им. В.П.Горячкина, в Российском университете дружбы народов (РУДН), в ВИМе, в НПП «Агродизель», в Харьковском политехническом институте, в Клайпедском университете [7, с.162], в Государственном аграрном университете Молдовы [25].

Метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ) нашел широкое применение в качестве топлива для дизелей в различных странах Западной Европы [7, с163]. В

Германии такое топливо выпускается 12 централизованными заводами и 80 нецентрализованными. Производством этого вида топлива занимается большое количество немецких фирм, оно отпускается более чем на 800 заправочных станциях. Стоимость 1л биодизеля в настоящее время (на 01.01.2010г.) в среднем составляла 1,1 евро. Отпускаемое на АЗС в Германии биодизельное топливо, называемое «Bio-Diesel», представляет собою смесь 95% дизельного топлива и 5% МЭРМ. На состоявшейся в ноябре 2005 года в Магдебурге международной конференции представитель концерна Daimler Chrysler сообщил, что все автомобили, выпускаемые концерном, подготовлены к работе на топливах, содержащих 10% биодизеля [7, с.165].

Материалы и методы

Биодизель – это алкидные эфиры жирных кислот, получаемые обычно переэтерификацией природных масел и жиров низшими спиртами (метанолом, этанолом и др.) в присутствии катализаторов. Глицериды жирных кислот при нагревании с нейтральными метиловым или этиловым спиртами даже при кипячении почти не изменяются. Но если к жиру, нагретому примерно до +80°С, при хорошем перемешивании прилить двойной объем метилового спирта, в котором растворено немного едкого кали (примерно 0,9 н.раствор), то через несколько минут из образовавшегося раствора глицерин выделяется в виде отдельной фазы. Анализы показывают, что в спиртовом растворе над слоем глицерина оказываются метиловые эфиры жирных кислот исходного жира с небольшим количеством глицеридов. Результаты протекающей при этом реакции можно представить суммарным уравнением [18, с.229],[17, с.228]:

$$\begin{array}{l} CH_2\,OCOOR \\ | \\ CHOCOR + 3CH_3OH \rightleftarrows C_3H_5(OH) + 3RCOOCH_3 \\ | \\ CH_2\,OCOR \end{array} \qquad (1)$$

Как видно при этой реакции из глицеридов жирных кислот образуются метиловые эфиры. Такой обмен спиртов в сложных эфирах называют алкоголизом или, по названию применяемого спирта, метанолизом, этанолизом и т.д. В общем алкоголиз аналогичен гидролизу жиров. Различие заключается в том, что вместо воды действующим агентом является спирт.

Глубина алкоголиза глицеридов зависит от состава реагирующих эфиров и спирта.

В случае алкоголиза триглицеридов глубина его наибольшая при применении метилового спирта (достигает около 95%). С увеличением молекулярной массы действующего спирта глубина алкоголиза уменьшается, определяясь положением установившегося равновесия. Глубина алкоголиза, например, подсолнечного масла при применении этилового спирта равна 35,3%, а при использовании амилового спирта она составляет всего 11,5% [18, с.231]. Равновесие алкоголиза может быть сдвинуто изменением соотношения между количествами триглицеридов и спирта, или при выведении из зоны реакции одного из образующихся продуктов, например, глицерина. Таким образом, реакцию переэтерификации (метанолиза) рапсового масла можно изобразить следующим образом (рис.1).

Для переэтерификации природных триглицеридов жирных кислот с помощью низших спиртов используются различные технологические процессы,

подробно описанные в специальной литературе [1, с.29÷34],[14, с.8÷19], [7, с.232÷285],[30, с.105], [22, с.1429÷1436], [28],[29, с.536÷548] и др.

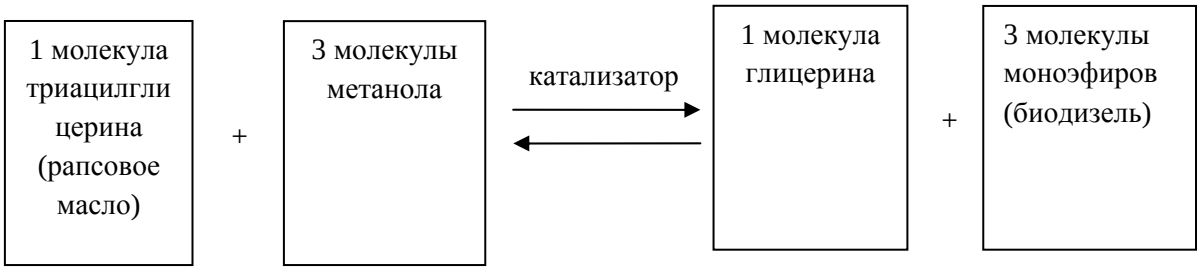


Рис.1. Реакции переэтерификации рапсового масла

Переэтерификация при атмосферном давлении осуществляется с 0,5÷1,0 молярным избытком спирта в присутствии щелочного катализатора при температуре от +25°С до +100°С. Такой катализируемый щелочами процесс переэтерификации при атмосферном давлении проходит без всяких проблем, если исходные масла или жиры свободны от воды и содержат меньше 0,5% (по массе) свободных жирных кислот (что соответствует кислотному числу равному единице) [16, с.11]. Жиры и масла, имеющие относительно высокое содержание свободных жирных кислот, могут быть переэтерифицированы под высоким давлением с 7-8 молярным избытком метанола в присутствии щелочного или металлического катализатора с образованием метиловых эфиров жирных кислот. Этот процесс проводится при температуре 240°С и давлении около 10,0 МПа [27]. Переэтерификация при атмосферном давлении, по сравнению с переэтерификацией под высоким давлением, требует значительно меньше метанола и энергии (благодаря более низким температурам прохождения реакции), а также не требует дорогостоящих реакторов, работающих под давлением.

Результаты

В технической литературе описан ряд процессов переэтерификации и установок для их производства. Sheehan J. и др.[27] описывают процесс переэтерификации и установку для соевого масла, примененные в США. На переэтерификацию подаётся рафинированное масло, очищенное от фосфолипидов и свободных жирных кислот. При этом используется двойной избыток метанола от стехиометрического количества, а в качестве катализатора – метоксид натрия, в количестве 10% от массы масла. Установка включает в себя двухстадийный реактор, на каждой из стадий 89% выход эфиров. В реакторах применяют температуры от +50°С до +120°С. Из 10455 кг триглицеридов, подаваемых в реакторы, получается 10397 кг метиловых эфиров. После отделения глицериновой фазы метиловые эфиры промываются водой для удаления остатков глицерина, метанола и других водорастворимых соединений в несколько этапов. После отстоя вода декантируется. Затем биодизель осушают и фильтруют.

Sheehan J. и др. [27] описывают также и ряд установок по производству биодизеля, которые вступили в действие в Европе после 1994 года. Например, технология фирмы Ballestra Sp.A. (в н.в. – Desmet Ballestra) включает три этапа, используется 2:1 стехиометрический избыток метанола. Реакторы работают под вакуумом при температуре ниже +50°С. В качестве побочного продукта получается сырой глицерин (80% -ый); биодизель получают из рапсового, подсолнечного и др. масел.

Institut Fracois de Petrol (IFP) предлагает процесс превращения рапсового масла в биодизель и сырой глицерин, используя мягкие реакционные условия: +50°C, атмосферное давление, метоксид натрия в качестве катализатора [27].

Фирмы Fina и De Smet предлагают технологические процессы производства биодизеля при высоких температурах и давлении [27]. .

Stern R. и ряд других исследователей из IFP [28] разработали процесс производства смеси эфиров жирных кислот, содержащую этиловые эфиры как основную часть, посредством переэтерификации масел и жиров, которые могут содержать свободные жирные кислоты. При этом используется кислотный катализатор, повышенное давление, температура +130° C, процесс проходит в три этапа, причём в третьем этапе переэтерификации используется уже щелочной катализатор.

Basu H. и Norris M. [21] предложили в 1996 году процесс производства эфиров, который значительно лучше прежде существовавших процессов. Они разработали одностадийный простой процесс производства биодизеля из различных масел и жиров, даже тех, что содержат высокие концентрации свободных жирных кислот, диглицеридов, моноглицеридов и примесей (фосфолипидов и полипептидов), в том числе и подкисленного мыла. Процесс представляет собой переэтерификацию триглицеридов, диглицеридов и моноглицеридов и одновременно этерификацию содержащихся в масле или жире свободных жирных кислот при помощи спирта с углеродной цепью C_1-C_5 (преимущественно безводный метанол или безводный этанол) в присутствии катализатора, представляющего собой смесь ацетата кальция и ацетата бария (3:1 по массе), нагревая реакционную смесь в автоклаве при температуре 200-250°C в течение трёх часов, затем быстро охладив до 63°C. В процессе используется 3-4 молярный избыток метанола или этанола, а концентрация катализатора составляет 0,5-1% от массы масла.

Ginosaur D. и Fox R. [24] в 1998 году предложили однофазный процесс производства биодизеля в критической жидкой среде, который включает этерификацию триглицеридов и этерификацию свободных жирных кислот при помощи спирта с цепью C_1-C_4.

Углеводные катализаторы также могут быть использованы для переработки отходов масложировой промышленности в биодизель. Min-Hua Zong из Южно-Китайского Университета Технологий [5] предлагает использовать углеводный катализатор для получения биодизельного топлива из отработанного растительного сырья.

Как видно из проведенного краткого обзора, основные технологии в развитых странах основаны на метанолизе триглицеридов рапсового масла с использованием различных катализаторов. В случае кислотного катализатора продолжительность реакции составляет порядка 1÷45 часов, а в случае основного – 1÷8 часов (в зависимости от температуры и давления, причем в начальный период реакция происходит медленно вследствие двухфазной природы системы метанол/масло и полярности участвующих соединений). Однако, присутствует вопрос удаления катализаторов и продуктов омыления после реакции, что имеет весьма важное значение для чистоты получаемого продукта. Японскими учеными Dadan Kusdiana и Shiro Saka разработана технология получения биотоплива без катализаторов [23], [26, с.563÷566], т.н. процесс переэтерификации рапсового масла метанолом в сверхкритических условиях. В качестве эталонных соединений (сложных эфиров) были получены эфиры стеариновой, олеиновой, линолевой и линоленовой кислот рапсового масла. При этой технологии используют большое количество алкоголя, в пропорции 42:1 к растительному маслу. В суперкритических условиях (температура 350 ÷ 400°C, давление 90 МПа) реакция происходит за 3…5 мин. [1, с.32]. [23], [26]. После реакции

необходимо быстрое охлаждение продуктов, полученных в результате ее проведения, во избежание их распада. Впервые данная технология была реализована в Японии.

В университете штата Айовы (США) разработан новый, менее трудоемкий способ получения нетоксичного биодизеля с использованием высокотехнологического катализатора [9]. Профессор университета Виктор Лин и группа ученых предложили использовать при получении биодизеля мельчайшие частицы – наносферы, диаметр которых составляет всего 250 миллиардных долей метра. Наносферы имеют пористую структуру, которая образована проходящими сквозь них каналами. Каналы могут быть заполнены катализатором, необходимым для производства биодизеля. Наносферы также могут иметь химические затворы, препятствующие проникновению масла в каналы, где происходит химическая реакция. В результате процесс получения биодизеля ускоряется, катализатор может быть использован повторно, кроме того из производственного процесса исключается этап промывки. Технология уже прошла успешные испытания в лаборатории, и теперь ученые планируют протестировать эффективность ее работы в потоковом режиме [9].

Рассмотренные процессы производства биодизеля можно классифицировать по признаку режима работы на работающие в циклическом режиме и работающие в непрерывном режиме. Эти признаки дают и название технологическим процессам или технологиям производства биодизеля: циклическая технология (ЦТ) и непрерывная технология (НТ). В свою очередь каждую из этих технологий можно подразделить на другие виды. Так, циклические (периодические) технологии можно подразделить на: технологии с использованием катализаторов, сверхкритические технологии, безкатализаторные технологии. Непрерывные технологии можно подразделить на: многореакторные технологии, промышленный процесс II -Ester fip H, критические технологии.

Наибольшее распространение получили циклическая (периодическая) технология с использованием катализаторов и непрерывная многореакторная. Первая в основном используется при относительно небольших объемах производства, для больших объемов производства предпочтительна вторая [1, с.34].В Европе (Германия) циклическая технология производства биодизеля из рапсового масла разработана компанией RMEnergy, которая получила на неё в 2001 году патент за №10135297A1[60]. В сентябре 2004 года на основе имеющегося договора между компаниями RMEnergy и IBG Montors Oekotec GmbH&CO.CG производство RME установок было передано последней.

В Украине, России и Белоруссии торговым представителем фирмы IBG Montors Oekotec GmbH&CO.CG является фирма «Anatoli Juschin GDH» - сбыт и экспорт оборудования для производства биодизеля. Кроме представительств европейских компаний в Украине производством и продажей оборудования для производства биодизеля занимаются вновь созданные компании: «Биодизель-Запорожье» [3], «Биодизель-Днепр» [2], «Элерон» [20], «Укргазбиодизель» [19], «Биодизель-Крым»[4], «ЕвроТехБиодизель» [8], группа компаний «Текмаш» [6], ООО «Завод «Укрбудмаш» [11], ООО НПП «Тренд» [12], «Специальные технологии» [15], в России – ООО «Гелиос» (Москва) [10] и другие. Основное оборудование для производства биодизеля приобретается или производится по лицензиям зарубежных компаний.

Промышленная технология производства биодизеля по традиционной схеме на основе реакции переэтерификации разработана в Белоруссии научно-производственным предприятием «Унихимпром» при Белорусском Государственном Университете.

В США оборудование для производства биодизеля выпускают в основном крупные компании, входящие в Национальную ассоциацию производителей и потребителей

биодизеля и оборудования для его производства (National Biodiesel Board). Ассоциация способствует продвижению биодизеля на рынок топлив, пропагандируя его производство и использование. Производство биодизеля осуществляется по традиционной технологии, так как существует жесткая регламентация технологического процесса и физико-механических свойств продукта.

Выводы.

В настоящее время в мире в основном используют традиционные подходы получения биодизеля методом реакции переэтерификации из растительных масел. Использование биодизеля в качестве моторного топлива осуществляется путем добавления его в минеральное дизельное топливо (20%) или используется оно в чистом виде, но в этом случае необходимы конструктивные изменения системы топливоподачи, впрыска и сжигания топлива в двигателях.

Крупные компании и исследовательские центры постоянно совершенствуют существующие и разрабатывают новые технологии производства биотоплив из биомассы. Одним из перспективных направлений разработки новых методов получения биологического топлива признаётся применение различных физико-химических эффектов , а также производство биодизеля из микроводорослей.

Доля биодизеля на рынке товарных топлив составляет около 2%, ЕС-25 планировал к 2010 году удовлетворить свои потребности в топливе за счёт биотоплива на 5,75% [13].

Из этого следует, что рынок сбыта биотоплива, технологий и оборудования для его производства активно развивается и имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными ресурсами.

Литература

1. Аблаев А.Р. и др. Производство и применение биодизеля. Справочное пособие..М, АПК и ПРО, 2006 г., 80 с.
2. «Биодизель-Днепрь». Сайт фирмы. http://biodiesel.dn.ua/index.html.
3. «Биодизель-Запорожье». Сайт фирмы. http://www/biodiesel-zp.narod.ru/diesel.html
4. «Биодизель –Крым». Сайт фирмы. http://biodiesel.crimea.ua/oil-expeler.shtml
5. Будущее биодизельного топлива .http://oilworld.ru/news.php?wiem = 25423.
6. Группа компаний «Текмаш». Сайт фирмы. http://www.tekmash.ua
7. Девянин С.Н., Марков В.А., Семёнов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. Харьков, Новое слово, 2007 год, 452 с.
8. «Евротехбиодизель».Сайт фирмы. www.evrotechbiodiesel.com.ua
9. Нано-революция в биодизельной продукции! http://subscribe.ru/archive/tech.auto.newssale/200707/05184359.html
10 . ООО «Гелиос», Москва. Сайт фирмы. www.biodiesel.ru/?biodieselmznoe-toplivo
11. ООО «Завод «УКРБУДМАШ». Сайт фирмы. http://biodieselmach.com/rus/index.php/about (
12. ООО «НПП «Тренд». http://www.biodiesel.kiev.ua .
13. О содействии использования биогорючего и других видов горючего на транспорте. Директива 2003/30/ЕС Европейского парламента и совета от 8 мая 2003 года. Масложировая промышленность, №4, 2005 год. С.18, №5, 2005 год, с.16.
14. Рябцев Г. Биодизель от «А» до «Я». Терминал, №48(376), 2007 год, стр.8-19.

15. «Специальные технологии», Днепропетровск. Сайт фирмы. www.spectech.dn.ua/ru-prod
16. Справочник химика. Том 3. Ленинград, «Химия», 1965 год, 1010 с.
17. Стопский В.С., Ключкин В.В., Андреев Н.В. Химия жиров и продуктов переработки жирового сырья. Москва, «Колос», 1992 год, 286 с.
18. Тютюнников Б.Н., Бухштаб З.И., Гладкий Ф.Ф. и др. Химия жиров. Москва, «Колос»,1992 год, 448 с.
19. «Укр.газ-биодизель». Сайт фирмы. www.ukrgasbiodiesel.com
20. «Элерон». Сайт фирмы. www.biodiesel-eleron.narod.ru .
21. Basu H.N. and M.E.Norris. Process for production of esters for use as a diesel fuel substitute using a non-alkaline catalist.// US Patent 5.525.126. (.1996.)
22. Conakci M.,Van Gerpen J. Biodiesel Production from Oils and Fats with HighFree Fatty Acids // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers – 2001. Vol 44. – Nr.5 .p.1429-1436.
23. Dadan Kusdiana.http:www.biomedexperts.com/profile.bme/760532/Dadan Kusdiana
24. Ginosaur D. and Fox R. A process for produsing biodiesel, lubricants, and fuel and lubricant additives in a critical fluid medium. Int. Publ. Nr. WO 00/05327; Int. Appl. Nr: PCT /US99/16669(2000).
25. Ion Lacusta, Valentin Sliusarenco, Grigore Ganea. Technology and equipment for the production biofuel from oily plants. Buletinul institutului politehnic din Iaşi, tomul LVI(LX), FASC. 4B. Editura POLITEHNIUM, 2010, p.389-394.
26. Kusdiana D. and Saka.S. “A Novel Process of the Biodiesel Fuel. Production in Supercritical Methan . Ist World Conference on Biomass for Energy and Industry. Vol. I, pp 563-566, Sevilla, Spain, 6-9 iunie, 2000.
27. Sheehan J., Camobreco V., Duffield J., Graboski M., Shapouri H. Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus. Final report, Report: NREL/SR-580-24089; (1998).
28. Stern R., Hillion G., Gateau P., Guibet J. Process for manufacturing a composition of fatty acid esters useful as gas oil substitute motor fuel with hydrated ethyl alcohol and the resultant esters composition // Patent US 4.695.411P.(1987).
29. Conneman J. Biodiesel in Evropa 1994// Fett Wissenshaft Technologie, -1994-Sonderausgabe Nr.2, s.536-548.
30. Todorovic M., Todorovic T. Biodizel humano gorivo. Srpska academija inovacionih nauka –Beograd, Šabac, 2007, 105 s.

Сведения об авторе

Слюсаренко Валентин Васильевич, АО «АЛИМЕНТАРМАШ», г. Кишинев, главный инженер, научные интересы: проблемы энергоэффективности, альтернативные источники энергии. E-**mail**: v.sliusarenco@gmail.com.

УДК 536.248.2:532.529.5

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛО-ХЛАДОСНАБЖЕНИЯ

А.В. Дорошенко, С. С. Силич
Одесская государственная академия холода

Аннотация. Разработаны принципиальные схемы многофункциональных солнечных систем осушения воздуха, теплоснабжения (горячего водоснабжения и отопления), хладоснабжения и кондиционирования воздуха на основе открытого абсорбционного цикла с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента. Разработаны основные принципиальные решения для нового поколения газо-жидкостных солнечных коллекторов. Тепломасообменные аппараты, входящие в систему испарительного охлаждения, основаны на пленочном взаимодействии потоков газа и жидкости и в них, для создания насадки, используются многоканальные структуры из полимерных материалов или пористой керамики. Выполнен предварительный анализ возможностей многофункциональных систем

Ключевые слова: многофункциональные системы, солнечная энергия, солнечные коллекторы, регенерация, испарительное охлаждение, полимерные материалы, пористая керамика

SISTEMELE SOLARE MULTIFUCȚIONALE DE APROVIZIONARE CU CĂLDURĂ ŞI FRIG

Doroşenko A.V., Silici S.S.
Academia Națională de frig din Odesa

Rezumat: Sunt elaborate schemele principiale ale sistemelor multifuncționale solare ale uscării aerului, aprovizionării cu căldură (aprovizionării cu apă caldă şi încălzirii), aprozivionării cu frig şi condiționării aerului cu regenerarea directă (nemijlocită) a absorbentuilui. Sunt elaborate soluțiile principiale pentru noua generație a colectoarelor solare lichid-gaz. Aparatele de schimb de căldură şi masă, ce intră în sistemul de răcire evaporativă se bazează pe interacțiunea peliculară a fluxurilor de gaz şi lichid şi în ele pentru crearea racordării se folosesc structurile multicanale din materialele polimerice sau cheramica veziculară. Este efectată analiza prealabilă a posibilităților sistemelor multifuncționale.

Cuvinte-cheie: sisteme multifuncționale, energie solară, colectoarele solare, regenerare, răcire evaporativă, materiale polimerice, ceramică poroasă.

MULTIFUNCTIONAL SOLAR SYSTEMS FOR HEATING AND COOLING

Doroshenko A.V., Silich S.S.
ODESSA STATE ACADEMY of REFRIGERATION

Abstract. The basic circuits of multifunctional solar systems of air drainage, heating (hot water supply and heating), cooling and air conditioning are developed on the basis of open absorption cycle with a direct absorbent regeneration. Basic decisions for new generation of gas-liquid solar collectors are developed. Heat-mass-transfer apparatus included in evaporative cooling system, are based on film interaction of flows of gas and liquid and in them, for the creation of nozzle, multi-channel structures from polymeric materials and porous ceramics are used. Preliminary analysis of multifunctional systems possibilities is implemented.

Key words: multifunctional systems, solar energy, solar collectors, regeneration, evaporative cooling, polymeric materials, porous ceramics.

I. Введение

Сопряженные проблемы энергетики и экологии интенсифицируют поиск альтернативных решений в области холодильных и кондиционирующих систем. Эффективность испарительного охлаждения сред ограничена климатическими условиями, тем не менее, интерес к возможностям испарительных охладителей как прямого, так и непрямого типа в последние годы неуклонно возрастает, что обусловлено их малым энергопотреблением и экологической чистотой. Испарительные охладители могут использоваться как в автономном варианте, так и в комбинированных системах, например в составе солнечных осушительно-испарительных охладителей, где предварительное осушение воздуха обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения [1-4,8]

II. Разработка схемных решений и тепломасообменной аппаратуры для альтернативных энергетических систем

Солнечные системы осушительно-испарительного типа на основе открытого абсорбционного цикла разрабатываются как с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента [1,4], так и с непрямой регенерацией [1,3]. Прямая регенерация абсорбента снижает температурный уровень регенерации до температур, не превышающих 70^0С, что обеспечивает возможность построения солнечных систем на основе плоских солнечных коллекторов-регенераторов и устраняет необходимость в десорбере традиционного типа и солнечной водонагревательной системе. Основные элементы солнечных систем с прямой регенерацией абсорбента представлены на рис. 1. В состав системы входят три типа солнечных коллекторов: воздушных (позиция А на рис. 1), для подогрева воздуха, поступающего в помещение, водяных (Б), обеспечивающих горячее водоснабжение объекта и предварительный подогрев слабого раствора абсорбента перед системой регенерации, и газо-жидкостных солнечных коллекторов с гравитационным течением жидкостной пленки (позиция В на рис. 1), обеспечивающих процесс восстановления абсорбента и поддержание непрерывности цикла.

Основные типы разработанных плоских солнечных газо-жидкостных коллекторов СК/р приведены на рис. 2. Этот коллектор является важнейшей частью системы регенерации (восстановления абсорбента) и представляет собой тепломасообменный аппарат, в котором движение воздушного потока обеспечивается солнечным разогревом (разностью плотностей воздуха на входе и выходе из СК/р). Он включает теплоприемник (абсорбер, А), прозрачное покрытие (ПП) с воздушным зазором между ПП и теплоприемником (каналом, по которому движется воздушный поток), и теплоизоляцию дна (ИЗ). Прозрачное покрытие для снижения тепловых потерь может выполняться многослойным (позиция Г), а также включать замкнутые каналы (позиция Е).

Теплоприемник СК/Р имеет U-образную форму (позиция Д на рис. 2), выполнен из алюминиевого листа с черновым покрытием поверхности и обеспечивает одновременный прогрев как самого воздушного потока, так и абсорбента, стекающего в виде тонкой пленки по «дну» теплоприемника под воздействием сил гравитации. Дно теплоприемника, для повышения смачиваемости поверхности, может выполняться с капиллярно-пористым покрытием, либо с регулярной шероховатостью поверхности. Нагрев воздушного потока обеспечивает его движение через воздушный канал СК/Р; нагрев абсорбента обеспечивает необходимые условия для реализации процесса

десорбции (удаления водяных паров из раствора, диффузии паров в воздушный поток и выноса водяных паров в окружающую среду). На рис. 2 приведены варианты коллектора-регенератора в обычном и вентилируемом вариантах. Для организации движения воздуха используются малонапорные вентиляторы тангенциального типа (позиция Ж на рис. 2).

Солнечный коллектор-регенератор, как и обычный СК, ориентирован на юг, может устанавливаться вертикально, или под определенным углом наклона к горизонтальной поверхности для максимального приема солнечной энергии, с учетом характера системы: $\beta = \varphi$ для круглогодичных гелиосистем и $\beta = \varphi - 15°$ для сезонных гелиосистем (период эксплуатации апрель – октябрь). Уточнение величины этого угла, необходимое для максимального улавливания падающей на поверхность СК/р солнечной энергии, приведено в работе [1].

На рис. 3 представлены разработанные типы СК/р для трубчатых (позиция А) и плоских пластинчатых коллекторов (позиция Б) вертикального расположения. Такие решения особенно перспективны для многофункциональных солнечных систем.

Осушительная часть системы включает абсорбер, основные варианты которого приведены на рис.1 (позиция З). Особый интерес с точки зрения минимизации энергозатрат и габаритов, представляет абсорбер с внутренним испарительным охлаждением.

В охладительной части системы используются испарительные охладители как прямого типа (позиции Г и Д на рис. 1, воздухоохладитель ПИО и градирня ГРД, соответственно), так и непрямого типа (позиции Е и Ж, воздухоохладитель НИО и двухконтурная градирня ГРД/д, соответственно) [1-2]. Особый интерес вызывают испарительные охладители непрямого типа [5,6] с точки зрения обеспечения требуемых параметров комфортности и минимизации энергозатрат. Это касается одноступенчатых и многоступенчатых испарительных охладителей.

Для организации насадочной части тепломасообменных аппаратов используются многоканальные многослойные структуры из полимерных материалов при поперечноточной схеме контактирования потоков газа и жидкости [1,2]. Основной проблемой практического использования таких насадочных структур является смоченность поверхностей насадочных элементов и устойчивость течения жидкостных пленок в условиях непосредственного контактирования с газовым потоком [1]. Планируется использование также керамических блоков с многоканальной пористой структурой, что позволит повысить удельные нагрузки по газу и жидкости (решение задачи устойчивости газо-жидкостной системы) и величину смоченной поверхности насадки [7].

Один из вариантов принципиальной схемы многофункциональной осушительно-испарительной системы приведен на рис. 4А. Она включает три части:

– солнечного обеспечения на основе воздушных (3), водяных (1) и газо-жидкостных (воздушный поток – раствор абсорбента) солнечных коллекторов (2);

– осушительную часть в составе абсорбера (4), градирни технологического назначения для обслуживания абсорбера (6) и соответствующих теплообменников ТО1, Т/О2 и Т/О3;

– охладительную часть в составе испарительного охладителя непрямого типа НИО (5А) и теплообменника на воздушном потоке из абсорбера в НИО и вспомогательном воздушном потоке.

Разработка солнечных систем включает как теоретические, так и экспериментальные задачи, связанные с изучением процессов тепломасообмена в основных элементах систем (аппараты осушительного контура, – абсорбер и газо-жидкостной коллектор и аппараты охладительного контура, предназначенные для термовлажностной обработки

воздуха и испарительного охлаждения сред). Особое внимание будет уделено энерго-экологическим показателям солнечных систем, как в сравнении с традиционными решениями, так и в анализе разрабатываемых вариантов систем. В этой части исследования планируется использование методологии «Полный жизненный цикл» [8].

III. Анализ возможностей альтернативных систем

Предварительный анализ возможностей солнечных систем приведен на рис. 4Б. В качестве начальных параметров наружного воздуха выбраны самые «тяжелые» для территории Украины условия. На диаграмме влажного воздуха показано протекание основных процессов в системе:

1-2 – процесс осушения наружного воздуха в абсорбере, протекающий с некоторым ростом температуры (режим работы градирни, обслуживающей абсорбер выбран с учетом оптимизации энергозатрат на ее работу [1]);

2-2 и 2*-3 – процессы в НИО и теплообменнике (для основного воздушного потока, охлаждаемого при неизменном влагосодержании воздуха);

2*-3 – процесс изменения состояния вспомогательного воздушного потока, протекающий с ростом влагосодержания и снижением температуры;

1-7 2*-3 – процесс изменения состояния воздушного потока в СК/р, связанный с выносом из регенератора влаги, десорбируемой из слабого раствора абсорбента (показан условно);

1-4 и 5-6 – процессы изменения состояния воздушного потока и охлаждения воды в градирне, обслуживающей абсорбер.

На диаграмме серым цветом выделена зона комфортных параметров воздуха. Очевидно, что солнечная система вполне обеспечивает получение комфортных параметров воздуха в помещении даже для сравнительно «тяжелых» параметров наружного воздуха.

Выводы:

1. Практическое использование испарительных методов охлаждения требует решения нескольких принципиальных вопросов: расширения климатической области использования методов испарительного охлаждения, повышения компактности и снижения энергопотребления систем; наиболее перспективно включение испарительных охладителей в состав осушительно-испарительных охладителей на основе открытого абсорбционного цикла.
2. Солнечная система с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента позволяет снизить энергозатраты, поскольку традиционный десорбер и солнечная система нагрева теплоносителя здесь заменяется солнечным регенератором абсорбента, что обеспечивает автономность системы и позволяет создать солнечную многофункциональную систему жизнеобеспечения.
3. Разработаны солнечные коллекторы-регенераторы СК/Р для ССКВ, обеспечивающие восстановление концентрации абсорбента и поддержание непрерывности цикла только на основе солнечной энергии, обеспечивающей как необходимый подвод тепла, так и движение воздушного потока над поверхностью абсорбента, стекающего в виде жидкостной пленки по внутренней поверхности теплоприемника СК/Р.

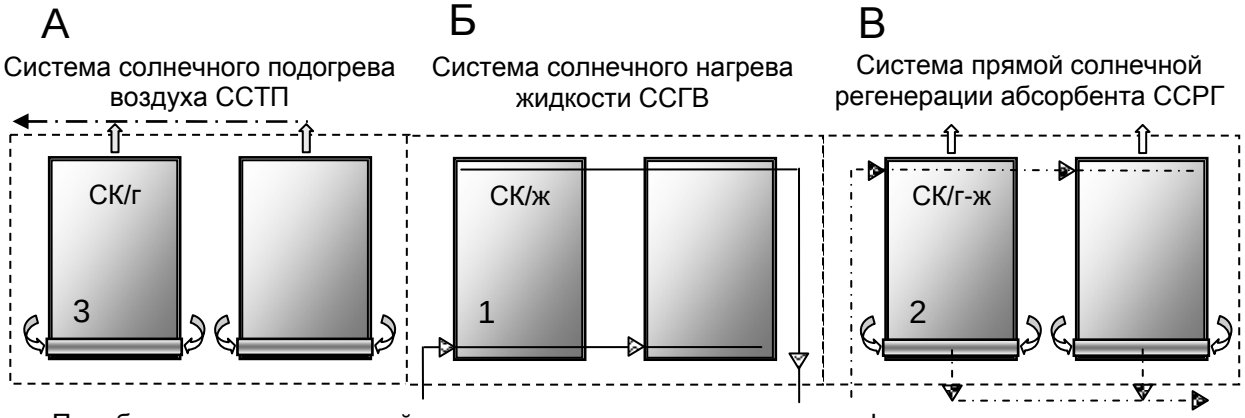
4. Разработанная солнечная система вполне решает задачу обеспечения параметров комфортности при внешних параметрах наружного воздуха, характерных для европейского климата.

Литература

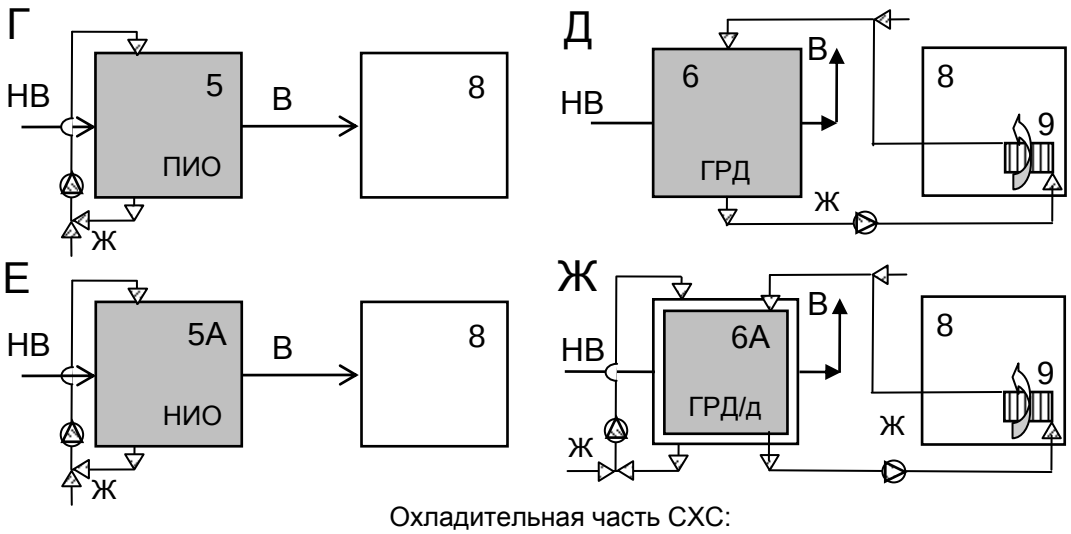
1. А.Н Горин, А.В., Дорошенко. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика), – Донецк: Норд-Пресс, 2008. 374 с.
2. Дорошенко А., Горин А. Солнечные системы кондиционирования воздуха // Холодильная техника и технология. - 2005. - Вып. 93. - №1. - С. 31-47.
3. Grossman, G. Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. Faculty of Mechanical Engineering, Technion – Israel Institute of Technology. 2001. P. 23-28
4. Gandhidasan, P. Performance analysis of an open liquid desiccant cooling system using solar energy for regeneration. Int. J. Refrig., vol. 17, no. 7, 1994. - P. 475-480.
5. Maisotsenko V., Lelland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling21h International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C.
6. Stoitchkov N. J., Dimirov G.J. Effectiveness of Crossflow Plate Heat Exchanger for Indirect Evaporative Cooling. Int. J. Refrig., vol. 21, no. 6. – 1998. - P. 463-471.
7. E.V. Gomes, F.J. Rey Martinez, F. Varela Diez, M.J. Molina Leyva, R. Herrero Martin. Description and Experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler. Int/ Journal of Refrigeration. 28-2005.-P. 654-662.
8. Koltun, P. Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternantive Air-Conditioning Systems. P. Koltun, S. Ramakrishnan, A. Doroshenko, M. Kontsov. 21^{h} International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C, ICR0140, 2003. P. 45-57

Сведения об авторах

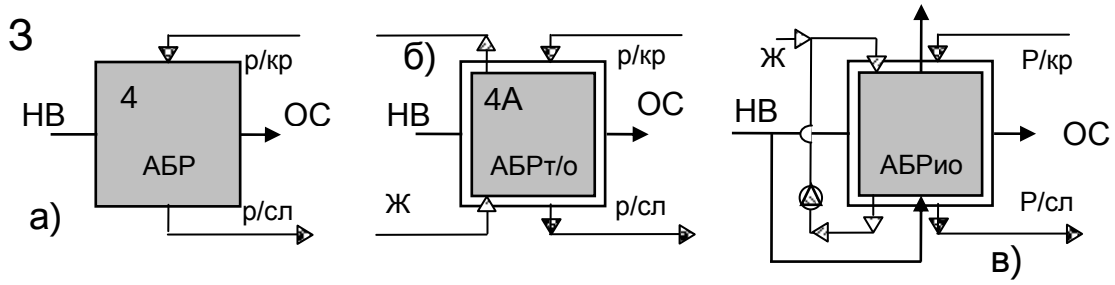
Дорошенко Александр Викторович, профессор, доктор технических наук Одесской государственной академии холода. Область научных интересов: тепломасообмен, гидроаэродинамика, двухфазные потоки, альтернативная энергетика, холодильная и криогенная техника, e-mail: aldor@paco.net.
Силич Сергей Станиславович, аспирант Одесской государственной академии холода. Область научных интересов: альтернативная энергетика, холодильная и криогенная техника, e-mail: Serg1025@rumbler.ru.



Преобразователи солнечной энергии для альтернативных многофункциональных систем



Охладительная часть СХС:
Испарительные охладители газов и жидкостей прямого и непрямого типов (Г, Д – испарительные охладители сред прямого типа (ПИО и градирня ГРД); Е, Ж – испарительные охладители непрямого типа (НИО и двухконтурная градирня ГРД/д)



Осушительная часть СХС, абсорбер-осушитель:
а – абсорбер; б – абсорбер с внутренним (встроенным) теплообменником; абсорбер с внутренним испарительным охлаждением

Рисунок 1. Элементная база многофункциональных солнечных систем. Обозначения: 1 – система солнечного подогрева воздуха ССТП на основе воздушного коллектора СК/г; 2 – система солнечного нагрева жидкости ССГВ на основе плоского солнечного коллектора-водонагревателя СК/ж; 3 – солнечная система регенерации абсорбента ССРГ на основе коллектора-регенератора СК/р; 4, 4А, 4Б – варианты абсорбера-осушителя воздуха АБР; 5, 5А – испарительные охладители воздуха прямого и непрямого типа, типа ПИО и НИО; 6, 6А – испарительные охладители воды, градирня ГРД и двухконтурная градирня влажно-сухого типа ГРД/д; 8 – помещение; НВ – наружный воздух; ОС – осушенный воздух; В – выброс; Р/сл, Р/кр – слабый и крепкий растворы абсорбента; Ж – вода

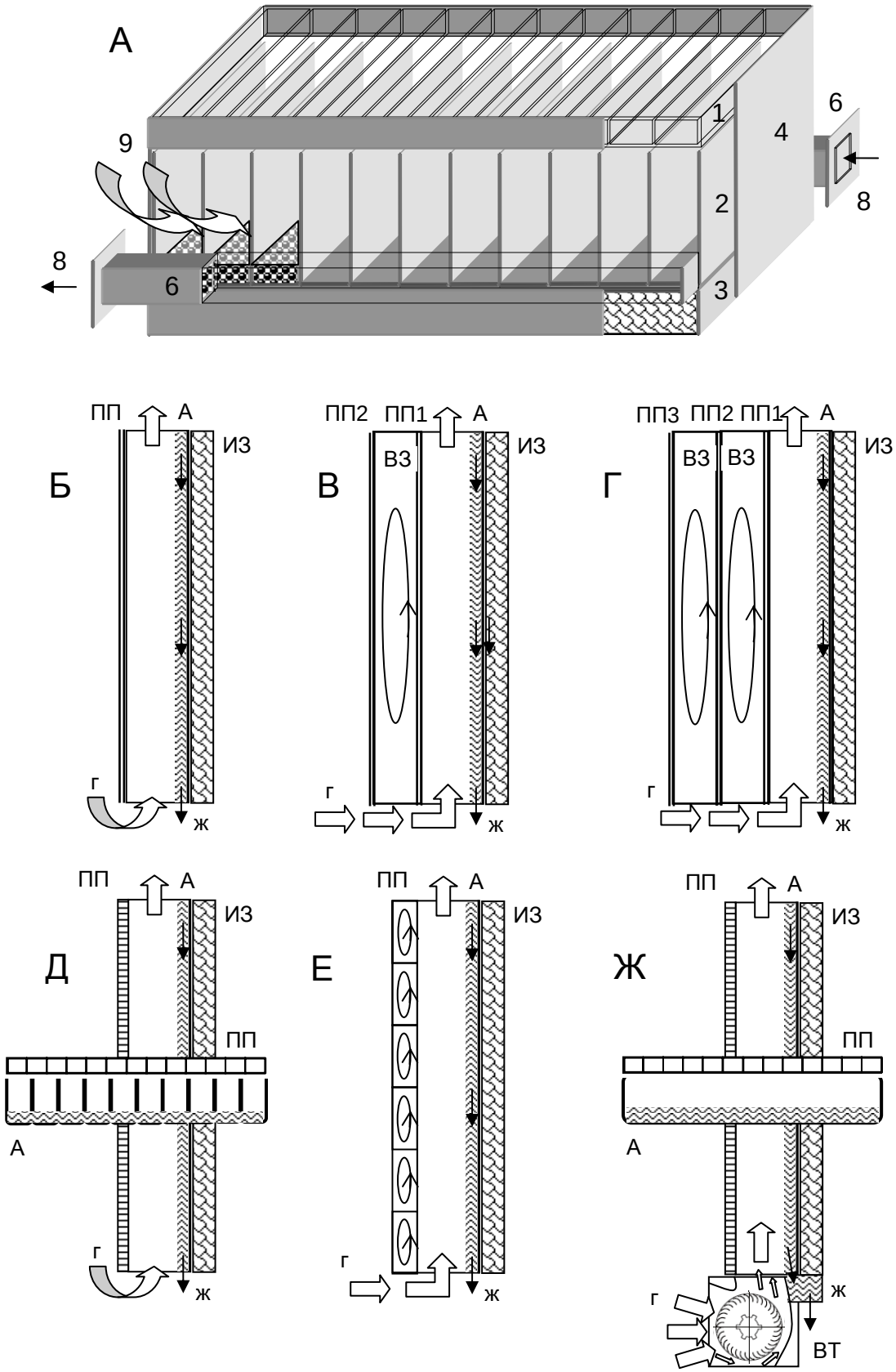


Рисунок 2. Основные типы разработанных плоских газо-жидкостных солнечных коллекторов СК/р. А – общий вид коллектора; Б – разработанные модификации солнечных газо-жидкостных коллекторов. Обозначения: А – абсорбер (теплоприемник); ПП – прозрачная изоляция; ИЗ – теплоизоляция; Г – воздушный поток; ВЗ – воздушный зазор; ВТ – вентилятор

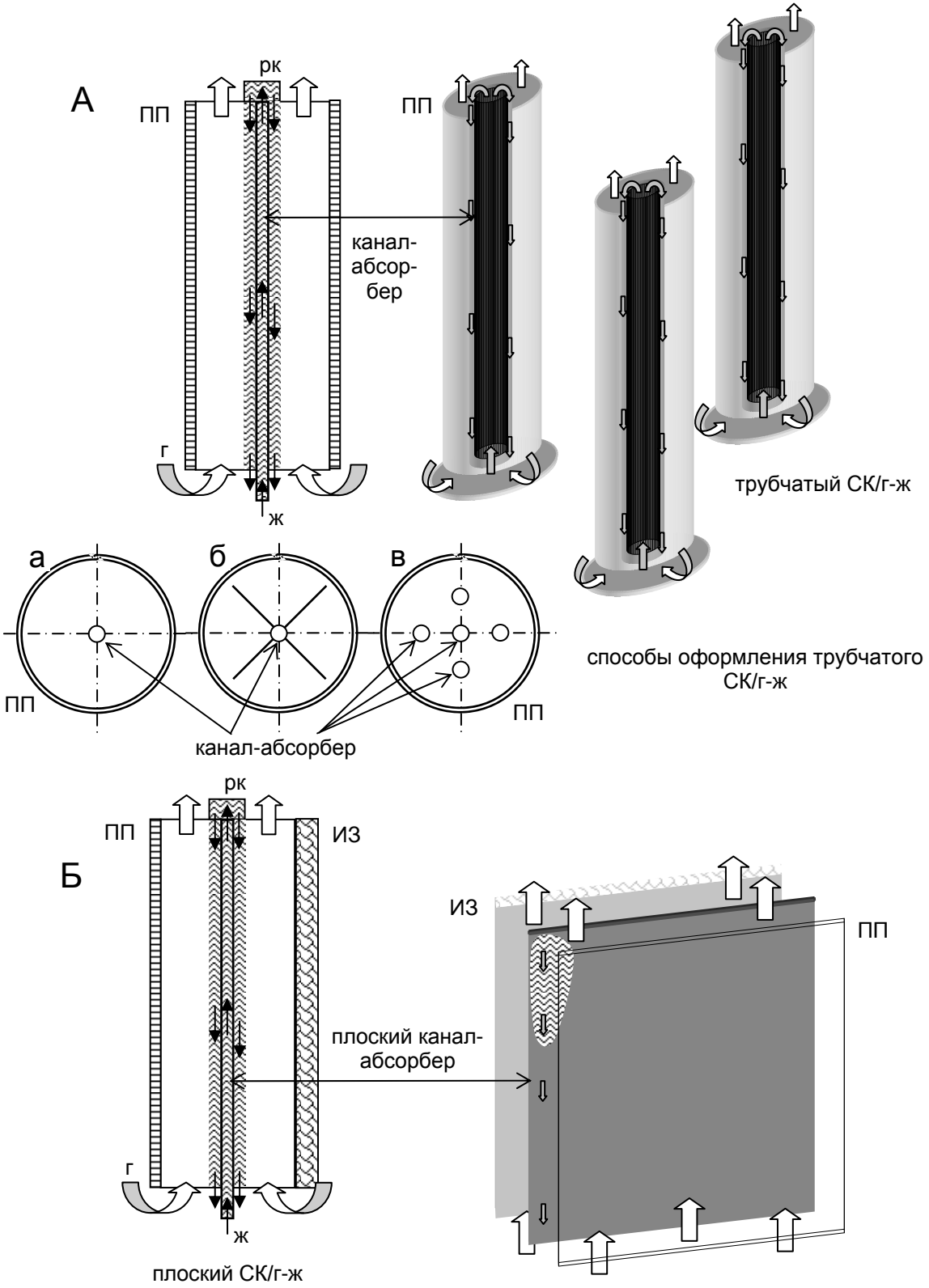


Рисунок 3. Разработанные типы газо-жидкостных трубчатых (А) и плоских пластинчатых (Б) солнечных коллекторов СК/р вертикального расположения.

Обозначения по рис. 2, дополнительно: а – однотрубный абсорбер; б – абсорбер с оребрением; в – многотрубный абсорбер

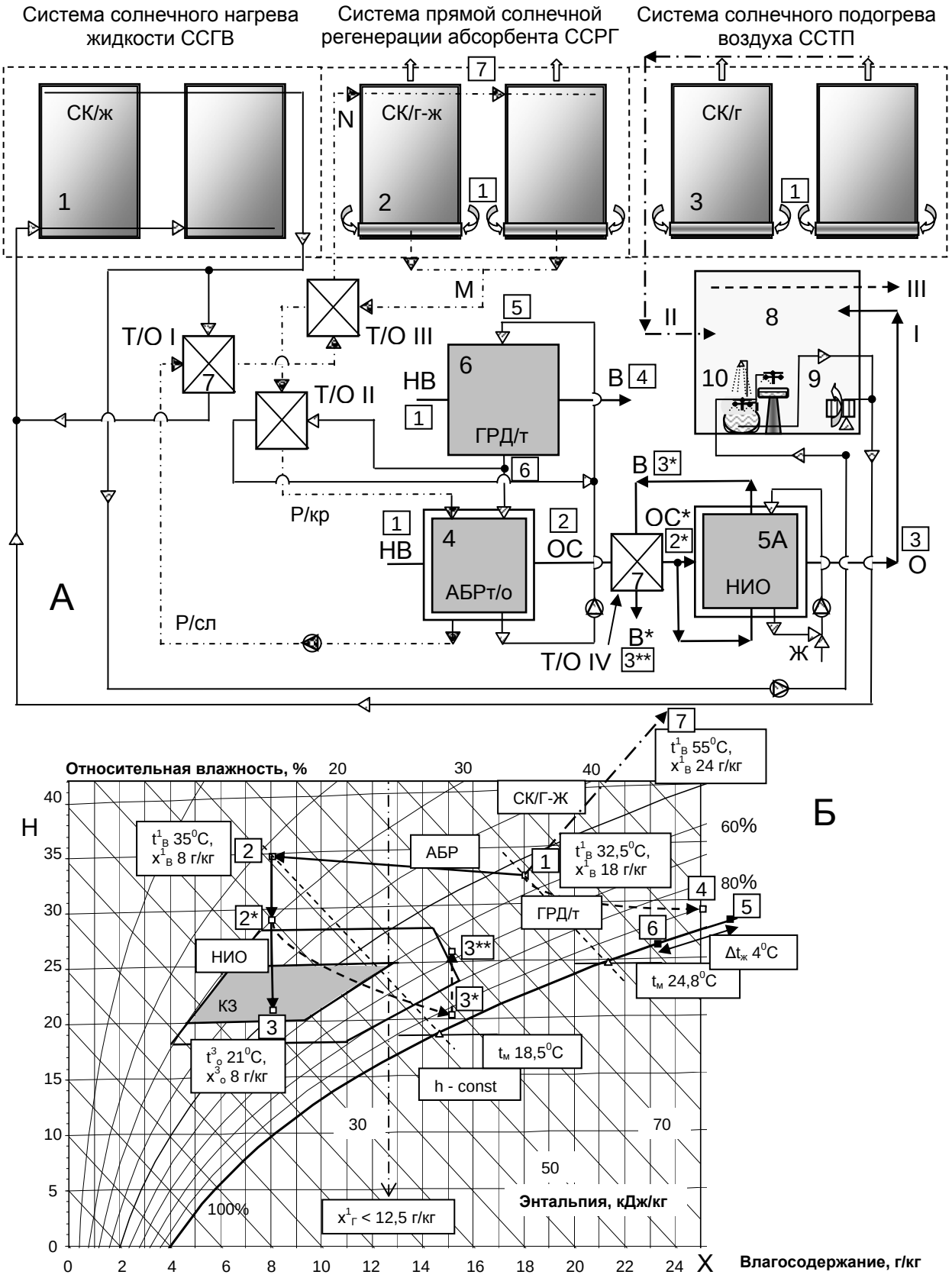


Рисунок 4. А – принцип построения осушительно-испарительных многофункциональных систем (с использованием испарительного охладителя непрямого типа НИО); Б – процессы на диаграмме влажного воздуха. Обозначения по рис. 1; дополнительно: 7 – теплообменник Т/О; точки 5, 6 и 7 (в рамках) показаны на диаграмме условно; I, II, III – воздушные потоки, поступающие в помещение

УДК 536.248.2:532.529.5

ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ АБСОРБЦИОННЫЕ ОСУШИТЕЛЬНО-ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

А.В. Дорошенко, Хасан Сади Ибрагим
Одесская государственная академия холода

Аннотация. В статье рассматриваются испарительные охладители прямого и непрямого типа с насадкой на основе многослойных и многоканальных полимерных структур. Такие охладители могут использоваться в автономных и комбинированных вариантах, а также в составе солнечных осушительно-испарительных систем. Тепло, необходимое для регенерации абсорбента обеспечивается солнечной энергией от гелиосистемы с плоскими солнечными коллекторами из полимерных материалов.
Ключевые слова: испарительный охладитель, осушительно-испарительных охладитель, солнечная энергия

SISTEME DE RĂCIRE CU UTILIZARE SISTEMELOR DE CĂLDURĂ ABSORBANTE USCĂTOR–EVAPORATIVE CU UTILIZAREA SURSELOR ALTERNATIVE DE ENERGIE

Doroşenco A.V., Hasan Sadi Ibrahim
Academia Națională de frig din Odesa

Rezumat. În articol se examinează răcitoarele evaporative directe şi indirecte cu racordare pe baza structurilor polimerice multistratificate şi multicanale. Aceste răcitoare pot fi folosite în varianta cât autonomă atât şi combinată şi de asemenea în componența sistemelor de uschare şi de evaporare. Căldura necesară pentru regenerarea absorbentului se asigură de energia solară de la colectoarele solare plate din materiale polimerice.
Cuvinte-cheie: răcitorul evaporativ, răcitorul uscător-evaporativ, energia solară

ABSORBTION DRYING-EVAPORATIVE HEAT USING SYSMEMS FOR COLD PRODUCTION WITH THE USE OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES

Doroshenco A.V., , Hasan Sadi Ibraghim
ODESSA STATE ACADEMY of REFRIGERATION

Abstract. Direct and indirect evaporative coolers with nozzles based on multi channel and multi layer polymeric structures are examined in the paper. Such coolers can be used in both independent and combined variants, as well as a part of solar drying-evaporative systems. Heat required for the regeneration of absorbent is provided with solar energy from flat solar collectors from polymeric materials.
Key words: indirect evaporative cooling, drainage of air and evaporative cooling, solar energy

Сопряженные проблемы энергетики и экологии интенсифицируют поиск альтернативных решений в области холодильных и кондиционирующих систем. Эффективность испарительного охлаждения сред ограничена климатическими условиями, тем не менее, интерес к возможностям испарительных охладителей как прямого, так и непрямого типа в последние годы неуклонно возрастает, что обусловлено их малым энергопотреблением и экологической чистотой. Испарительные охладители могут использоваться как в автономном варианте, так и в комбинированных системах, например в составе осушительно-испарительных охладителей, где предварительное осушение воздуха обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения и глубину охлаждения.

I. Испарительные охладители непрямого типа

Испарительные охладители (рис. 4) могут быть прямого и непрямого типов [1-2]. В первом случае (рис. 4Б) охладитель ПИО включает насадку, в которой реализуется процесс адиабатического охлаждения воздушного потока. Во втором, получившем широкое распространение в последние годы [2] (рис. 4В), воздушный поток делится на две части. Вспомогательный поток воздуха поступает в «мокрую» часть охладителя, где контактирует с водяной пленкой (вода рециркулирует через аппарат) и обеспечивает испарительное охлаждение воды, которая, в свою очередь, охлаждает в теплообменнике 10 основной воздушный поток. Этот поток воздуха охлаждается при неизменном влагосодержании, что обеспечивает преимущества при создании на основе НИО систем кондиционирования воздуха СКВ. Вспомогательный воздушный поток выносит все тепло из аппарата в «связанном» виде, его температура также понижается и влагосодержание возрастает. Температура воды в цикле сохраняет неизменное значение и оказывается на несколько градусов выше температуры мокрого термометра поступающего в НИО наружного воздуха (естественного предела охлаждения). Эта температура также зависит от соотношения воздушных потоков, основного и вспомогательного, в НИО и является пределом охлаждения обоих воздушных потоков в аппарате.

Схема может быть построена с разделением полного воздушного потока после теплообменника 10 и возвратом вспомогательного потока в испарительный охладитель. В этом случае в качестве предела охлаждения выступает температура точки росы наружного воздуха, но возрастают, естественным образом, энергозатраты реализацию процесса [3].

В состав охладительной части сорбционных систем входят испарительные охладители газов и жидкостей ПИО (рис. 4) и градирни ГРД (рис. 5? Представлен ряд вариантов противоточных охладителей жидкости, включая перспективные решения в виде двухконтурных влажно-сухих охладителей). Последние используются в осушительном контуре АСС для охлаждения абсорбера, и в охладительном контуре, для получения и подачи в обслуживаемое помещение холодной воды.

Для организации насадки охладителей используется многослойная многоканальная полимерная структура (рис 4А), представляющая собой систему регулярных каналов, обеспечивающих высокую удельную поверхность контакта водяной пленки и воздушного потока (150-300 $м^2/ м^3$, в зависимости от величины эквивалентного диаметра каналов насадки).

Аппараты разработаны как в противоточном (рис. 5), так и в поперечноточном вариантах. Конструктивно все тепломасообменные аппараты осушительного и охладительного контуров АСС идентичны и все основные элементы их конструкции унифицированы. В зависимости от сложности решаемой задачи в охладительном контуре АСС могут использоваться многоступенчатые, либо комбинированные варианты охладителей [1,2,8].

II. Солнечные осушительно-испарительные системы

Эффективность испарительного охлаждения ограничена климатическими условиями. Оно достаточно эффективно только в условиях сухого и жаркого климата. Предварительное осушение воздуха снимает климатические ограничения эффективного использования процесса испарительного охлаждения. Одним из таких решений являются солнечные сорбционные системы, вызывающие высокий интерес исследователей [1,2,5,6,9].

Используются как адсорбционные, так и абсорбционные системы. Выполненный авторами предварительный анализ позволил выделить в качестве перспективных, с точки зрения возможности «солнечного» обеспечения их работоспособности, абсорбционные системы [1-2]. Такие системы работоспособны на более низком температурном уровне регенерации абсорбента и тепломасообменные аппараты пленочного типа, входящие в их состав, обладают более низким уровнем аэродинамического сопротивления, что в целом, позволяет снизить энергозатраты.

Абсорбционные системы, основанные на осушительно-испарительном охлаждении и термовлажностной обработке воздуха, являются одной из немногих альтернатив парокомпрессионной технике и обеспечивают возможность решения задач осушения воздуха, охлаждения сред и термовлажностной обработки воздуха в системах кондиционирования (ССКВ). Работоспособность таких систем может обеспечиваться, в частности, солнечной энергией [2]. Энергозатратность в таких системах ниже, а экологическая чистота выше, чем в традиционных системах, основанных на использовании парокомпрессионной техники.

Альтернативная солнечная система АСС (рис. 1 и 2) включает, в составе осушительного блока, абсорбер-осушитель 1 и десорбер-регенератор 3, и, как правило, для охлаждения абсорбера используется градирня технологического назначения ГРД/т (6), а для подвода тепла к десорберу – солнечная система с плоскими солнечными коллекторами СК (10) [2].

Работа осушительно-испарительного охладителя осуществляется по следующей схеме. Блок осушения наружного воздуха включает абсорбер-осушитель, десорбер-восстановитель концентрации абсорбента и теплообменник 4, обслуживаемый градирней. Осушенный воздух поступает в испарительный охладитель (воздухоохладитель на рис. 1, либо продуктовую градирню (6А) на рис. 2). Вариантным решением является схема с получением как охлажденного воздуха, так Ии холодной воды, поступающей в расположенные в помещении водо-воздушные теплообменники (14). Тепломасообменные аппараты осушительного контура могут включать в состав насадочной части теплообменники, как это видно на схемах на примере десорбера 3.

Разработанные солнечные коллекторы (рис. 3) основаны на использовании полимерных материалов. Исследования, выполненные в ОГАХ ранее показали, что такой коллектор может выполняться без традиционного воздушного зазора между теплоприемником (абсорбером) и прозрачным покрытием ПП (рис. 3Б), поскольку ПП, решенное в виде многоканальной плиты сотовой структуры с воздухом, находящемся в его каналах, может выполнять функции традиционного воздушного зазора с точки зрения подавления тепловых потерь, связанных с конвективными воздушными потоками. В этом случае расчет СК/П должен учитывать наличие ребер-перегородок в структуре многоканальной полимерной плиты прозрачного покрытия, что сказывается на пропускательной способности покрытия.

Осушительно-испарительный охладитель обеспечивает получение комфортных параметров воздуха для любых климатических регионов мира только с помощью испарительного охлаждения, не прибегая к парокомпрессионному охлаждению. Это позволяет снизить энергозатраты на 25-35% и существенно повысить экологическую чистоту новых решений [10].

III. Выводы:

1. Разработаны схемные решения солнечных осушительно-испарительных охладителей на основе открытого абсорбционного цикла и тепломасообменной

аппаратуры пленочного типа на основе многоканальных многослойных полимерных структур.

2. В качестве основного источника тепла для регенерации абсорбента используется гелио система с солнечными коллекторами на основе многоканальных многослойных полимерных структур.

3. Осушительно-испарительный охладитель обеспечивает получение комфортных параметров воздуха для любых климатических регионов мира с помощью испарительного охлаждения, не прибегая к парокомпрессионному охлаждению, что позволяет снизить энергозатраты на 25-35% и существенно повысить экологическую чистоту новых решений

Литература

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха. 2-е переработанное и дополненное издание. – Донецк.: Норд-Пресс, 2007. – 362 с.
2. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Глауберман М.А. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика) – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 374 с.
3. Maisotsenko V., Lelland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling21^{h} International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C.
4. Дорошенко А. Компактная тепломассообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика). Докторская диссертация, Одесский институт низкотемпературной техники и энергетики. Одесса. - 1992. – т. 1. – 350 с., т. 2. – 260 с.
5. G.Grossman. 2001, Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. Faculty of Mechanical Engineering, Technion – Israel Institute of Technology.
6. Gandhidasan, P. Performance analysis of an open liquid desiccant cooling system using solar energy for regeneration. Int. J. Refrig., vol. 17, no. 7, 1994. - P. 475-480.
7. Ertas, E.E. Anderson, I. Kiris. Solar Energy. Vol. 49, No. 3, 1992. pp. 205-212
8. C.S.P. Peng, J.R. Howell. J. of Solar Energy Eng. Vol. 106, may 1984. pp. 133-141.
9. Дорошенко А., Горин А. Альтернативные системы кондиционирования воздуха (солнечные холодильные и кондиционирующие системы на основе открытого абсорбционного цикла) // АВОК (Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика).- 2005.- №1.- С. 60–64.
10. Koltun, P. Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternantive Air-Conditioning Systems. P. Koltun, S. Ramakrishnan, A. Doroshenko, M. Kontsov. 21^{h} International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C, ICR0140, 2003. P. 45-57.
11.

Сведения об авторах.

Дорошенко Александр Викторович, профессор, доктор технических наук Одесской государственной академии холода. Область научных интересов: тепломасообмен, гидроаэродинамика, двухфазные потоки, альтернативная энергетика, холодильная и криогенная техника, e-mail: aldor@paco.net.

Hassan Sadi Ibrahim (Хасан Сади Ибрагим), Иракский Курдистан, аспирант Одесской Академии Холода. Область научных интересов: альтернативная энергетика, e-mail: aldor@paco.net.

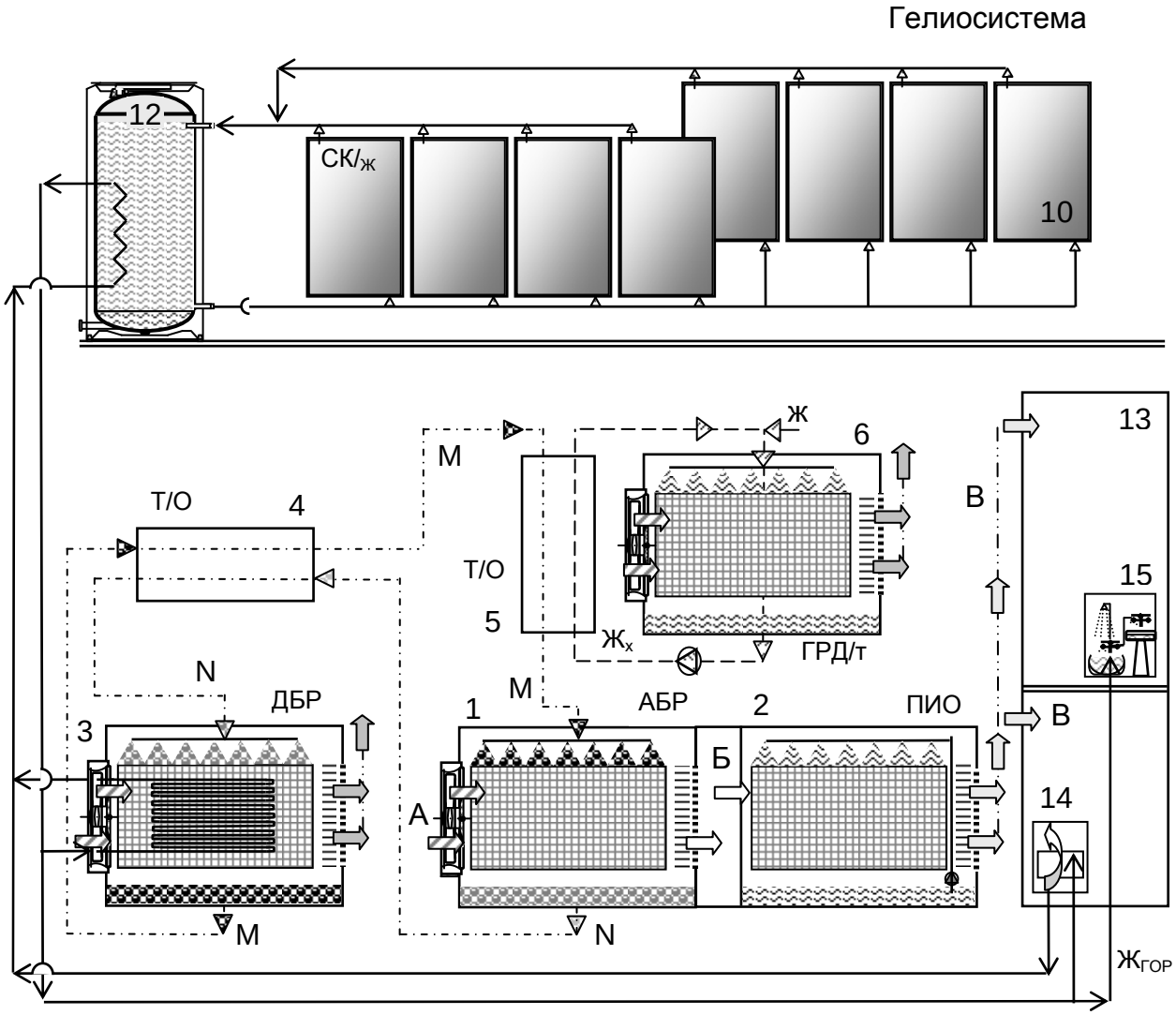


Рисунок 1. Принципиальная схема солнечной системы кондиционирования воздуха с использованием испарительного воздухоохладителя в охладительном контуре.

Обозначения: 1 – абсорбер; 2 – испарительный охладитель; 3 – десорбер; 4, 5 – теплообменники; 6 – градирня технологическая ГРД/т; 7 – теплонасосная установка ТНУ; 8 и 9 – испаритель и конденсатор ТНУ, соответственно; 10 – солнечный коллектор; 12 – бак-теплоаккумулятор; 13 – помещение; 14 – водо-воздушный теплообменник; 15 – санузел.

А – наружный воздух; Б – осушенный в абсорбере воздух; В –воздушный поток после термовлажностной обработки в ИО; М, N – крепкий и слабый растворы абсорбента; Р – воздушный поток из помещения (рециркуляционный воздушный контур)

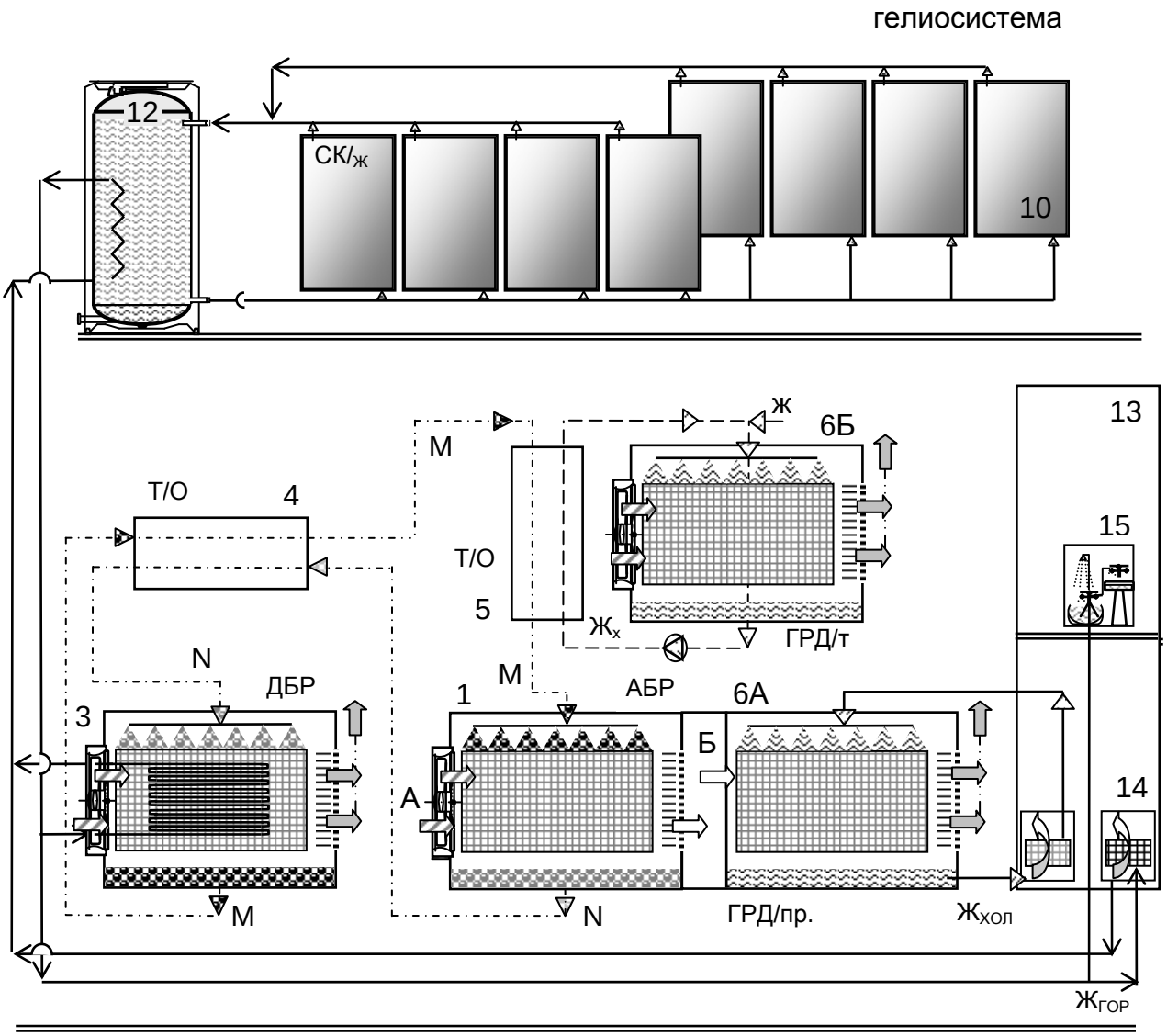


Рисунок 2. Принципиальная схема солнечной системы кондиционирования воздуха с использованием градирни в охладительном контуре

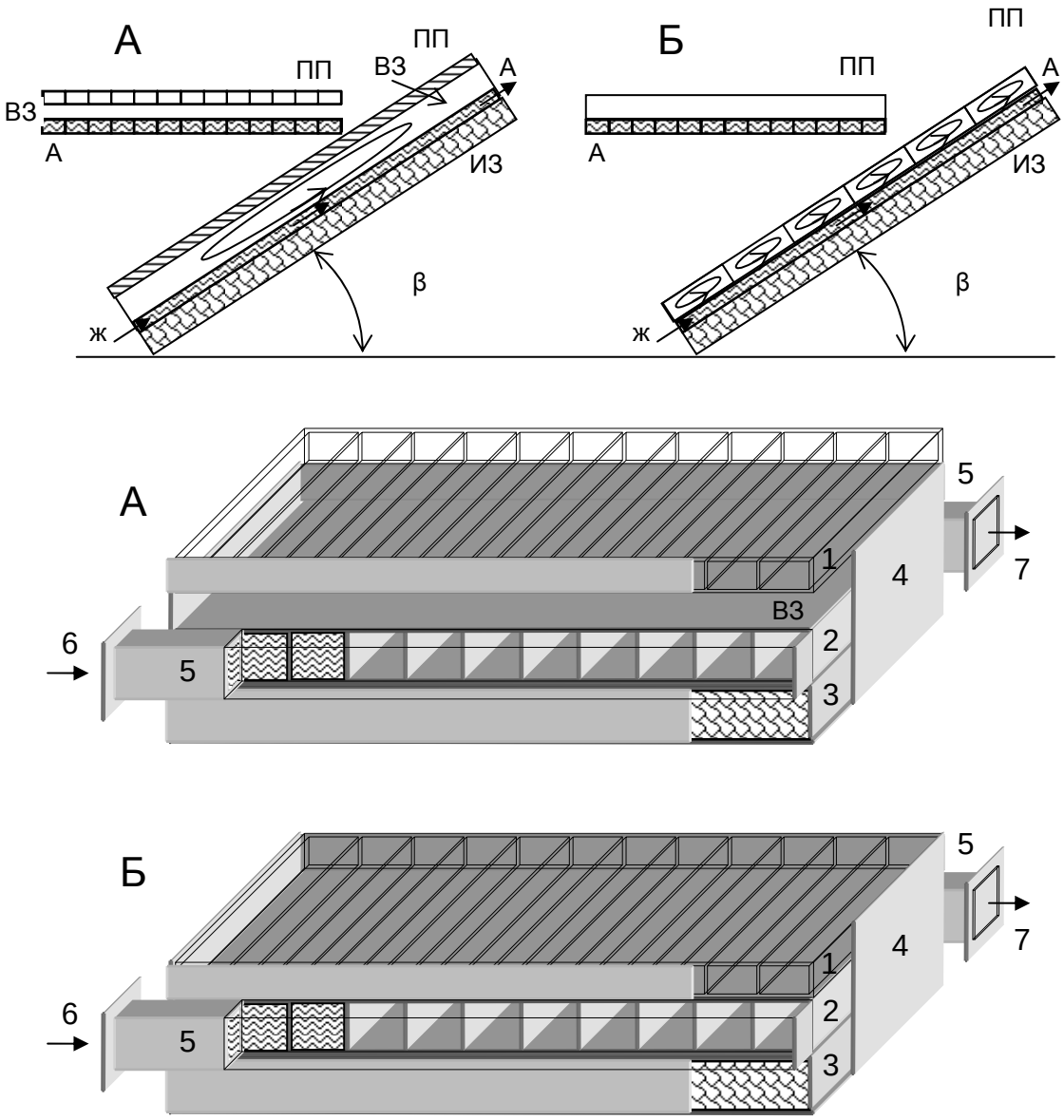


Рисунок 3. Разработанные типы плоских жидкостных солнечных коллекторов СК/ж из полимерных материалов.

Обозначения: 1 ПП – прозрачная изоляция; 2 (А) – абсорбер (теплоприемник); 3 (ИЗ) – теплоизоляция; ВЗ – воздушный зазор; 4 – корпус коллектора; 5 – гидравлические коллекторы; 6, 7 – вход и выход теплоносителя

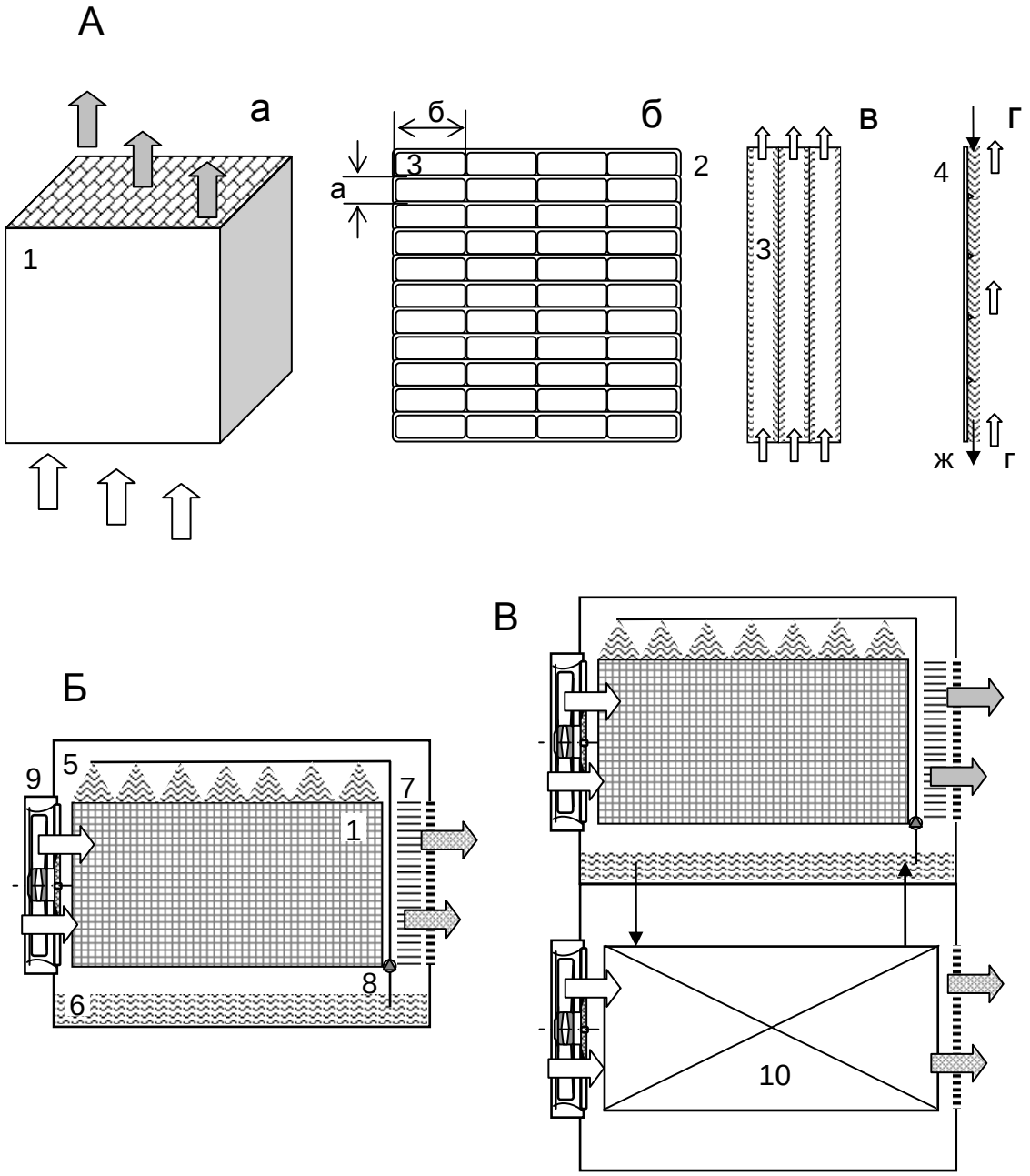


Рисунок 4. Испарительные воздухоохладители прямого типа ПИО.

А – насадка испарительного охладителя.

Б и В – варианты воздухоохладителей испарительного типа (Б – воздухоохладитель; В – воздухоохладитель непрямого типа (раздельная схема).

Обозначения: 1 – многоканальная многоярусная насадка; 2 – полимерная многоканальная плита; 3 – канал насадки; 4 – лист насадки с регулярной шероховатостью поверхности; а, б – размеры канала насадки; в, г – шаг и высота РШ поверхности; 5 – водораспределитель; 6 – емкость для воды; 7 – каплеотделитель; 8 – насос; 9 – вентилятор; 10 – водо-воздушный теплообменник.

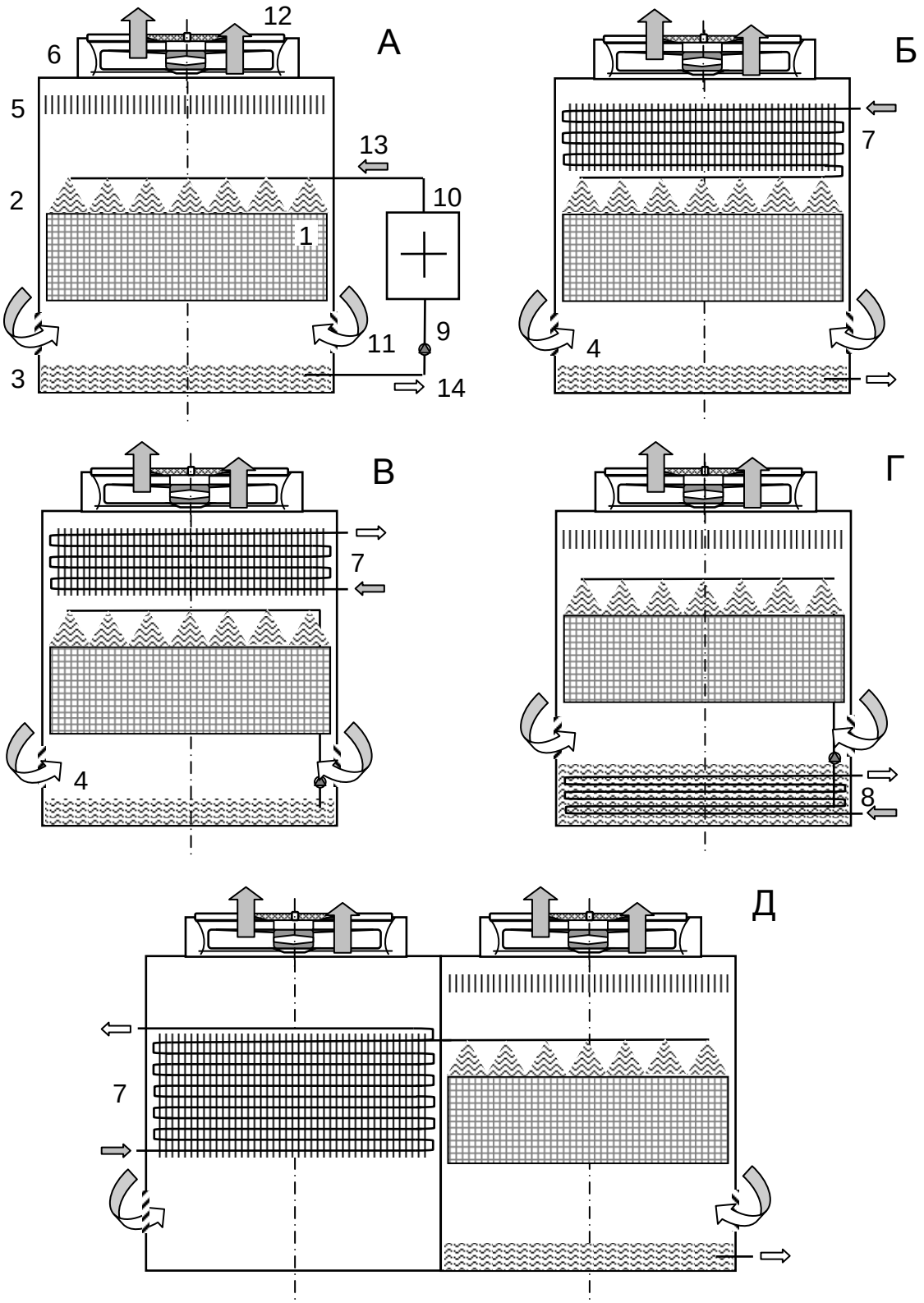


Рисунок 5. Испарительные водоохладители (градирни) противоточного типа.

Обозначения: 1 – насадка ТМА; 2 – водораспределитель, 3 – емкость для воды (танк), 4 – воздухопремные окна, 5 – сепаратор капельной влаги, 6 – вентилятор, 7 – теплообменник из оребренных труб; 8 – теплообменник из гладких труб; 9 – водяной насос; 10 – тепловая нагрузка; 11 – поступающий свежий воздух, 12 – удаляемый воздух; 13 – горячая вода; 14 – охлажденная вода. А – градирня; Б – двухъярусная градирня; В, Г и Д – двухконтурные влажно-сухие градирни.

РАСЧЕТ ДВУХФАЗНОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА

Шит Б.М.
Институт Энергетики АН Молдовы

Аннотация. Приведен расчет двухфазного эжектора для теплового насоса на диоксиде углерода. Метод расчета базируется на методе, разработанном S.M. Kandil, W.E. Lear, S.A. Sherif, модифицированным с учетом требования задания коэффициента эжекции.
Ключевые слова: двухфазный эжектор, диоксид углерода, тепловой насос.

CALCULUL EJECTORULUI BIFAZIC AL POMPEI DE CĂLDURĂ PE DIOXID DE CARBON

Şit B.

Institutul de Energetică a Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. Este prezentat calculul ejectorului bifazic pentru pompa de căldură pe dioxid de carbon. Metoda se bazează pe metoda, elaborată de S. Kandil, W. Lear, S. Sherif, modificată luând în consideraţie valoarea prescrisă a coefiţientului de ejecţie.
Cuvinte-cheie: ejector bifazic, dioxid de carbon, pompa de căldură.

TWO-PHASE EJECTOR of CARBON DIOXIDE HEAT PUMP CALCULUS

Sit B.

Abstract. It is presented the calculus of the two-phase ejector for carbon dioxide heat pump. The method of calculus is based on the method elaborated by S.M. Kandil, W.E. Lear, S.A. Sherif, and is modified taking into account entrainment ratio as the input for the calculus.
Key words: two-phase ejector, carbon dioxide, heat pump.

Введение

Задачи расчета двухфазных эжекторов «жидкость-газ» описаны во многих работах. Это работы Kandil S.M. [1], Lear W.E. [2], Дейч М.Е. [3], Соколов Е.Я. şi Зингер Н.М. [4], Цегельский В.Г. [5], Васильев Ю.Н.[6], Спиридонов Е.К. [7] и многих других авторов.

В работах [1,2] приведена методология расчета сверхзвукового двухфазного эжектора, когда заданы давление на выходе эжектора и конструктивные параметры эжектора, но не рассмотрен случай, когда задан коэффициент эжекции и требуется обеспечить максимальное давление на выходе эжектора. В работах [3–7] отсутствуют методы расчеты эжекторов, когда среда на выходе из сопла двухфазная и теплофизические параметры рабочей и эжектируемой среды переменные в зависимости от давления и температуры. В работах [6,7] расчет эжектора проводится при условии, что процесс в эжекторе изотермический.

Задача, связанная с расчетом двухфазного эжектора при изоэнтропическом процессе в нем, когда задан коэффициент эжекции и одновременно требуется обеспечить максимальное давление на выходе эжектора, до настоящего времени еще не рассматривалась.

Для расчета двухфазного эжектора нами использована в качестве базовой методика, описанная в [1,2]. При расчетах была использована программа REFPROP 7 разработанная “American National Institute of Standarts” (NIST).

Расчет эжектора

На рис. 1 представлена схема эжектора.

Эжектор состоит из сопла, смешивающей секции и диффузора. В сопле происходит уменьшение давления CO_2 относительно давления рабочего (эжектирующего) потока, и увеличение кинетической энергии этого потока. Высокоскоростной двухфазный поток с низким давлением, выходящий из сопла, всасывает поток газообразного CO_2 низкого давления из испарителя. Во время этого процесса эжектируемый поток ускоряется, так как сечение потока уменьшается от входной части до секции смешивания. Так как скорость газообразного CO_2 увеличивается, давление в смесительной секции ниже, чем давление в испарителе. В смесительной секции потоки из сопла и испарителя смешиваются и давление возрастает. В диффузоре скорость падает, и кинетическая энергия превращается в энергию давления.

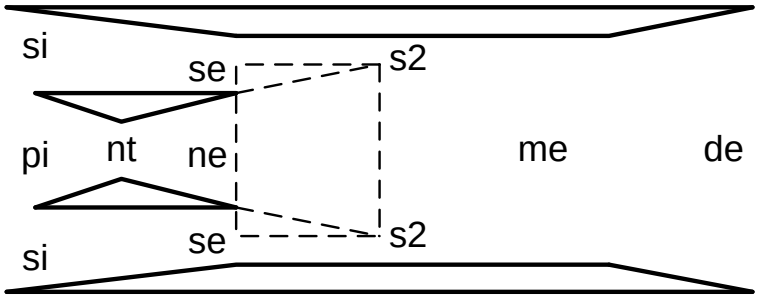


Рис. 1. Схема эжектора

При расчете используем методику, разработанную в [1,2]. Модификация методики [1,2] заключается в том, что при определении давления на выходе смесительной камеры и энтальпии потока на выходе смесительной камеры выбираем координаты параметров состояния потока на выходе камеры на кривой постоянной сухости смеси, находящейся под пограничной кривой. При этом задаемся давлением на выходе смесительной камеры с учетом исключения возникновения условий запирания потока и обеспечения максимального СОР теплового насоса. Чтобы получить параметры потока в критическом сечении сопла, задаются давлением в нем, P_{nt} и условием, что поток является изоэнтропическим. На основании закона о сохранении массы получаем:

$$V_{nt} = \frac{\rho_{pi} A_{pi}}{\rho_{nt} A_{nt}} \cdot V_{pi}, \tag{1.1}$$

$$V_{nt} = \sqrt{2\left(h_{pi} - h_{nt} + 0,5 \cdot V_{pi}^2\right)} \tag{1.2}$$

Задаются давлением в критическом сечении и разностью энтальпий $dh_1 = h_{pi} - h_{nt}$ до тех пор, пока число Маха в сечении „nt” не станет меньшим 1. Процесс считается изоэнтропическим. $s_{pi} = s_{nt}$. Параметры среды на выходе из сопла вычисляются, используя уравнения сохранения энергии для адиабатического процесса.

Скорость жидкости на выходе из сопла рассчитываем по формуле:

$$V_{ne} = \sqrt{2\left(h_{nt} - h_{ne} + 0,5 \cdot V_{nt}^2\right)}. \tag{1.3}$$

Вычислим отношение площадей A_{nt} è A_{ne} из уравнения:

$$\frac{A_{nt}}{A_{ne}} = \frac{\rho_{ne}}{\rho_{nt}} \cdot \frac{V_{ne}}{V_{nt}}. \qquad (1.4)$$

Уравнение (1.3) следует из уравнения (1.5).

$$h_{ne} + \frac{1}{2} \cdot V_{ne}^2 = h_{nt} + \frac{1}{2} \cdot V_{nt}^2, \qquad (1.5)$$

Затем вычислим энтальпию в конце камеры смешения h_{me} и по заданному значению сухости смеси в конце камеры смешения x_{me_pr} выбираем P_{me} исходя из условия $x_{me} \approx x_{me_pr}$.

Условия запирания потока по входу вычисляем по формуле:

$$u_{in} = \frac{\rho_{se} V_{se} A_{se}}{\rho_{ne} V_{ne} A_{ne}}. \qquad (1.6)$$

Первое место, где может произойти запирание потока, - это сечение se (см. рис. 1). В этом месте может произойти запирание потока, если противодавление падает, и V_{se} достигает скорости звука. Такой режим называется «сверхзвуковой насыщенный режим». В этом случае изменяют P_{se}, чтобы оно достигло значения давления торможения P_{si}. В этом случае первичный поток расширяется в смесительной камере, так что вторичный поток ускоряется. При этом скорость вторичного потока перестает зависеть от условий по ходу потока.

Следующий анализ используется для вычисления ϕ_{Fabri}. Уравнение моментов для контрольного объема, показанного на рис. 1, выглядит следующим образом:

$$\phi_{Fabri} = \frac{\left(P_{se} + P_{ne} \frac{A_{ne}}{A_{se}} - P_{s2} \frac{A_{s2}}{A_{se}} - P_{n2} \frac{A_{n2}}{A_{ne}} \frac{A_{ne}}{A_{se}} \right)}{\rho_{ne} V_{ne} \frac{A_{ne}}{A_{se}} \left(V_{s2} - S_{se} \right)} - \frac{V_{n2} - V_{ne}}{V_{s2} - V_{se}}. \qquad (1.7)$$

Итерационный процесс начинается с задания значения P_{se}, зная, что $s_{se} = s_{si}$, что определяет состояние se. Из уравнения энергии следует:

$$V_{se} = \sqrt{2\left(h_{si} - h_{se}\right)}. \qquad (1.8)$$

Тогда ϕ_{Fabri} может быть вычислено как:

$$\phi_{Fabri} = \frac{\rho_{se} V_{se} A_{se}}{\rho_{ne} V_{ne} A_{ne}}. \qquad (1.9)$$

Если задаться условием $s_{s2} = s_{si}$ и давлением P_{s2}, то состояние $s2$ будет полностью определено. Скорость V_{s2} вычисляется по следующему уравнению:

$$V_{s2} = \sqrt{2\left(h_{se} - h_{s2} + 0,5 \cdot V_{se}^2\right)}. \qquad (1.10)$$

Давление P_{s2} должно быть подобрано так, чтобы скорость V_{s2} достигла скорости звука.

Если величина коэффициента эжекции меньше тех величин, которые были определены в результате анализа на запирание (т.е. тогда, когда эжектор работает в смешанном режиме) используется следующий анализ, чтобы определить давление на выходе камеры смешения.

Для этого задаются P_{se} и, так как $s_{si} = s_{se}$, то состояние газа на входе в камеру смешения полностью определено. Вычисляем V_{se} по формуле

$$V_{se} = \sqrt{2\left(h_{si} - h_{se} + 0,5 \cdot V_{si}^2\right)}. \qquad (1.11)$$

Затем задаются давлением P_{me}, чтобы вычислить V_{me}.

$$V_{me} = \frac{\left(P_{ne} - P_{me}\right)\frac{A_{ne}}{A_{se}} - \left(P_{se} - P_{me}\right) + \rho_{ne} V_{ne}^2 \frac{A_{ne}}{A_{se}} + \rho_{se} V_{se}^2}{\left(1+\phi\right)\rho_{ne} V_{ne} \frac{A_{ne}}{A_{se}}}. \qquad (1.12)$$

$$h_{me} = \frac{1}{1+\phi}\left[\left(h_{ne} + 0,5 \cdot V_{ne}^2\right) + \phi \cdot \left(h_{se} + 0,5 \cdot V_{se}^2\right)\right] - 0,5 \cdot V_{me}^2. \qquad (1.13)$$

Если координаты точки «me» не находятся на линии постоянной влажности близкой к требуемой изменяем V_{me} до получения необходимого результата. При этом варьируем величиной A_{ne}/A_{se}. Определим число Маха потока в сечении me. Для этого воспользуемся формулами:

$$M_{me} = \frac{V_{me}}{a_{me}}, \qquad (1.14)$$

$$a_{me} = \frac{a_n}{\sqrt{\left[\left(1-\beta\right) \cdot \rho_{l_me} / \rho_{g_me} + \beta\right] \cdot \left[\left(1-\beta\right) \cdot k_{g-me} / k_{l_me} + \beta\right]}}, \qquad (1.15)$$

a_n – скорость звука в газе на кривой насыщения при давлении P_{me}; k_{g-me}, k_{l_me} – показатели адиабаты диоксида углерода на линии насыщения при давлении P_{me} и удельной энтальпии h_{me} (определяем с помощью программы REFPROP.

Рассмотрим характеристики двухфазного потока в трубах и каналах. Общий массовый расход смеси жидкости и газа G_{am} (kg/s) равен $G_{am} = G_l + G_g$ и является

постоянной величиной, одинаковой в любом сечении канала. Значения массовых расходных газосодержаний лежат в пределах $0 \le x \le 1$. Массовые расходы газа G_l è G_g соответствуют объемным расходам (m^3/s) $V_l = G_l / \rho_l$ şi $V_g = G_g / \rho_g$. Их сумма $V_{am} = V_l + V_g$ является объемным расходом смеси. В отличие от массового расхода объемный расход смеси в общем случае переменен по длине эжектора и может изменяться от значения $V_{am} = G_{am} / \rho_l$ если в сечении движется только жидкость, до значения величины $V_{am} = G_{am} / \rho_g$ – если в сечении движется только газ. Массовое содержание газа (или степень сухости) "x" равна отношению массового расхода газа к массовому расходу смеси. Объемное расходное газосодержание "β"равно отношению объемного расхода газа к объемному расходу смеси:

$$x = \frac{G_g}{G_g + G_l}. \tag{1.16}$$

$$\beta = \frac{V_g}{V_g + V_l}. \tag{1.17}$$

$$\frac{1-x}{x} \cdot \frac{\rho_{me_g}}{\rho_{me_l}} = \frac{1-\beta}{\beta}. \text{[8]} \tag{1.18}$$

Следует напомнить, что в адиабатических (без подвода тепла) скачках сжатия происходит увеличение энтропии газа, а также то, что в прямом скачке уплотнения всегда сверхзвуковая скорость газа переходит в звуковую. Во многих случаях имеется два возможных решения для потока, выходящего из смесительной камеры. Первое решение – дозвуковая скорость. В этом случае условия на входе в диффузор устанавливаются равными условиям на выходе из смесительной камеры. Второе решение – это сверхзвуковое решение. Для этого случая анализ выполняется двумя способами. Сначала условия на входе диффузора устанавливаются равными условиям на выходе смесительной камеры, и производится изоэнтропический анализ для диффузора. Это решение, которое называют вторым решением, является теоретически верным и подтверждено экспериментально. Вторая методика анализа при сверхзвуковом режиме течения в смесительной камере требует использования условий Рэнкина-Гьюгонио (Rankin-Hugoniot relations) для моделирования ударной волны [1,2].

$$\rho_{me} V_{me} = \rho_{ss} V_{ss}, \tag{1.19}$$

$$P_{me} + \rho_{me} V_{me}^2 = P_{ss} + \rho_{ss} V_{ss}^2 \tag{1.20}$$

$$h_{me} + \frac{1}{2} V_{me}^2 = h_{ss} + \frac{1}{2} V_{ss}^2 \tag{1.21}$$

$$\rho_{ss} = \rho\left(P_{ss}, h_{ss}\right). \tag{1.22}$$

Состояние "ss" описывает условия на передней части скачка уплотнения. Подбор давления производится до тех пор, пока решение не сойдется. Кроме того, условия вдоль скачка предполагаются идентичными тем, которые есть на входе в диффузор.

Как только дозвуковые или сверхзвуковые условия на входе в диффузор определены, проводится изоэнтропический анализ условий на выходе диффузора.

$$V_{de} = \frac{\rho_{ss}}{\rho_{de}} \cdot \frac{A_{me}}{A_{ne}} \cdot \frac{A_{ne}}{A_{de}} \cdot V_{ss} \qquad (1.23)$$

Скорость смеси на выходе диффузора вычисляется с использованием закона сохранения энергии:

$$V_{de} = \sqrt{2\left(h_{ss} - h_{de} + 0,5 \cdot V_{ss}^2\right)}. \qquad (1.24)$$

Значения величин P_{de} и A_{de} / A_{me} выбирают таким образом, чтобы V_{de} удовлетворяло уравнениям (1.23) и (1.24). Применительно к эжектору на диоксиде углерода становится очевидным, что оптимизация давления P_{me} осуществляется путем выбора скоростей потоков на входах эжектора и его конструктивных параметров таким образом, чтобы точка с координатами h_{me} и P_{me} находилась на линии заданного массового газосодержания, находящейся под пограничной кривой, что может обеспечить заданное значение коэффициента эжекции.

Выводы

1. С целью стабилизации режима работы двухфазного эжектора на двуокиси углерода он должен быть выполнен с регулируемым соплом.
2. При расчете дозвукового эжектора для теплового насоса на диоксиде углерода в случае, когда задан коэффициент эжекции необходимо вычислять сухость смеси на выходе камеры смешения и выбирать скорости потоков на входе эжектора и его геометрические параметры, чтобы полученное значение сухости смеси на выходе из камеры смешения было близким к заданному.

Литература

1. Kandil S.M., Lear W.E., Sherif S.A. Analysis of two-phase supersonic flow in jet pumps. Proceedings of FEDSM2005 (2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition June 19-32, 2005 Houston, TX, USA, FEDSM2005-77476.
2. Lear, W.E., Sherif, S.A., Steadham, J.M., 2000, “Design Considerations of Jet Pumps with Supersonic Two-Phase Flow and Shocks for Refrigeration and Thermal Management Applications,” *International Journal of Energy Research*, Vol. 24, pp. 1373-1389.
3.Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергоиздат, 1981. – 471 с.
4. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергия, 1970.–287 с.
5.Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2003. –408 с.
6.Васильев Ю.Н.. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения. //Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1971. – Вып.5–С.175-261.

7. Спиридонов Е.К. Энергетический анализ жидкостно–газовых течений. Вестник ЮУрГУ, №1, 2003. Серия «Машиностроение», вып.1 с. 143–150.
8. Благов Э.Е. Критическое отношение давлений и критическая скорость при течении однокомпонентной вскипающей жидкости через сужающие устройства. Теплоэнергетика, 2005, №6, с.56-66.
9. Шит М.Л., Балануцэ А.П., Шит Б.М. Промышленная теплонасосная установка на диоксиде углерода с испарителями, работающими на различных температурных уровнях и при переменной нагрузке. Problemele Energeticii Regionale, N2, 2010, p.47-58.

Шит Борис Михайлович – программист Лаборатории энергоэффективности и систем управления ИЭ АНМ. Область научных интересов: проектирование систем управления в экономических и технических системах, сетевое программирование; автор или соавтор более 20 статей и одного патента. E-mail: boris_fld@rambler.ru

Приложение

Пример расчета

Рассмотрим расчет эжектора для теплового насоса, описанного в [9].

Исходные данные: коэффициент эжекции $u = 1$; $V_{pi} = 6\,m/s$, $V_{si} = 15\,m/s$.

Свойства рабочего потока:

$$h_{pi} = 251{,}88\,kJ/kg;\ \rho_{pi} = 796{,}84\,kg/m^3;\ s_{pi} = 1{,}1708\,kJ/kg;\ P_{pi} = 6{,}5\,MPa;$$

$$T_{pi} = 293\,K;\ v_{spi} = 376{,}79\,m/s.$$

Свойства эжектируемого потока:

$$h_{si} = 423{,}30\,kJ/kg;\ \rho_{si} = 141{,}81\,kg/m^3;\ s_{si} = 1{,}7804\,kJ/kg;\ P_{si} = 4{,}73\,MPa;\ T_{si} = 290\,K.$$

Подбираем P_{nt} и T_{nt} с учетом того, что процесс между состояниями „pi” и „nt” является изоэнтропическим и чтобы V_{nt} удовлетворяло уравнениям (A1.1) и (A1.2). Координаты состояния «nt» будут следующими:

$$h_{nt} = 249{,}92\,kJ/kg;\ \rho_{nt} = 642{,}84\,kg/m^3;\ s_{nt} = 1{,}1708\,kJ/kg;\ P_{nt} = 5{,}0\,MPa;\ T_{nt} = 287{,}28\,K.$$

Вычислим:

$$V_{nt} = \frac{796{,}84}{642{,}84 \cdot 0{,}1183} \cdot 6{,}0 \approx 62{,}87\,m/s \qquad \text{(A1.1)}$$

$$V_{nt} = \sqrt{2 \cdot \left((251{,}88 - 249{,}92) \cdot 1000 + 0{,}5 \cdot 6{,}0^2\right)} \approx 62{,}75\,m/s. \qquad \text{(A1.2)}$$

Принимаем: $V_{nt} = 62{,}8\,m/s$.

Как показали расчеты, значение величины V_{nt} очень чувсвительно к изменению величин h_{pi} и h_{nt} ($r = dh/h_{pi} \approx 0{,}6\%$) и поэтому должно быть стабилизировано с помощью регулируемого сопла.

Выберем давление и температуры среды на выходе из сопла и определим теплофизические свойства среды в сечении «ne».

$$P_{ne} = 4{,}59\,MPa;\ T_{ne} = 283{,}781\,K;\ \rho_{ne} = 545{,}55\,kg/m^3;\ s_{ne} = 1{,}1708\,kJ/kg;\ h_{ne} = 249{,}23\,kJ/kg;$$

$$\rho_{ne_liq} = 855{,}27\,kg/m^3;\ \rho_{ne_gas} = 138{,}77\,kg/m^3;\ h_{ne_liq} = 227{,}88\,kJ/kg;\ h_{ne_gas} = 422{,}03\,kJ/kg,$$

$$a_{ne_gas} = 204{,}80\,m/s,\ x_{ne} = 0{,}10996.$$

Скорость газа в сечении «ne»

$$V_{ne} = \sqrt{2 \cdot \left((249{,}92 - 249{,}23) \cdot 1000 + 0{,}5 \cdot 62{,}75^2\right)} \approx 72{,}9\,m/s \qquad \text{(A1.3)}$$

Определим отношение сечений A_{nt}/A_{ne} по формуле:

$$\frac{A_{nt}}{A_{ne}}=\frac{\rho_{ne}}{\rho_{nt}}\cdot\frac{V_{ne}}{V_{nt}}=\frac{545,55}{642,84}\cdot\frac{72,92}{62,74}=0,9862 \qquad \text{(A1.4)}$$

Зададимся значением коэффициента эжекции $u=1.$ По формуле (1.15) в которой индексы „me" заменены индексами „ne"(см. [8]) вычислим скорость звука в сечении „ne": $a_{ne}=106,6\,m/s.$ Так как $V_{ne}<a_{ne}$ режим работы эжектора дозвуковой.

Выберем давление в сечении $"se"$, $P_{se}=4,59\,MPa$ при условии, что $s_{si}=s_{se}=1,7804\,kJ/kg.$ Тогда скорость потока в сечении "se" будет равна:

$$V_{se}=\sqrt{2\cdot\left(\left(423,30-423,17\right)\cdot1000+0,5\cdot15,0^2\right)}\approx46,96\,m/s. \qquad \text{(A1.5)}$$

Отношение сечений A_{ne} *è* A_{se} alegem egal cu $A_{ne}/A_{se}=0,057$. Зададимся давлением $P_{me}=5,7\,MPa.$ Тогда:

$$V_{me}=\frac{\left(4,73-5,7\right)\cdot0,057-\left(4,71-5,7\right)+545,55\cdot72,92^2\cdot0,057+138,48\cdot46,96^2}{\left(1+1\right)545,55\cdot72,92\cdot0,057}\approx\ 103,79\,m/s. \qquad \text{(A1.6)}$$

$$h_{me}=\left(\begin{array}{l}\dfrac{1}{1+1}\left[\begin{array}{l}\left(249,23\cdot1000+0,5\cdot\ 72,92^2\right)+...\\1\cdot\left(422,31\cdot1000+0,5\cdot46,96^2\right)\end{array}\right]-\\-0,5\cdot103,79^2\end{array}\right)/1000=\ 332,26\,kJ/kg. \qquad \text{(A1.7)}$$

При значении величины P_{me}, выбранном ранее и вычисленным значением величины h_{me} изменяем P_{me} таким образом, чтобы $\left|x_{me}-x_{me_pr}\right|=\min$. Если новое значение P_{me} отличается от предыдущего, снова вычисляем V_{me}, h_{me}, x_{me} и повторяем расчет до тех пор, пока разница выбранного и вычисленного значений P_{me} не будет минимальной. В соответствии с программой REFPROP $s_{me}=1,4486\,kJ/kg, x_{me}=0,5035,\ \ a_{me_gas}=196,34\,m/s.$

Вычислим значение величины β_{me}.

$$\beta_{me}=s_{me}/\left(1+s_{me}\right)=1,4486/\left(1+1,4486\right)=0,8034. \qquad \text{(A1.8)}$$

Вычислим критическую скорость звука по формуле:

$$a_{me}=\frac{196,34}{\sqrt{\left[\left(1-\ 0,8034\right)\cdot\ 805,96/171,07+\ 0,8034\right]}\cdot}...$$

$$....\frac{}{\cdot\sqrt{\left[\left(1-\ 0,8034\right)\cdot4,1715/\ 4,1884+\ 0,8034\right]}}\approx155,38\,m/s, \qquad \text{(A1.9)}$$

где $a_{me_s}=196,34$ представляет собой скорость звука в газе на линии насыщения.

Проверяем выполнение условия $V_{ne} < a_{ne}$. Если скорость смеси меньше скорости звука, возвращаемся в начало расчета и изменяем или геометрические параметры эжектора или скорости сред на входе в эжектор. Так как критическая скорость звука, вычисленная по формуле (А1.9) больше скорости V_{me}, вычисленной по формуле (А1.9), то режим течения является дозвуковым и вычисление чисел Фабри не требуется. Тем не менее, вычисление чисел Фабри показало, что при выбранных параметрах эжектора запирание потока не происходит.

CALCULUL EJECTORULUI BIFAZIC AL POMPEI DE CĂLDURĂ PE DIOXID DE CARBON

Şit B.

Institutul de Energetică a Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. Este prezentat calculul ejectorului bifazic pentru pompa de căldură pe dioxid de carbon. Metoda se bazează pe metoda, elaborată de S. Kandil, W. Lear, S. Sherif, modificată luând în consideraţie valoarea prescrisă a coefiţientului de ejecţie.
Cuvinte-cheie: ejector bifazic, dioxid de carbon, pompa de căldură.

РАСЧЕТ ДВУХФАЗНОГО ЭЖЕКТОРА НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА ДЛЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА

Шит Б.М.

Аннотация. Приведен расчет двухфазного эжектора для теплового насоса на диоксиде углерода. Метод расчета базируется на методе, разработанном S.M. Kandil, W.E. Lear, S.A. Sherif, модифицированным с учетом требования задания коэффициента эжекции.
Ключевые слова: двухфазный эжектор, диоксид углерода, тепловой насос.

TWO-PHASE EJECTOR of CARBON DIOXIDE HEAT PUMP CALCULUS

Sit B.

Abstract. It is presented the calculus of the two-phase ejector for carbon dioxide heat pump. The method of calculus is based on the method elaborated by S.M. Kandil, W.E. Lear, S.A. Sherif, and is modified taking into account entrainment ratio as the input for the calculus.
Keywords: two-phase ejector, carbon dioxide, heat pump.

Introducere

Problemele de calcul ale ejectoarelor bifazice „lichid-gaz” sunt actualizate în multe lucrări ştiinţifice. Acestea sunt lucrările lui Kandil S. [1], Lear W. [2], Deici M. [3], Sokolov E. şi Zinger N. [4], Ţegelskii V [5], Vasiliev Iu.[6], Spiridonov E. [7] şi multe altele.

În lucrările [1,2] este prezentată metodologia calculului ejectorului supersonic bifazic, când sunt prescrise presiunea la ieşirea ejectorului şi parametrii constructivi al ejectorului, însă nu este descris cazul, când este prescris coeficientul de ejecţie şi se cere de asigurat presiunea maximală la ieşirea ejectorului. În lucrările [3,4] lipsesc metodele de calcul ale ejectoarelor, când mediul la ieşire din ajutaj este bifazic şi la parametrii termofizice variabile ai mediului de lucru şi ejectat. În lucrările [6, 7] calcului ejectorului se prezintă cu condiţia că procesul în ejector este izotermic.

Problema, legată cu calcului ejectorului bifazic în condiţiile procesului izentropic înăuntrul lui, când este prescris coeficientul de ejecţie şi concomitent se cere asigurarea presiunii maxime la ieşirea din ejector, încă nu a fost cerecetată.

Pentru calculul ejectorului bifazic noi am utilizat metodologia, expusă în [1,2], pentru că ea este elaborată pentru calculul ejectoarelor bifazici. În procesul de calcul a fost utilizată aplicaţia REFPROP 7 (elaborat de “American National Institute of Standarts” (NIST)).

Calculul ejectorului

În Fig. 1 este prezentată schema ejectorului. În construcţia ejectorului se disting următoarele părţi principale: ajutajul pentru agentul de presiune ridicată (numit şi agent

motor), camera de admisie, in care intră agentul motor destins in ajutajul şi in care este aspirat agentul ejectat (cel cu presiune ridicată), camera de amestec şi difuzorul.

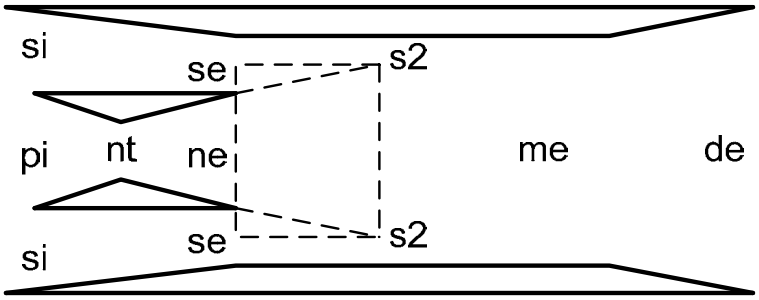


Fig. 1 Schema ejectorului

În ajutajul agentul motor se destinde pină la presiunea minimă din ejector majorând energie cinetică a acestui flux. Fluxul motor bifazic cu presiune ridicată, care iese din ajutaj atrage fluxul de CO_2 gazos din evaporator. În timpul acestui proces fluxul ejectat se accelerează, fiindcă secțiunea pentru trecerea fluxului se ridică de la partea de intrare pînă la secția de amestec. Odată cu creşterea vitezei de CO_2 gazos presiunea în secție de amestec este mai joasă decăt presiunea în evaporator. În secție de amestec fluxurile din ajutaj şi din evaporaror se amestecă şi presiunea creşte. În difuzor viteză scade şi energia cinetică se transformă în energia de presiune.

La efectuarea calculelor vom utiliza metodologia, elaborată în [1]. Modificarea metodologiei [1] constă în faptul, că la determinarea presiunii la ieşire a camerei de amestecare şi a entalpiei fluxului la ieşire din cameră, alegem coordonatele parametrilor de stare a fluxului amestecat la ieşirea din cameră la curba de uscăciune constantă, care se află sub curba de saturație. Concomitent alegem aşa o presiune la ieşire din camera de amestecare ca să excludem apariția condițiilor de blocaj a fluxului şi să asigurăm COP-ul maxim al pompei de căldură.

Pentru a obține parametrii fluxului în secțiunea critică a ajutajului să alegem o presiune în el, P_{nt} şi presupunem că fluxul este izoentropic. Pe bază legii de menținere a masei obținem:

$$V_{nt} = \frac{\rho_{pi} A_{pi}}{\rho_{nt} A_{nt}} \cdot V_{pi}, \tag{1.1}$$

$$V_{nt} = \sqrt{2\left(h_{pi} - h_{nt} + 0,5 \cdot V_{pi}^2\right)} \tag{1.2}$$

Să alegem valoarea $dh_1 = h_{pi} - h_{nt}$ şi de valoarea presiunii în secțiunea critică pînă atunci numărul lui Mach în secțiune „nt” să fie mai mică ori egală cu 1 (regim de funcționare subcritic). Să presupunem că procesul de trecere din starea „pi” în starea „nt” este izentropic şi $s_{pi} = s_{nt}$. Parametrii mediului la ieşirea din ajutaj se calculează, utilizând equații de conservare a energiei pentru acest proces.

Să prescriem valorile vitezelod V_{pi} *şi* V_{si}, reieşind din puterea termică a pompei de căldură la căldură şi la frig. Să determinăm A_{pi}/A_{nt} din condiție că viteză V_{nt} în secțiunre „nt” corespunde equații (1.1) şi (1.2).

Viteza mediului la ieşire din ajutaj se calculează prin formula:

$$V_{ne} = \sqrt{2\left(h_{nt} - h_{ne} + 0,5 \cdot V_{nt}^2\right)}. \tag{1.3}$$

Să determinăm raportul al suprafețelor A_{nt}/A_{ne} din equație:

$$\frac{A_{nt}}{A_{ne}} = \frac{\rho_{ne}}{\rho_{nt}} \cdot \frac{V_{ne}}{V_{nt}}. \tag{1.4}$$

Equație 1.3 se deduc din equație (1.5).

$$h_{ne} + \frac{1}{2} \cdot V_{ne}^2 = h_{nt} + \frac{1}{2} \cdot V_{nt}^2, \tag{1.5}$$

Ulterior, după entalpia calculată în camera de amestec h_{me} şi după valoarea prescrisă a parametrului x_{me_pr} alegem P_{me} cu condiție, că $x_{me} \approx x_{me_pr}$.

Condițiile de blocaj a fluxului la intrare a ejectorului să calculam prin formula:

$$u_{in} = \frac{\rho_{se} V_{se} A_{se}}{\rho_{ne} V_{ne} A_{ne}}. \tag{1.6}$$

Primul loc poate să se întâmple blocajul fluxului este secțiunea "se" (fig.1). În acest loc blocaj fluxului poate avea loc în caz dacă contrapresiunea se micşorează şi viteza V_{se} ajunge valoare vitezei vântului. Acest regim se numeşte „regimul supersonic saturat”. În acest caz se modifică presiunea P_{se} cu scopul atingerii valorii presiunii de frecare P_{si}. În acest caz fluxul primar se extinde în cameră de amestecare ca fluxul secundar ejectat să se accelereze. În acest caz viteză fluxului ejectat nu mai depinde de condițiile de-a lungul fluxului. Analiza următoare se efectuează pentru calculul al ϕ_{Fabri}. Equațiile momentelor pentru volumul de control (fig.1) au fomra următoare:

$$\phi_{Fabri} = \frac{\left(P_{se} + P_{ne}\frac{A_{ne}}{A_{se}} - P_{s2}\frac{A_{s2}}{A_{se}} - P_{n2}\frac{A_{n2}}{A_{ne}}\frac{A_{ne}}{A_{se}}\right)}{\rho_{ne} V_{ne}\frac{A_{ne}}{A_{se}}\left(V_{s2} - S_{se}\right)} - \frac{V_{n2} - V_{ne}}{V_{s2} - V_{se}}. \tag{1.7}$$

Procesul de iterații se începe de la alegetea valorii P_{se}, ştiind, că $s_{se} = s_{si}$, ce determină starea "se". Din equațiea energiei urmează:

$$V_{se} = \sqrt{2\left(h_{si} - h_{se}\right)}. \tag{1.8}$$

Atunci ϕ_{Fabri} poate fi calculat, ca:

$$\phi_{Fabri} = \frac{\rho_{se} V_{se} A_{se}}{\rho_{ne} V_{ne} A_{ne}}. \tag{1.9}$$

În caz, când vom stabili o condiție $s_{s2} = s_{si}$ şi vom seta presiunea P_{s2}, starea "$s2$" va fi determinată în mod intergral. Viteză V_{s2} se calculează în conformitate cu următoarea equație:

$$V_{s2} = \sqrt{2\left(h_{se} - h_{s2} + 0,5 \cdot V_{se}^2\right)}. \tag{1.10}$$

Presiunea P_{s2} trebuie să fie aleasă astfel încât viteză V_{s2} să atingă valoarea vitezei vântului.

Dacă valoarea coeficientului de ejecție este mai mică decât cea mai mică dintre valorile, stabilite în rezultatul analizei blocajului (anume când ejectorul funcționează în regim mixt) se utilizează următoarea analiza, cu scopul determinării presiunii la ieşire din cameră de amestecare.

Cu acest scop să definim valoarea P_{se}, atunci $s_{si} = s_{se}$ atunci şi starea de gaz la intrare în camera de amestecare este complet definită. Calculăm V_{se} prin formula:

$$V_{se} = \sqrt{2\left(h_{si} - h_{se} + 0,5 \cdot V_{si}^2\right)}. \tag{1.11}$$

După aceasta stabilim presiunea P_{me}, cu scopul calculării de V_{me}.

$$V_{me} = \frac{\left(P_{ne} - P_{me}\right)\frac{A_{ne}}{A_{se}} - \left(P_{se} - P_{me}\right) + \rho_{ne} V_{ne}^2 \frac{A_{ne}}{A_{se}} + \rho_{se} V_{se}^2}{\left(1+\phi\right)\rho_{ne} V_{ne} \frac{A_{ne}}{A_{se}}}. \tag{1.12}$$

$$h_{me} = \frac{1}{1+\phi}\left[\left(h_{ne} + 0,5 \cdot V_{ne}^2\right) + \phi \cdot \left(h_{se} + 0,5 \cdot V_{se}^2\right)\right] - 0,5 \cdot V_{me}^2. \tag{1.13}$$

La valoarea variabilei P_{me} aleasă anterior şi valoarea caclulată a h_{me} modificăm P_{me} aşa, ca $\left|x_{me} - x_{me_pr}\right| = \min$. Dacă valoarea nouă P_{me} diferă de valoarea precedentă calculăm din nou V_{me}, h_{me}, x_{me} şi repetăm calculele până diferența între valorile alese şi calculate ale P_{me} nu va fi minimă. Pentru schimbarea V_{me} operăm cu relația A_{ne}/A_{se}. Să calculăm numărul lui Mach al fluxului în secțiunea „me”. Cu acest scop utilizăm formulele:

$$M_{me} = \frac{V_{me}}{a_{me}}, \tag{1.14}$$

$$a_{me} = \frac{a_n}{\sqrt{\left[(1-\beta)\cdot \rho_{l_me}/\rho_{g_me} + \beta\right]\cdot\left[(1-\beta)\cdot k_{g-me}/k_{l_me} + \beta\right]}}, \qquad (1.15)$$

a_n – viteza sunetului la curba de saturație sub presiunea P_{me}; k_{g-me}, k_{l_me} – indicile adiabatic al dioxidului de carbon pe curba de saturație sub presiunea P_{me} şi entalpia specifică h_{me} (calculăm prin intermediul REFPROP). Verificăm efectuarea condiției $V_{ne} < a_{ne}$ Dacă viteza amestecului este mai mică decât viteza sunetului, ne întoarcem la începutul calculului şi măsurăm caracteristicile geometrice ale ejectorului sau vitezele mediilor la intrarea în ejector.

Să examinăm caracterisiticle fluxului bifazic în tăvi şi în canalele. Debit masic al amestecului „lichid-gaz” G_{am} (kg/s) este egal cu $G_{am} = G_l + G_g$ şi prezintă o valoare constantă, egală în oricare loc al canalului. Valorile ale debitelor de masa de gaz sunt în limitele $0 \le x \le 1$. Debitele de masă G_l şi G_g corespund debitelor volumurilor (m^3/s) $V_l = G_l / \rho_l$ şi $V_g = G_g / \rho_g$. Suma lor $V_{am} = V_l + V_g$ se numeşte debit de volum al amestecului. Spre deosebire de debitul de masă debitul de volum în caz general este variabil de-a lungul ejectorului şi poate să se schimbe de la valoarea $V_{am} = G_{am} / \rho_l$ în caz dacă spre secțiune se mişcă numai lichid, pînă la valoare $V_{am} = G_{am} / \rho_g$ – dacă spre secțiune curge numai gaz. Conținutul de masă de gaz (ori gradul de uscăciune) "x" este egal cu raport al debitului de masă de gaz la debitul de masă al amestecului. Conținutul de volum de gaz "β" este egal cu raport al debitului de volum de gaz la debitul de volum al amestecului.

$$x = \frac{G_g}{G_g + G_l}. \qquad (1.16)$$

$$\beta = \frac{V_g}{V_g + V_l}. \qquad (1.17)$$

$$\frac{1-x}{x}\cdot\frac{\rho_{me_g}}{\rho_{me_l}} = \frac{1-\beta}{\beta}. \text{ [8]} \qquad (1.18)$$

Trebuie să reamintim, că în salturi adiabatice de compresie (fără aportul de căldură) are loc creşterea entropiei gazului, şi deasemenea faptul că în salt de compresie întodeauna viteza supersonică se transformă în viteză sonică. În multe cazuri există două soluții posibile pentru fluxul, care iese din cameră de amestecare. Prima soluție – viteza sonică. În acest caz condițiile la intrare în difuzor se stabilesc egale cu condițiile la ieşire din camera de amestecare. Cea de-a doua soluție este o soluție supersonică. Pentru acest caz analiza se efectuează prin două metode. În primul rând condițiile la intrare în difuzor se stabilesc egale cu condițiile la ieşire a camerei de amestecare şi se efectuează analiza isoentropică pentru difuzor. Această soluție care se numeşte „a doua soluție” este o soluție justificată teoretic şi este confirmată experimental. Însă funcționarea ejectorului în cazul acestei soluții este, cel puțin, dificilă. Funcționare în acest regim cere implementarea geometriei optime a ejectorului şi condiții de pornire complicate [1,2]. A doua soluție este mai realistă şi poate fi obținută la curgerea supersonică în camera de amestecare şi cere utilizarea condițiilor lui Rankin-Hugoniot pentru modelatea undei de şoc.

$$\rho_{me} V_{me} = \rho_{ss} V_{ss}, \tag{1.19}$$

$$P_{me} + \rho_{me} V_{me}^2 = P_{ss} + \rho_{ss} V_{ss}^2 \tag{1.20}$$

$$h_{me} + \frac{1}{2} V_{me}^2 = h_{ss} + \frac{1}{2} V_{ss}^2 \tag{1.21}$$

$$\rho_{ss} = \rho\left(P_{ss}, h_{ss}\right). \tag{1.22}$$

Starea "ss" descrie condiții pe prima parte a saltului de compresie. Selecțiea presiunii se indeplineşte pînă la momentul în care soluția nu se mai converge. În afară de această, se presupune că condițiile de-a lungul saltului vor fi identice celor la ieşire a ejectorului. Îndată ce condițiile subsonice ori supersonice la intrare în difuzor sunt determinate, se efectuează analiza izentropică la ieşire din difuzor.

$$V_{de} = \frac{\rho_{ss}}{\rho_{de}} \cdot \frac{A_{me}}{A_{ne}} \cdot \frac{A_{ne}}{A_{de}} \cdot V_{ss} \tag{1.23}$$

Viteza la ieşire din difuzor se calculează cu utilizarea legii de conservare a energiei:

$$V_{de} = \sqrt{2\left(h_{ss} - h_{de} + 0,5 \cdot V_{ss}^2\right)} \tag{1.24}$$

Marimi ale valorilor P_{de}, A_{me} se alege pînă atunci V_{de} va corespunde equații (1.21) şi (1.24).

Referitor la ejector pe dioxid de carbon devine evident, că optimizarea presiunii P_{me} se efectuează prin alegerea valoruii lui în aşa mod, încât punctul cu coordonatele h_{me} şi P_{me} să se afle pe linia a conținutului constat al masei de gaz, care se află sub curba de saturație. În aşa mod este posibil de asigurat realizarea coeficientului de ejecție prescrisă, care în acest caz corespunde cu coeficientul conținutului de masă de gaz.

Concluzii

1. Cu scopul de stabilizare a regimului de lucru al ejectorului bifazic pe dioxid de carbon el trebuie sa aibă un ajutaj reglabil.
2. La calculul ejectorului sonic pentru pompă de căldură la alegerea în datele inițiale a valorilii coeficientului de ejecție este necesar de calculat uscăciunea necesară a amestecului în camera de amestecare si de ales caracteristicile geometrice ale ejectorului şi de asemănea viteza fluxurilor la intrări ale ejectorului în aşa fel, ca în rezultatul calculului uscăciunea amestecului în camera de amestec să coincidă cu valoarea prescrisă.

Bibliografie

1. Kandil S.M., Lear W.E., Sherif S.A. Analysis of two-phase supersonic flow in jet pumps. Proceedings of FEDSM2005 (2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition June 19-32, 2005 Houston, TX, USA, FEDSM2005-77476.

2. Lear, W.E., Sherif, S.A., Steadham, J.M., 2000, “Design Considerations of Jet Pumps with Supersonic Two-Phase Flow and Shocks for Refrigeration and Thermal Management Applications,” *International Journal of Energy Research*, Vol. 24, pp. 1373-1389.
3.Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергоиздат, 1981. – 471 с.
4. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергия, 1970.–287 с.
5.Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2003. –408 с.
6.Васильев Ю.Н.. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения. //Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1971. – Вып.5–С.175-261.
7. Спиридонов Е.К. Энергетический анализ жидкостно–газовых течений. Вестник ЮУрГУ, №1, 2003. Серия «Машиностроение», вып.1 с. 143–150.
8. Благов Э.Е. Критическое отношение давлений и критическая скорость при течении однокомпонентной вскипающей жидкости через сужающие устройства. Теплоэнергетики, 2005, №6, с.56-66.
9. Шит М.Л., Балануцэ А.П., Шит Б.М. Промышленная теплонасосная установка на диоксиде углерода с испарителями, работающими на различных температурных уровнях и при переменной нагрузке. Problemele Energeticii Regionale, N2, 2010, p.47-58.

Informații despre autor

Șit Boris – inginer Laboratorului „Eficiență energitică și sisteme de dirijare” al IE AȘM. Aria intereselor stiintifice: proiectarea sistemelor de dirijare in sistemele tehnice si economice, network programming; autor ori coautor a mai mult de 20 de lucrari si a unui patent. E-mail: boris_fld@rambler.ru

Supliment.

Exemplu de calcul

Mai departe se prezintă calculul ejectorului pentru pompa de căldură descrisă în [9].

Datele inițiale: coeficientul de ejecție (raportul fluxului ejectat la flux motor) $u = 1$;
$V_{pi} = 6\,m/s,\ V_{si} = 15\,m/s.$

Proprietățile ale fluxului motor:
$h_{pi} = 251{,}88\,kJ/kg; \rho_{pi} = 796{,}84\,kg/m^3; s_{pi} = 1{,}1708\,kJ/kg; P_{pi} = 6{,}5\,MPa;$
$T_{pi} = 293\,K; v_{spi} = 376{,}79\,m/s.$

Proprietățile ale fluxului ejectat:
$h_{si} = 423{,}30\,kJ/kg; \rho_{si} = 141{,}81\,kg/m^3; s_{si} = 1{,}7804\,kJ/kg; P_{si} = 4{,}73\,MPa; T_{si} = 290\,K.$

Să cautăm P_{nt} și T_{nt} reieșind din condiție, că procesul între stare „pi” și stare „nt” este izentropic și mărimea valorii V_{nt} va corespunde equații (A1.1) și (A1.2). Coordonatele stării „nt” vor fi:

$$h_{nt} = 249{,}92\,kJ/kg; \rho_{nt} = 642{,}84\,kg/m^3; s_{nt} = 1{,}1708\,kJ/kg; P_{nt} = 5{,}0\,MPa; T_{nt} = 287{,}28\,K.$$

Calculăm:

$$V_{nt} = \frac{796{,}84}{642{,}84 \cdot 0{,}1183} \cdot 6{,}0 \approx 62{,}87\,m/s \qquad \text{(A1.1)}$$

$$V_{nt} = \sqrt{2 \cdot \left((251{,}88 - 249{,}92) \cdot 1000 + 0{,}5 \cdot 6{,}0^2\right)} \approx 62{,}75\,m/s. \qquad \text{(A1.2)}$$

Acceptăm $V_{nt} = 62{,}8\,m/s$.

Este evident, că valoarea V_{nt} este foarte sensibilă la schimbare valorii h_{pi} şi h_{nt} ($r = dh / h_{pi} \approx 0,6\%$) şi deaceea trebuie să fie stabilizată cu ajutorul ajutajului reglabil.

Să alegem presiunea şi temperatura mediului la ieşirea ajutajului şi să determinăm caracteristicile termofizice ale mediului. Este evident, că fluxul la işirea ajutajului este bifazic.

$$P_{ne} = 4,59 MPa; T_{ne} = 283,781 K; \rho_{ne} = 545,55\, kg / m^3; s_{ne} = 1,1708\, kJ / kg; h_{ne} = 249,23\, kJ / kg;$$
$$\rho_{ne_liq} = 855,27\, kg / m^3; \rho_{ne_gas} = 138,77\, kg / m^3; h_{ne_liq} = 227,88\, kJ / kg; h_{ne_gas} = 422,03\, kJ / kg,$$
$$a_{ne_gas} = 204,80\, m / s, x_{ne} = 0,10996.$$

Viteza gazului în secțiunea «ne»

$$V_{ne} = \sqrt{2 \cdot \left((249,92 - 249,23) \cdot 1000 + 0,5 \cdot 62,75^2 \right)} \approx 72,9\, m / s \quad \text{(A1.3)}$$

Să determinăm raportul secțiunilor A_{nt} / A_{ne} după formula:

$$\frac{A_{nt}}{A_{ne}} = \frac{\rho_{ne}}{\rho_{nt}} \cdot \frac{V_{ne}}{V_{nt}} = \frac{545,55}{642,84} \cdot \frac{72,92}{62,74} = 0,9862 \quad \text{(A1.4)}$$

Să alegem valoarea coeficientului de ejecție $u = 1$. Prin formula (1.15) unde indicile „me” sunt înlocuite de indicile „ne”(vezi [8]) calculăm viteza sunetului în secțiune „ne”: $a_{ne} = 106,6\, m / s$. Deoarece $V_{ne} < a_{ne}$ regimul de funcționare a ejectorului este subsonic.
Alegem presiunea în secțiunea $"se", P_{se} = 4,59\, MPa$ și condiția $s_{si} = s_{se} = 1,7804\, kJ / kg$. Atunci viteza fluxului în secțiunea “se” va fi egală cu:

$$V_{se} = \sqrt{2 \cdot \left((423,30 - 423,17) \cdot 1000 + 0,5 \cdot 15,0^2 \right)} \approx 46,96\, m / s. \quad \text{(A1.5)}$$

Raportul secțiunilor A_{ne} ê A_{se} alegem egal cu $A_{ne} / A_{se} = 0,057$. Alegem presiunea $P_{me} = 5,7\, MPa$.

Atunci:

$$V_{me} = \frac{(4,73 - 5,7) \cdot 0,057 - (4,71 - 5,7) + 545,55 \cdot 72,92^2 \cdot 0,057 + 138,48 \cdot 46,96^2}{(1+1) 545,55 \cdot 72,92 \cdot 0,057} \approx 103,79\, m / s. \quad \text{(A1.6)}$$

$$h_{me} = \left(\frac{1}{1+1} \left[\begin{array}{l} \left(249,23 \cdot 1000 + 0,5 \cdot 72,92^2\right) + \ldots \\ 1 \cdot \left(422,31 \cdot 1000 + 0,5 \cdot 46,96^2\right) \end{array} \right] - \begin{array}{l} \\ \\ -0,5 \cdot 103,79^2 \end{array} \right) / 1000 = 332,26\, kJ / kg. \quad \text{(A1.7)}$$

La valoarea variabilei P_{me} aleasă anterior şi valoarea caclulată a h_{me} modificăm P_{me} aşa, ca $\left| x_{me} - x_{me_pr} \right| = \min$. Dacă valoarea nouă P_{me} diferă de valoarea precedentă calculăm din nou V_{me}, h_{me}, x_{me} şi repetăm calculele până diferența între valorile alese şi calculate ale P_{me} nu va fi minimă. În conformitate cu aplicarea REFPROP $s_{me} = 1,4486\, kJ / kg, x_{me} = 0,5035,$

$a_{me_gas} = 196,34\, m/s.$ Să calculăm valoarea β_{me}.

$$\beta_{me} = s_{me} / (1 + s_{me}) = 1,4486 / (1 + 1,4486) = 0,8034. \qquad \text{(A1.8)}$$

Să calulăm viteza critică a sunetului după formula:

$$a_{me} = \frac{196,34}{\sqrt{\left[(1 - 0,8034) \cdot 805,96/171,07 + 0,8034\right]} \cdot} \ldots$$

$$\ldots \frac{}{\cdot \sqrt{\left[(1 - 0,8034) \cdot 4,1715/4,1884 + 0,8034\right]}} \approx 155,38\, m/s. \qquad \text{(A1.9)}$$

Unde valoare $a_{me_s} = 196,34$ prezintă viteza sunetului în gaz pe curba de saturație.

Verificăm efectuarea condiției $V_{ne} < a_{ne}$ Dacă viteza amestecului este mai mică decât viteza sunetului, ne întoarcem la începutul calculului şi măsurăm caracteristicile geometrice ale ejectorului sau vitezele mediilor la intrarea în ejector. Datorită faptului, că valoarea vitezei critice a sunetului, calculată după formula (A1.9) este mai mare decât V_{me}, ejectorul lucrează în regimul subsonic şi calcului numarului Fabri nu este necesar. Însă calculul numarului Fabri a arătat ca inchiderea fluxui la intrare si iesire in condițiile parametrilor de lucru alese ale ejectorului nu are loc.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОВЫШЕННОЙ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

В.М. Постолатий
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. Выполнено моделирование вариантов энергосистем, содержащих линии электропередачи повышенной натуральной мощности. Проведены расчеты режимов линий электропередачи и протекающих по ним потоков мощности при фазовом управлении. На конкретных примерах энергосистем исследованы зависимости величин потоков мощности по линиям электропередачи напряжением 220, 400, 500 кВ от изменения углового сдвига векторов напряжений, вводимого с помощью фазоповоротных устройств.
Ключевые слова: энергосистема, компактные и управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи, потоки мощности, фазовое управление, фазоповоротные устройства.

EFICIENȚA UTILIZĂRII REGLAJULUI DE FAZĂ CU REGIMURILE LINIILOR DE TRANSPORT A ENERGIEI ELECTRICE CU CAPACITATE DE TRAFIC SPORITĂ

V.Postolatii
Institutul de Energetică al AŞM

Adnotare. A fost efectuată modelarea variantelor sistemelor energetice cu linii de transport a energiei electrice cu capacitate de trafic sporită. Au fost efectuate calculele regimurilor liniilor electrice şi a fuxurilor de putere ce trec la reglare (dirijare) de fază. În baza exemplelor concrete a sistemelor energetice s-au studiat dependențele valorilor fluxurilor de putere prin liniile elctrice de tensiunea 220, 400, 500 kV în raport de modificarea decalajului unghiului vectorilor tensiunilor, indus prin utilizarea instalațiilor de reglare a decalajului de fază.
Cuvinte–cheie: sistem energetic, linii electrice dirijate compacte cu autocompensare, fluxuri de putere, reglare de fază, instalații de reglare a decalajului de fază.

EFFICIENCY OF APPLICATION OF PHASE CONTROL OF ELECTROTRANSMISSION OF HIGH NATURAL POWER CAPACITY

V.M. Postolaty
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. Modeling of power systems, containing a transmission line of high natural power. There are calculated modes of transmission lines and flowing through them power flows at the phase control. There are studied at specific examples of energy systems dependencies of values of fluxes of power along lines of 220,400,500 kV from the angular shift of vectors of voltages which are imposed by phase rotation devices.
Key words: power system, compact transmission line, controlled selfcompensating transmission line, power flow, phase controlled , phase controlling devices .

Введение.

Одной из актуальных задач развития и эффективного функционирования современных электроэнергетических систем является обеспечение заданной пропускной способности электрических сетей, их управляемости, регулирования потоков мощности и параметров режима, что в итоге преследует цель достижения требуемых технических и экономических показателей энергосистем.

Эффективным средством решения указанных задач может служить применение линий электропередач нового типа - (ВЛ) повышенной натуральной мощности – компактных в одноцепном и многоцепном исполнении и управляемых двухцепных и многоценных самокомпенсирующихся ВЛ (сокращенно – УСВЛ) с использованием фазового управления режимами [1-7].

Достоинством электропередач нового типа является повышенная в 1,2-1,6 раза величина натуральной мощности и качественно новые свойства, которые могут быть использованы для улучшения технических характеристик энергосистем и достижения

более высоких их экономических показателей по сравнению с применением традиционных ВЛ.

Повышенная величина натуральной мощности достигается за счет новых конструкций линий и их элементов, а новые режимные качества, за счет фазового регулирования, применяемого совместно с традиционными способами регулирования параметров режимов, в том числе с современными устройствами типа FACTS. Комплекс указанных новых технических решений может быть использован для реализации идей создания интеллектуальных электроэнергетических систем с активно-адаптивными электрическими сетями [8].

Настоящая статья посвящена анализу эффективности применения фазового управления параметрами линий электропередач нового типа, а также режимными параметрами сложных электроэнергетических систем, в частности регулирования потоков мощности в замкнутых контурах энергосистем.

Показатели эффективности фазового управления.

Эффективность фазового управления в электроэнергетических системах может быть оценена по ряду показателей.

Основными из них являются:

- отношение величины установленной мощности фазоповоротных устройств к значению передаваемой мощности;
- чувствительность ВЛ к фазовому управлению, выражаемую в виде отношения величины изменения передаваемой по линиям электропередачи мощности на каждый градус поворота вектора выходного напряжения относительно входного;
- быстродействие фазоповоротных устройств и возможность применения их для регулирования стационарных, аварийных и послеаварийных режимов;
- возможность осуществления регулирования перетоков мощности по линиям электропередачи не только по величине, но и по направлению;
- получение качественно новых свойств электропередач и энергосистем при комплексном применении фазоповоротных устройств в сочетании с другими средствами регулирования (управляемыми реакторами – УШР, статическими компенсаторами реактивной мощности – СТК и др.);
- стоимостные показатели фазорегулирующих устройств в сопоставлении с другими средствами аналогичного регулирования параметров режимов электропередач и энергосистем.

Оценка эффективности фазового управления в энергосистемах по всему комплексу приведенных показателей является достаточно сложной задачей, так как часть из них определяется расчетными условиями, характерными для конкретных вариантов структур энергосистем, а также постановкой тех или иных приоритетных целей.

В настоящей статье рассматриваются возможности и эффективность фазового управления для регулирования потоков мощности по линиям электропередачи, в том числе ВЛ нового типа, в нормальных установившихся режимах.

Эффективность применения фазового управления наиболее наглядно может быть показана на конкретных примерах электропередач с использованием фазоповоротных устройств (ФПУ) и результатах соответствующих расчетов режимов ряда энергосистем.

Одними из главных являются вопросы о типах фазоповоротных устройств, их электрических параметрах и других показателях, принимаемых в практике оценки энергетического оборудования.

Параметры схемы замещения фазоповоротных устройств для моделирования нормальных установившихся режимов.

Основными параметрами схемы замещения фазоповоротного устройства трансформаторного типа (ФПУ) для расчета установившихся режимов являются продольное активное и индуктивное сопротивления, которые аналогично, как и для двухобмоточных трансформаторов, может быть определено по формулам [10-11]:

$$R_T = \Delta P_K \cdot \left(\frac{U_{Вном}^2}{S_{Тном}^2} \right) \quad ; \qquad (1)$$

$$X_T = U_K \cdot \left(\frac{U_{Вном}^2}{S_{Тном}^2} \right) \quad . \qquad (2)$$

В приведенных выражениях:

$\boldsymbol{\Delta P_K}$ – потери короткого замыкания (кВт);

$\boldsymbol{U_{Вном}}$ – номинальное напряжение высшей обмотки (кВ);

$\boldsymbol{S_{Тном}}$ – номинальная мощность (МВА);

$\boldsymbol{U_K}$ – напряжение короткого замыкания (% от номинального).

Поперечные проводимости (активная - $\boldsymbol{g_T}$ и реактивная -$\boldsymbol{в_T}$) обычно не учитываются из-за их малости.

Для примера рассмотрим в качестве варианта двухобмоточный трансформатор (аналог ФПУ) мощностью $S_{ном}$=250 МВА напряжением 242 кВ, с параметрами U_K =11%, ΔP_K =650 кВт.

Выполненные по формулам (1), (2) с использованием указанных исходных данных расчеты дают следующие значения активного и реактивного сопротивлений двухобмоточного трансформатора, принятого в качестве аналога фазоповоротного устройства, а именно:

$R_{ФРТ}$ =0,6 Ом, $X_{ФРТ}$ = 25,7 Ом.

Полученные значения сопротивлений совпадают с паспортными величинами, приведенными в справочной литературе [12] для двухобмоточного траснформатора напряжением 242 кВ мощностью 250 МВА.

В принципе, при использовании этого подхода параметры ФРТ можно принимать по данным [12], как для двухобмоточных трансформаторов соответствующих классов напряжения. Принятый подход позволяет выполнять расчеты, которые позволяют на качественном уровне оценить эффективность применения указанных устройств в энергосистемах. Следует, однако, отметить, что каждый тип фазоповоротных устройств с конкретным диапазоном регулирования и конкретными функциональными возможностями будет иметь параметры, в той или иной мере отличающиеся от параметров аналогичных по мощности двухобмоточных трансформаторов.

Ниже на ряде примеров энергосистем показана эффективность применения фазоповоротных устройств, устанавливаемы на ВЛ нового типа напряжением 220, 400, 500 кВ.

Результаты исследования эффективности применения фазового управления на примере ВЛ-220,400,500 кВ.

В ранее выполненной работе [9] были рассмотрены варианты применения фазорегулирующих устройств для управления потоками мощности по межсистемной связи между энергосистемами Молдовы и Румынии, принятой в расчетах в виде одноцепной ВЛ-400 кВ обычной конструкции.

Суть проблемы состояла в следующем. Схемой предусматривалось сооружение ВЛ-400 кВ между п/ст 330 Бельцы (Молдова) и п/ст 400кВ Сучава (Румыния) длиной 128 км. При этом необходимо было предусмотреть автотрансформаторную связь, между существующей на п/ст Бельцы системой шин 330 кВ и вновь создаваемой системой шин 400 кВ на этой же подстанции. К шинам 400 кВ на п/ст Бельцы предусматривалось подключение планируемой новой ТЭЦ мощностью 450 МВт и передача данной мощности в энергосистему Румынии по ВЛ -400 кВ Бельцы – Сучава.

Однако, при естественном распределении потоков мощности, при принятых расчетных условиях, эта цель не достигалась. ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава не грузилась до заданных значений передаваемой мощности. В основном мощность новой ТЭЦ распределялась по сетям 330 кВ Молдавской энергосистемы при частичном уменьшении величины перетока мощности из энергосистемы Украины в энергосистему Молдовы по ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС (Украина) - п/ст 330 кВ Бельцы (Молдова).

Решение проблемы загрузки ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава стало возможным при установке фазоповоротного автотрансформатора (ФРТ) 330/400 кВ на п/ст Бельцы. Основными параметрами такого устройства были: установленная мощность 450 МВА и индуктивное сопротивление 30 Ом.

Выполненные расчеты показали высокую эффективность применения фазового регулирования в предложенном варианте схемы.

При отсутствии новой ТЭЦ переток мощности по ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава был близок к нулевому значению в исходном режиме при $\delta_{ФРТ}=0°$

Введение углового сдвига $\delta_{ФРТ} = 0 - (+30°)$ приводило к изменению перетока мощности по данной ВЛ в пределах до 450 МВт (из энергосистемы Румынии в энергосистему Молдовы). Введение же углового сдвига $\delta_{ФРТ}=0 - (-30°)$ приводило к изменению перетока мощности по указанной ВЛ в размере до 450МВт в обратном направлении (т.е. из энергосистемы Молдовы в энергосистему Румынии). Коэффициент, характеризующий изменение величины передаваемой мощности на каждый градус углового сдвига напряжений между входом и выходом ФРТ, составил ≈ (±25) МВт/град.

При вводе новой ТЭЦ мощностью 450МВт на подстанции 400 кВ Бельцы переток указанной мощности в сторону энергосистемы Румынии имел место при $\delta_{ФРТ}=-10°$, а нулевым он был при $\delta_{ФРТ}=+25°$. В остальных случаях величина перетока мощности по ВЛ-400 кВ принимала промежуточные значения. Указанные результаты показали эффективность и целесообразность применения ФРТ 400/330 кВ для регулирования перетоков мощности по межсистемной ВЛ-400 кВ между энергосистемами Молдовы и Румынии при синхронной работе данных энергосистем.

Значительно более сложная задача возникла при рассмотрении схемных вариантов выдачи мощности проектируемой Эвенкийской ГЭС мощностью 8000МВт (1-я очередь) в заданные узлы 500 кВ Тюменской энергосистемы и ОЭС Урала.

Выдача указанной мощности была предусмотрена по трем направлениям:

1)Эвенкийская ГЭС - Русскореченская – Тарасовская (передаваемая мощность 2500 МВт на расстояние 600 км);

2)Эвенкийская ГЭС - Холмогорская (передаваемая мощность 2500МВт на расстояние 800 км);

3)Эвенкийская ГЭС - Челябинская (передаваемая мощность 3000МВт на расстояние 2200 км).

Расчетными являлись условия:

- все генераторы Эвенкийской ГЭС работают на общие шины 500кВ;

- величины передаваемых мощностей в указанных направлениях должны выдерживатьься в пределах заданных;

- узлы 500 кВ приемных энергосистем замкнуты между сабой системными ВЛ объединенной энергосистемы.

Для выдачи мощности Эвенкийской ГЭС в каждом из указанных направлений было предложено применение по одной двухцепной УСВЛ напряжением 500 кВ. Рассматривались варианты УСВЛ с проводами в фазах 6*АС-300/39 при радиусе расщепления r_P=0,34 м. Величина натуральной мощности каждой двухцепной УСВЛ-500 кВ, работающей в режиме противофазы углового сдвига между системами векторов напряжений сближенных между собой трехфазных цепей, т.е. при $\Theta=180^{\circ}$, составляла 3197 МВт. Для выдачи мощности в первых двух направлениях оказалось возможным применение двухцепных УСВЛ-500 кВ с проводами в фазах 6*АС-240/56 при r_P=0,4м, обладающих в режиме противофазы напряжений цепей (при $\Theta=180^{\circ}$) величиной натуральной мощности, равной 3117 МВт, а в режиме при при $\Theta=120^{\circ}$ - 2780 МВт.

Выполненные расчеты и проведенный анализ показали, что удовлетворить заданным условиям выдачи мощности Эвенкийской ГЭС в различных режимах (от холостого хода до номинальной загрузки) удается при условии установки фазорегулирующих устройств на головном участке УСВЛ-500кВ Эвенкийская ГЭС-Челябинская с диапазоном регулирования угла $\delta_{ФРТ}=(-44^0) \div (+54^0)$. При этом установленная мощность ФПУ должна быть равной величине, не менее заданной передаваемой мощности, т.е. 3000 МВт. Таким образом, показатели эффективности применения ФПУ оцениваются величиной порядка 30 МВт/град.

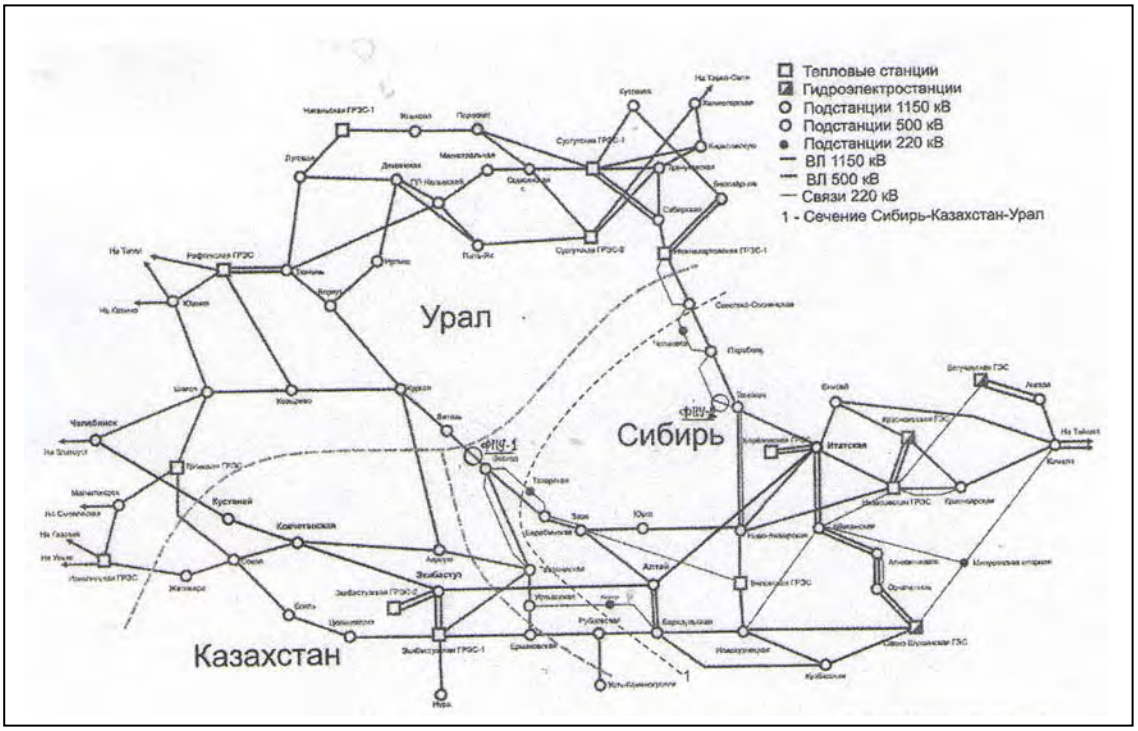


Рис. 1. Структурная схема сетей 220, 500 кВ региона на 2017 г.

Расчеты, выполненные для других вариантов энергосистем, содержащие ВЛ-220, 500 кВ (в том числе УСВЛ-220, 500 кВ), показали результаты, близкие к приведенным. Достаточно подробно были выполнены исследования и других схем и вариантов энергосистем при использовании средств фазового управления.

В качестве одного из новых регионов энергосистемы для исследования были выбраны сети 500, 220 кВ в сечении, по которому в настоящее время осуществляются обменные перетоки мощности между энергообъединениями Сибири и Урала. Основные ВЛ-500 кВ рассматриваемого сечения объединенной энергосистемы показаны на Рис. 1.

На базе исходных данных Института «Энергосетьпроект» и совместно с НТЦ «Электроэнергетики» [13] были выполнены расчеты режимов объединенной энергосистемы с учетом перспектив развития сетей 500, 220 кВ в указанном регионе, в частности, при введении в работу новой ВЛ-500 кВ Восход – Витязь (Ишим) – Курган.

Были рассчитаны варианты указанной одноцепной ВЛ-500 кВ в обычном исполнении и в виде компактной одноцепной ВЛ-500 кВ. Рассмотрены варианты без применения фазового управления, а также с его применением. В качестве ветви 500 кВ энергосистемы для фазового управления была выбрана проектируемая ВЛ-500 кВ Восход – Витязь (Ишим) с установкой ФРУ в начале указанной ВЛ, т.е. вблизи узла Восход, как показано на рис. 1.

Результаты расчетов перетоков мощности по контролируемым ветвям и сечениям для режима передачи максимальных потоков мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала показаны на рис.2, 3.

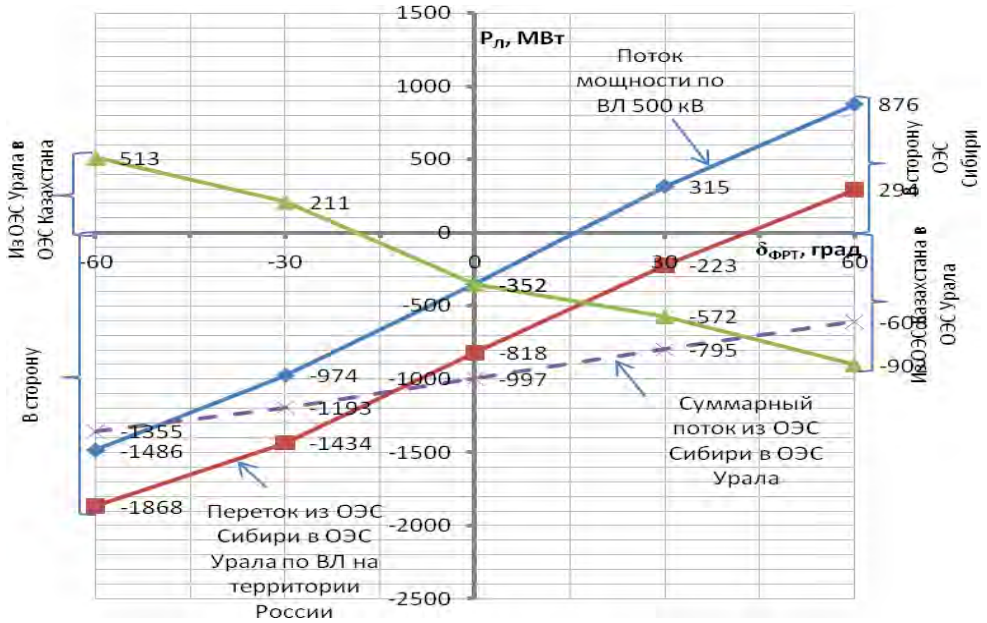


Рис. 2. Зависимость перетоков мощности по ВЛ – 500 кВ от угла сдвига входного напряжения относительно выходного, создаваемого с помощью ФПУ (ФРТ), установленного в начале ВЛ – 500 кВ Восход-Витязь (Ишим).

В варианте с фазовым управлением рассматривались режимы при изменении угла сдвига выходного напряжения относительно входного ФРТ ($\delta_{ФРТ}$)=±60°. Режим при $\delta_{ФРТ}$=0° соответствовал варианту и условиям отсутствия ФРТ.

Как можно видеть из данных, приведенных на рис. 2, естественное распределение потоков мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала (при $\delta_{ФРТ}$=0°) составляет 997 МВт, в том числе 352 МВт по ВЛ-500 кВ Восход – Витязь (Ишим). Остальная мощность в размере 997-352=645 МВт передается по сетям 500 кВ ОЭС Сибири и ОЭС Казахстана, в том числе по ВЛ-500 кВ Кустанай (Казахстан) – Челябинская (Урал).

При введении с помощью ФРТ углового сдвига $\delta_{ФРТ}$=±60° наблюдается сильная зависимость изменения величин передаваемой мощности по рассматриваемым ветвям.

При значении угла, близком к значению $\delta_{ФРТ}$=-30°, переток мощности по ВЛ-500 кВ Кустанай (Казахстан) – Челябинская (Урал) становится равным 0, что может рассматриваться как режим, при котором данная ВЛ отключена, а вся мощность из ОЭС Сибири в ОЭС Урала передается по ВЛ-500 кВ, расположенным на территории России.

При $\delta_{ФРТ}$=-30° поток мощности по ВЛ-500 кВ Восход – Витязь (Ишим) составляет 974 МВт, что соответствует величине натуральной мощности данной одноцепной ВЛ при традиционном ее исполнении.

В случае необходимости дальнейшего увеличения передаваемой мощности (сверх 974 МВт) пропускной способности данной ВЛ недостаточно. Выходом из положения является применение ВЛ-500 кВ Восход – Витязь (Ишим) – Курган в компактном исполнении, обеспечивающем величину натуральной мощности, равную 1480 МВт, или же путем установки УПК соответствующей мощности в варианте обычной ВЛ -500 кВ. Указанную загрузку данной ВЛ до 1486 МВт можно осуществить путем введения угла $\delta_{ФРТ}$=-60°.

Эффективность фазового регулирования при изменении $\delta_{ФРТ}$ в пределах ±60° определяется системными условиями.

Следует особо отметить, что при $\delta_{ФРТ}$=-60° суммарный переток мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала по ВЛ, расположенным на территории России, становится равным 1868 МВт, вместо ранее указанного (997 МВт) при отсутствии фазового управления ($\delta_{ФРТ}$ = 0°).

При положительных значениях угла ($\delta_{ФРТ}$) происходит уменьшение передаваемой мощности по ВЛ-500 кВ Восход – Витязь (Ишим) в сторону ОЭС Урала. Так при $\delta_{ФРТ}$=+15° величина передаваемой мощности по данной ВЛ становится равной 0, (рис. 3), а при $\delta_{ФРТ}$=+60° передаваемая мощность будет составлять 876 МВт и происходить в обратную сторону, т.е. в сторону ОЭС Сибири.

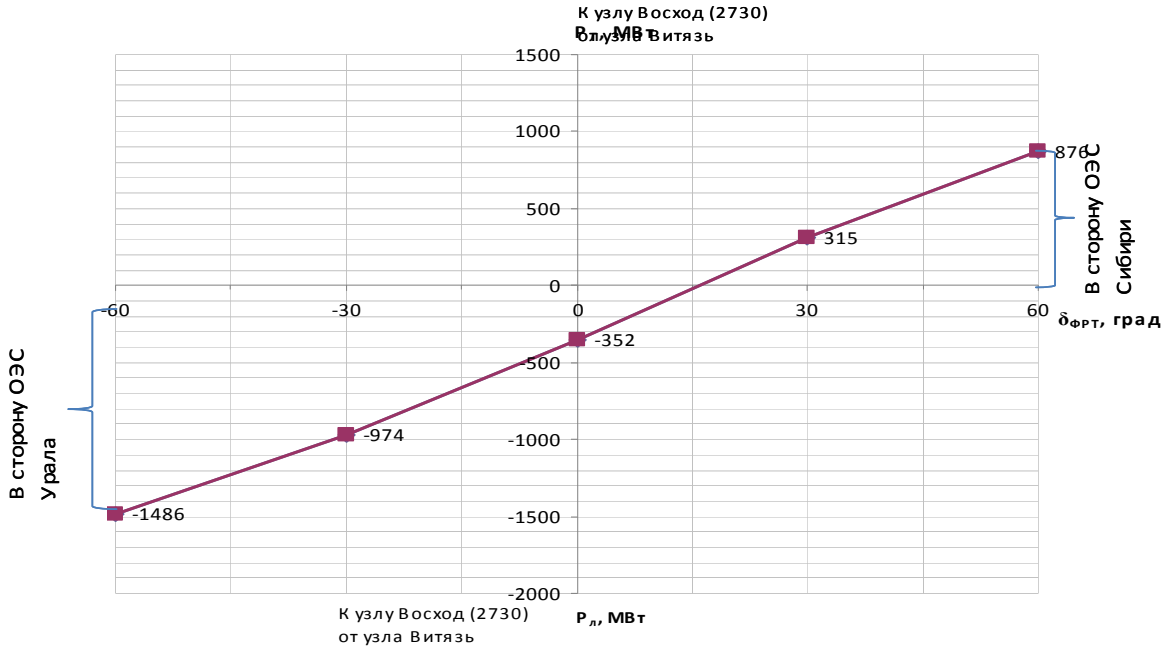


Рис. 3. Зависимость величины потока мощности по ВЛ – 500 кВ Восход-Витязь(Ишим) от угла сдвига выходного напряжения относительно входного, создаваемого ФРУ(ФРТ), установленным в начале данной ВЛ

Этот пример может служить в качестве иллюстрации эффективности фазового регулирования и подтверждения целесообразности применения фазоповоротных устройств в электрических сетях напряжением класса 500 кВ.

Эффективность применения фазорегулирующих устройств в сетях 220 кВ показана на основании расчетов режимов двухцепной ВЛ-220 кВ нового типа повышенной пропускной способности Томск - Парабель-Нижневартовская ГРЭС [13]. В качестве ВЛ нового типа рассмотрены возможные варианты применения двухцепной компактной ВЛ, или двухцепной УСВЛ напряжением 220 кВ с проводами в фазах 3*АС-240/56, обладающих величиной натуральной мощности более 600 МВт. Такие двухцепные ВЛ-220 кВ могли бы быть альтернативными вариантами вместо намеченной к строительству одноцепной ВЛ-500 кВ Томск – Парабель - Нижнивартовская ГРЭС.

Как показали расчеты, ВЛ – 220 Томск – Парабель –Нижневартовская ГРЭС не загружается до уровня величины натуральной мощности. Установлено, что при естественном распределении потоков мощности загрузка данной ВЛ на головном участке Томск (Восточная) – Парабель по отношению к величине натуральной мощности линии, равной 606 МВт, составляет всего 48% (при принятых исходных расчетных данных).

Решить проблему дополнительной загрузки ВЛ, в случае необходимости и экономической целесообразности, возможно с помощью фазорегулирующих устройств трансформаторного типа (ФРТ, ФПУ) или других устройств FACTS.

Принципиально важным является выбор места установки ФРТ с учетом конфигурации схемы сети и желаемого направления выдачи мощности по ВЛ.

Из ряда рассмотренных вариантов наиболее эффективным в данной сети оказалась установка ФРТ в начале головного участка ВЛ 220 кВ Восточная-Парабель.

Для варианта двухцепной УСВЛ-220 кВ отправной является ПС 220 кВ Восточная, имеющая электрическую связь с ПС 500 кВ Томск и разветвленную сеть 220 кВ, связывающую ее с другими подстанциями 220 кВ. При введении в начале каждой цепи ВЛ 220 кВ (двухцепной УСВЛ 220 кВ) с помощью ФРТ дополнительного углового сдвига векторов напряжения, $\delta_{ФРТ}$, равного -30° по отношению к напряжению на шинах ПС Восточная, обеспечивается увеличение передаваемой мощности до 616,8 МВт по отношению к исходной величине 292 МВт. При таком увеличении передаваемой мощности на головном участке данной ВЛ 220 кВ Томск – Парабель – Нижневартовская ГРЭС происходит изменение величины потока мощности и на других участках ВЛ, а на подходе к ПС 220 кВ Нижневартовская ГРЭС меняется также и направление потока мощности.

Дальнейшее увеличение угла сдвига векторов напряжений $\delta_{ФРТ}$ с помощью ФРТ до $\delta_{ФРТ}$ =-40° позволяет увеличить передаваемую мощность до 716,8 МВт, а при значении угла $\delta_{ФРТ}$ =-45° передаваемая мощность достигает величины 756 МВт (рис.4). При введении угла сдвига векторов напряжения $\delta_{ФРТ}$ =-60° достигается увеличение передаваемой мощности до 858 МВт, что в 1,4 раза превышает величину натуральной мощности рассматриваемой ВЛ 220 кВ.

На рис.4 указаны две оси ординат, что позволяет определить увеличение передаваемой мощности как в МВт, так и в относительных единицах по отношению к значению натуральной мощности ВЛ. Благодаря общему балансу реактивной мощности, уровни напряжения во всех узлах ВЛ поддерживаются в рамках допустимого. Как видно из приведенных результатов расчетов применение фазового управления позволяет решить проблему обеспечения заданных величин и направлений перетоков мощности и в сетях 220 кВ. Эффективность применения фазорегулирующих устройств для рассмотренного примера УСВЛ-220 кВ оценивается величиной примерно 10 МВт/град. Следует отметить, что применение ФПУ должно основываться

на технико-экономических расчетах и анализе показателей общесистемной эффективности в каждом конкретном случае, с учетом исходных расчетных данных и поставленных целей.

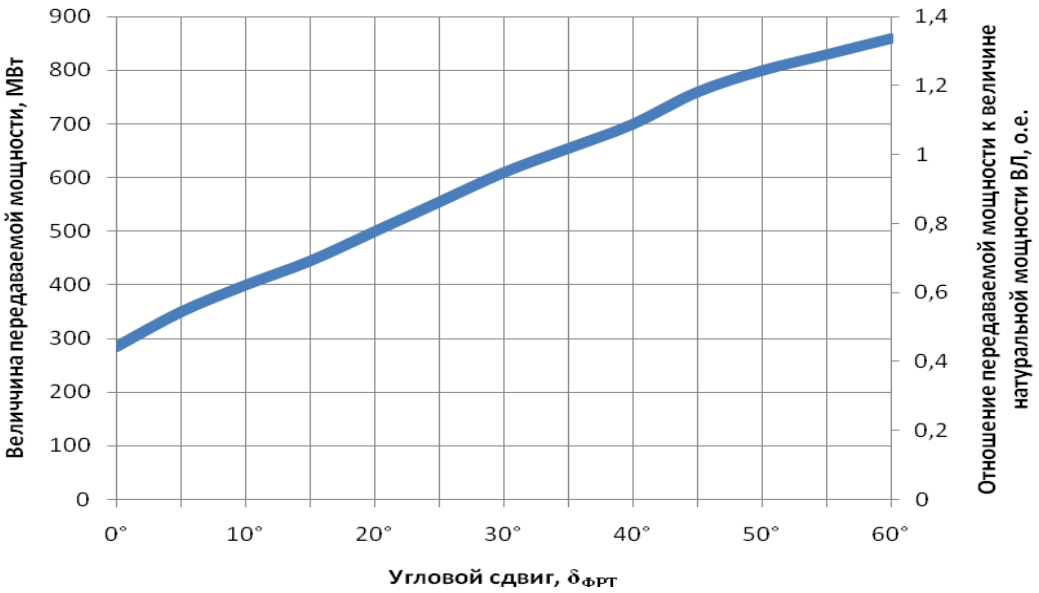


Рис. 4. Мощность, передаваемая по двухцепной УСВЛ 220 кВ в режиме θ=120º, в зависимости от изменения угла сдвига векторов напряжения (-$\delta_{ФРТ}$), создаваемого ФРТ, установленным в начале участка 220 кВ Восточная – Парабель

Выводы.

Проведенные исследования показывают высокую эффективность применения фазового управления для регулирования величины и направления потоков мощности по ВЛ переменного тока различной конструкции в сложных электроэнергетических системах.

Для реализации фазового регулирования необходимо применение специальных фазоповоротных устройств трансформаторного, автотрансформаторного или других типов, в том числе реализованных в различных устройствах типа FACTS.

Количественные показатели эффективности применения фазоворотных устройств зависит от целого ряда факторов, включая класс напряжения линий электропередачи, их тип, протяженность и пропускную способность, а также конфигурацию сетей и наличие параллельных высоковольтных связей.

Результаты расчетов показали, что показатели эффективности применения средств фазового управления в энергосистемах при прочих равных условиях тем выше, чем более совершенны по своим характеристикам и пропускной способности линии электропередачи, к которым, в частности, относятся компактные ВЛ и управляемые двухцепные и многоцепные самокомпенсирующиеся линии электропередачи (УСВЛ).

Выполненные исследования позволяют оценить эффективность применения фазового управления для регулирования потоков мощности в энергосистемах по ВЛ рассмотренных классов напряжений (220, 400, 500 кВ). Показано, что при принятых расчетных условиях отношение величины изменения передаваемой мощности по ВЛ указанных классов напряжения составляет в пределах 10-30 МВт на каждый градус поворота вектора выходного напряжения ФПУ относительно входного.

Литература

1. Электропередача переменного тока/ В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, Г.В. Чалый, Л.П. Калинин. А.с. 566288 (СССР). / Заяв. 21.03.74. № 2006496. Опубл. в Б.И., 1977, № 27.
2. Электропередача переменного тока / В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, Г.В. Чалый, Л.П. Калинин. Патент США №4001672, 1977; Патент ГДР №116990, 1976; Патент Франции №7508749, 1977; Патент Англии №1488442, 1978; Патент Швеции №75032268, 1978; Патент Канады №10380229, 1978; Патент ФРГ №2511928, 1979; Патент Японии №1096176, 1982.
3. Управляемые линии электропередачи / Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый, под ред. В.А. Веникова. – Кишинев: Штиинца, 1984. – 296 с.
4. Александров Г.Н., Евдокунин Г.А., Подпоркин Г.В. Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции. – Электричество, 1982, № 4, с. 10-17.
5. Ю.П. Рыжов. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для ВУЗов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с., ил.
6. В.М. Постолатий, Е.В. Быкова. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа. Электричество, 2010 г., №2, стр. 7-14.
7. В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслов, Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередачи нового поколения на примере ВЛ-220 кВ. Problemele Energeticii Regionale, nr. 2 (13) 2010., IE AŞM, Chişinău, 2010, с. 7-21.
8. В.В. Дорофеев. Развитие электроэнергетической системы России с использованием принципов активно-адаптивной сети. Доклады 6-ой Международной конференции ТРАВЭК, Москва, 2010.
9. Постолатий В.М. Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Быкова Е.В. Современные средства регулирования перетоков мощности и эффективность применения их в энергосистемах. Сборник докладов. Энергетика Молдовы – 2005. Кишинев, 2005. С. 206-219.
10. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях: Учебное пособие для ВУЗов / Ю.Н. Астаов, В.А. Веников, В.В. Ежков и др. Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с., ил.
11. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для ВУЗов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. Под ред. И.П. Крючкова. – 2-ое изд. стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009 – 416 с., ил.
12. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича.-3-е изд. Переработ. И доп..-М.: ЭНАС, 2009. 292 с.
13. Тимашова Л.В., Шакарян Ю.Г., Быкова Е.В., Постолатий В.М. Основные технические решения по созданию высокоэффективных электропередач переменного тока напряжением 220 кВ. Труды VI-ой Международной научно – технической конференции ТРАВЭК «Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности», Москва, 2010, 17 с., электронная публикация.

Сведения об авторе

Постолатий Виталий Михайлович, действительный член Академии наук Молдовы, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики, автор и соавтор 276 научных работ, в том числе 10 монографий, 28 авторских свидетельств на изобретения и 21 –зарубежного патента.