МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ ВАРИАНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВЛ-220 кВ

В.М. ПОСТОЛАТИЙ, Е.В. БЫКОВА, В.М. СУСЛОВ
Институт энергетики Академии наук Молдовы
Ю.Г. ШАКАРЯН, Л.В. ТИМАШОВА, С.Н. КАРЕВА
Научно-технический центр Электроэнергетики, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье описаны ВЛ нового поколения (одноцепных и двухцепных компактных, двухцепных управляемых самокомпенсирующихся). Описаны основные принципы создания, элементы конструкции и сопоставительные характеристики ВЛ нового поколения, показаны их преимущества по сравнению с ВЛ традиционного поколения. Сформулированы методические подходы к выбору ВЛ нового поколения и средств регулирования типа FACTS. Для класса напряжения 220 кВ показаны методические подходы к обоснованию и выбору вариантов ВЛ нового поколения и необходимых для них средств регулирования.
Ключевые слова: линии электропередачи нового поколения: управляемые, компактные, самокомпенсирующиеся ВЛ, устройства регулирования типа FACTS.

ABORDĂRILE METODICE LA SELECTAREA VARIANTELOR LINIILOR ELECTRICE DE TRANSPORT NOUĂ GENERAȚIE, ÎN EXEMPLU, LEA-220 kV

V.M. POSTOLATI, E.V. BÎCOVA, V.M. SUSLOV
Institutul de Energetica al Academiei de Ştiinţe a Moldovei
IU.G. ŞACAREAN, L.V. TIMAŞOVA, S.N. CAREVA
Centrul de energie electrică tehnico-ştiinţifice, Moscova, Rusia

Rezumat. În articol este descrisă LEA de generaţie nouă (compactă cu un circuit şi cu două circuite, cu două circuite dirijată cu autocompensare). Sunt descrise principiile de formare, elementele de construcţie şi caracteristicile comparative ale LEA de generaţie nouă, indicate prioritățile lor în comparaţie cu LEA generaţie tradiţională. Sunt formulate abordările metodice la selectarea LEA generaţie nouă şi mijloacele de reglementare de tip FACTS. Pentru clasa de tensiune 220 kV sunt indicate abordările metodice la argumentarea şi selectarea variantelor LEA generaţie nouă şi mijloacele necesare pentru ele de reglementare.

Cuvinte-cheie: linie electrică de transport generaţie nouă: LEA cu autocompensare, compacte, dirijate, mijloace de reglementare de tip FACTS.

METHODICAL APPROACHES TO THE CHOICE OF OPTIONS VL-220 kV NEW GENERATION

V.M. POSTOLATI, E.V. BYKOVA, V. M. SUSLOV
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova
IU.G. SHAKARYAN, L.V. TIMASHOVA, S.N. KAREVA
Scientific-Technical Center of Power Engineering, Moscow, Russia

Abstract. The Transmission Power Lines of new generation are described in the article (single- compact, double-circuit compact, double-circuit controlled self-compensating high voltage transmission power lines (CSHVL). There are showed basic principles of creation, design elements and comparative characteristics of the transmission lines of the new generation are described, the advantages of them. There are formulated methodical approaches to the choosing of a new generation of transmission lines and facilities management FACTS. Methodical approaches to the choice of options for transmission lines 220 kV and facilities management are shown as well.
Key words: ttransmission power lines of new generation, controlled, single- compact, double-circuit compact, double-circuit controlled self-compensating high voltage transmission power lines, the apparatus of regulation of the type FACTS.

1. Общие положения

В настоящее время наблюдается значительный рост потребления электрической энергии как в промышленной, так и в социальной сферах, что требует дальнейшего увеличения объемов выработки электроэнергии, развития электроэнергетических систем, строительства новых генерирующих источников, распределительных, транспортных и межсистемных линий электропередачи.

К электросетевым объектам и в первую очередь к линиям электропередачи (ВЛ) выдвигаются новые требования повышения эффективности их работы, снижения капитальных вложений в строительство, уменьшения эксплуатационных затрат, снижения экологического влияния на окружающую среду.

В современных условиях важнейшими задачами становятся:

– максимальное повышение пропускной способности ВЛ;

– увеличение управляемости и устойчивости энергосистем;

– создание параллельно работающих управляемых энергообъединений, с необходимостью обеспечения энергетической и экологической безопасности и уменьшения отчуждаемых под энергетические объекты земельных угодий.

Решение этих задач является частью проблемы создания активно-адаптивных электрических сетей, с целью обеспечения в реальном масштабе времени надежного и экономически оптимального функционирования электроэнергетических систем в любых (нормальных, предаварийных, аварийных и послеаварийных) режимах, а также надежного обеспечения потребителей возможно более дешевой электроэнергией заданного качества.

Для успешного решения указанных задач и достижения поставленных целей могут быть предложены управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности, которые представляют собой комплекс технических решений, предусматривающих применение одноцепных и многоцепных ВЛ нового поколения (компактных ВЛ и управляемых самокомпенсирующихся ВЛ) в сочетании с современными средствами регулирования.

Целью настоящей статьи является изложение основных методических подходов к обоснованию и выбору наиболее целесообразных вариантов воздушных линий электропередачи, их технико-экономических показателей , а также ряда существенных отличий и преимуществ по сравнению с ВЛ традиционного исполнения.

В значительной мере материал статьи относится к ВЛ нового поколения различных классов напряжения. Конкретная же иллюстрация методических подходов проведена на примере ВЛ напряжением 220 кВ.

Выполненные к настоящему времени научно-исследовательские работы [1-6] позволяют сформулировать следующие основные методические подходы к выбору ВЛ нового поколения.

Под ВЛ нового поколения подразумеваются воздушные трехфазные одноцепные и многоцепные линии электропередачи, созданные с использованием принципиально новых технических решений в части их схемно-конструктивного исполнения, компоновки средствами управления и применением нетрадиционных способов регулирования параметров режимов.

Весь комплекс новых технических решений, предусмотренных в ВЛ нового поколения, позволяет реализовать современные идеи создания интеллектуальных электроэнергетических систем (SMART-Grig) с активно- адаптивными сетями [7], обеспечивающими заданную их пропускную способность, оптимальные режимные характеристики, экономию капитальных вложений и эксплуатационных затрат, минимальное влияние на окружающую среду.

При прочих равных условиях ВЛ нового поколения способны обеспечить существенно лучшие показатели по сравнению с ВЛ традиционного типа, а именно:

- повышение пропускной способности в 1,2-1,6 раза;
- снижение капитальных вложений в расчете на единицу передаваемой мощности не менее, чем на 20-30%;
- уменьшение в 1,5-2 раза площадей земельных угодий, отчуждаемых под строительство ВЛ;
- регулирование режимов работы линии и сети во всем заданном диапазоне изменения величин передаваемой мощности (кибернетическое управление) с целью минимизации потерь и соблюдения заданных режимных параметров и ограничений;
- эффективную и быстродействующую реакцию на любые изменения ситуации в энергосистеме в нормальных и переходных режимах работы;
- управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях;
- выполнение в энергосистемах новых функций, дополняющих регулировочные действия генерирующих источников, что существенно повышает экономичность работы энергосистем в нормальных режимах, статическую и динамическую устойчивость энергосистем в переходных режимах работы.

2. Классификация ВЛ нового поколения

К категории воздушных линий электропередачи (ВЛ) нового поколения на современном этапе отнесены одноцепные и многоцепные ВЛ повышенной по сравнению с ВЛ традиционного типа пропускной способностью, оснащенные современными регулирующими устройствами типа FACTS, отвечающими всем наперед заданным техническим и экономическим характеристикам и режимным параметрам. К ВЛ нового поколения относятся:

- компактные трехфазные одноцепные ВЛ (ОКВЛ);
- компактные многоцепные трехфазные ВЛ (МКВЛ);
- управляемые двухцепные и многоцепные самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ);
- комбинированные управляемые ВЛ, включающие компактные ВЛ (ОКВЛ и/или МКВЛ) и УСВЛ.

ВЛ нового поколения предусматривают, прежде всего, создание компактных конфигураций расположения фаз с минимально допустимыми расстояниями между ними, выбор оптимальной конструкции расщепления фаз и линейной изоляции, применения новых типов опор, позволяющих создать компактные конструкции линии с минимально допустимыми расстояниями между фазами и обеспечить совместно с междуфазными изоляционными элементами, устанавливаемыми в пролётах, механическую устойчивость линии в целом при воздействии неблагоприятных климатических факторов.

За счет сближения фаз и создания компактных конфигураций их расположения в одноцепных и многоцепных ВЛ обеспечивается улучшение электрических параметров линий и, прежде всего, повышение пропускной способности, благодаря изменению параметров электромагнитного поля в междуфазном и окружающем линию пространстве. Усиление параметров поля внутри линии за счет сближения фаз позволяет улучшить электрические параметры, увеличить пропускную способность, и, соответственно, технические характеристики линии, а ослабление поля во внешнем пространстве – улучшить экологические показатели ВЛ.

В управляемых самокомпенсирующихся ВЛ (УСВЛ), кроме того, предусматривается в процессе изменения величины передаваемой по линии мощности

регулирование параметров электрического и магнитного поля фаз и цепей, благодаря чему обеспечивается управление эквивалентными параметрами и характеристиками самих линий электропередачи, как элементов электрической сети, что целесообразно осуществлять в соответствии с заданными режимными требованиями. Данное регулирование осуществляется путем изменения углового сдвига (θ) между трехфазными системами векторов напряжений цепей в пределах θ=(0÷180°) с помощью фазоповоротных устройств (ФПУ, ФРТ), установленных в местах присоединения ВЛ к подстанциям.

На УСВЛ может оказаться целесообразным дискретное регулирование угла (θ) в пределах θ=(0-120°). Для рассматриваемых конструкций УСВЛ регулирование угла (θ) в пределах 0÷120(180)° позволяет в 1,4÷1,6 раза изменять величину эквивалентных параметров ВЛ (удельных значений индуктивного сопротивления и емкостной проводимости фаз линии), а, соответственно, волнового сопротивления, значения натуральной мощности и зарядной мощности линии. Значениям угла θ=180°(120°) соответствуют максимальные величины емкостной проводимости, зарядной мощности, натуральной мощности и, соответственно, пропускной способности ВЛ. Указанные параметры принимают минимальные значения при переводе УСВЛ в режим при θ=0°, кроме индуктивного сопротивления, величина которого минимальна при θ=180°, а максимальна при θ=0°.

Столь глубокий регулировочный диапазон изменения эквивалентных параметров и технических характеристик (в 1,4÷1,6 раза) целесообразно использовать при выборе мощности фазоповоротных устройств (ФПУ, ФРТ) и других устройств типа FACTS, в частности - мощности управляемых шунтирующих реакторов (УШР) и устройств поперечной емкостной компенсации. Применение ФПУ (ФРТ) на УСВЛ совместно с указанными и другими устройствами типа FACTS обеспечивает заданные регулировочные характеристики электропередач, высокую управляемость электрических сетей и позволяет достичь при этом существенной экономии капитальных и эксплуатационных затрат по энергосистеме в целом, по сравнению с вариантами традиционных решений.

Дальнейшее изложение выполнено на примере ВЛ-220 кВ.

3. Технические характеристики наиболее представительных вариантов ВЛ-220 кВ нового поколения.

На основе анализа отечественных и зарубежных работ в области новых разработок ВЛ-220 кВ отобраны наиболее представительные варианты ВЛ-220 кВ нового поколения. Конструкции опор данных вариантов показаны на рис. 1-3, а основные параметры и характеристики приведены в таблице 1.

На рис. 1-3 показаны соответственно: одноцепная компактная трехфазная ВЛ (ОКВЛ); двухцепная компактная ВЛ(ДКВЛ) и двухцепная управляемая самокомпенсирующаяся ВЛ (УСВЛ). Опора, показанная на рис. 2, применима как для двухцепной компактной ВЛ, так и для двухцепной УСВЛ.

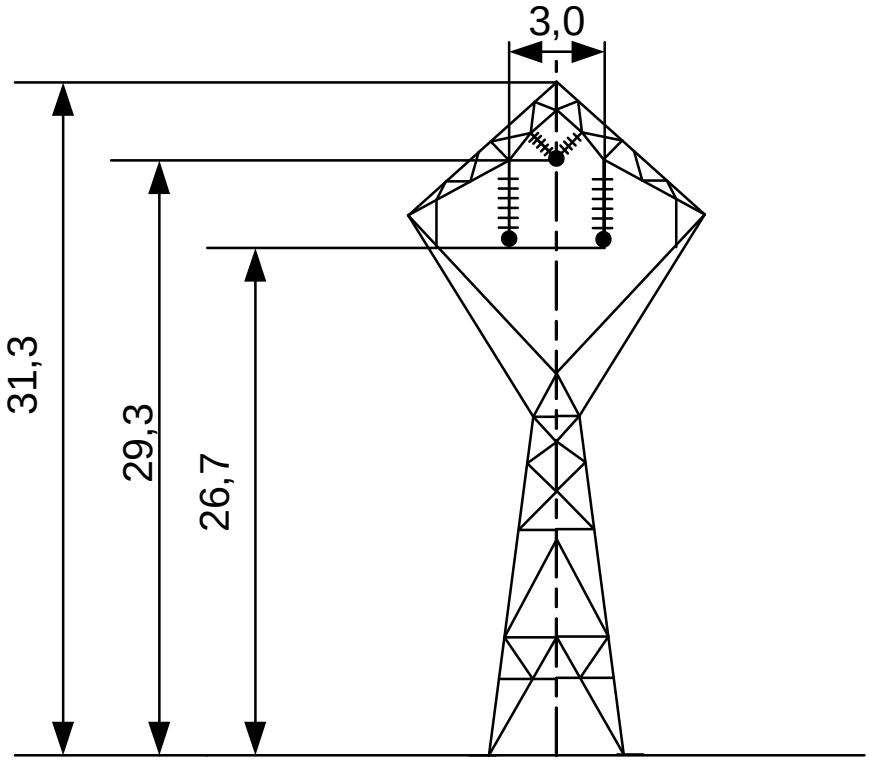

Рис. 1. Одноцепная компактная ВЛ 220 кВ

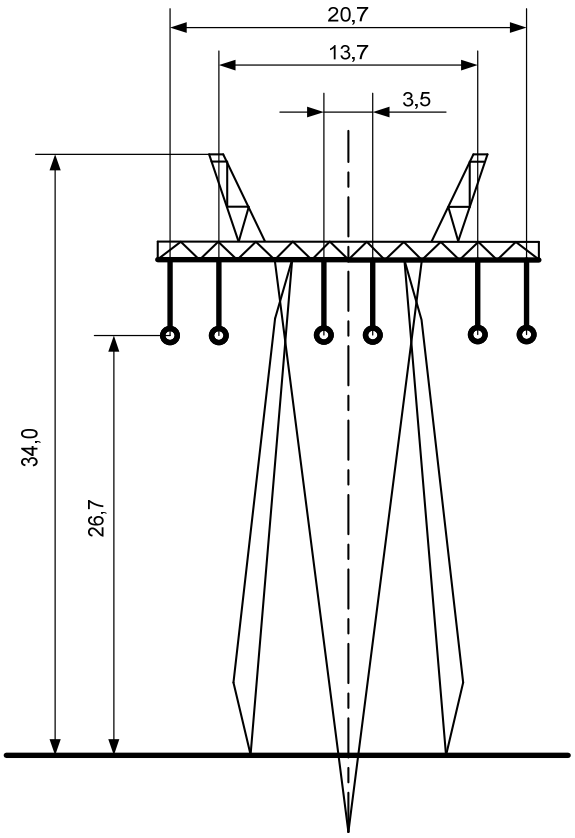

Рис. 2. Двухцепная компактная ВЛ 220 кВ

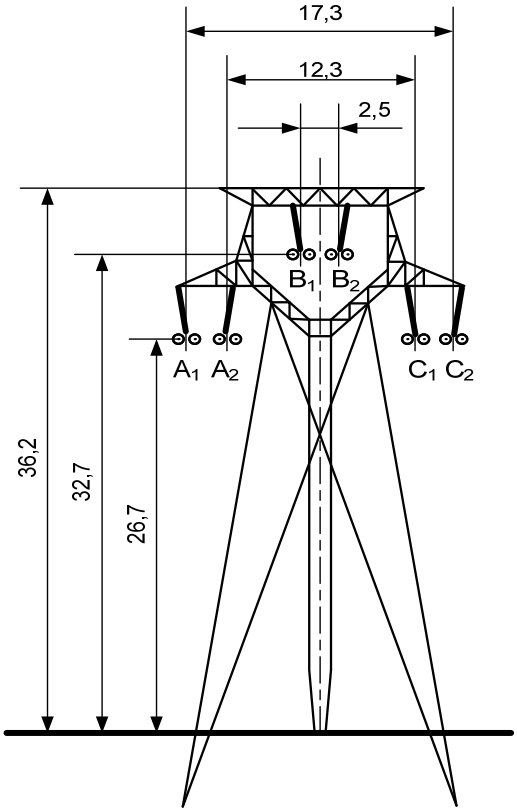

Рис. 3. Двухцепная УСВЛ 220 кВ на опорах типа «Чайка»

Таблица 1

Технические параметры ВЛ нового поколения

Тип ВЛ		Одноцепная компактная	Двухцепная компактная	Двухцепная УСВЛ	
Число цепей		1	2	2	
Марка провода		АС-300/66			
Число проводов в фазе		2			
Угол сдвига фаз θº		0º	120º	120º	180º
Удельные параметры линии	r_0, Ом/км	0,511	0,049	0,049	0,049
	x_0, Ом/км	0,236	0,262	0,248	0,248
	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	4,66	4,32	4,44	4,44
Волновое сопротивление, Ом		226,4	123,7	118,9	107,8
Натуральная мощность линии в целом, МВт		277,9	509,0	529,0	583,0
Удельная зарядная мощность, МВАр/км		0,296	0,548	0,564	0,621
Ширина коридора $L_к$, м		43,0	60,7	57,3	
Суммарное сечение алюминиевой части проводов S_{Al}, мм^2		1731	3462		
$P_{нат}/L_к$, МВт/м		6,46	8,39	9,23	10,17
$P_{нат}/S_{Al}$, МВт/мм^2		0,161	0,147	0,153	0,168
Базовые показатели стоимости, тыс. руб./км		1650	2613,6	2578,8	
Стоимость одного километра ВЛ в расчете на 1 МВт натуральной мощности, тыс.руб./МВт		5,93	5,13	4,87	4,42

Основными электрическими параметрами ВЛ-220 кВ нового поколения, как и ВЛ традиционного типа, являются: удельное активное сопротивление, удельное индуктивное сопротивление, удельная емкостная проводимость. Указанные параметры

определяют величину натуральной мощности, которой оказалось удобно пользоваться для сопоставления различных вариантов и типов ВЛ на стадии выбора предпроектных решений.

В таблице 1 приведены упомянутые параметры и характеристики рассматриваемых вариантов ВЛ-220 кВ, а также дополнительные характеристики, которые могут приниматься во внимание при выборе вариантов ВЛ, такие, как отношение величины натуральной мощности к ширине земельной полосы отчуждения, к суммарному сечению проводов, а также удельные стоимостные показатели 1 км ВЛ и отношения удельных капитальных вложений на единицу величины натуральной мощности (тыс. руб./МВт).

На рис. 4. представлены результаты сопоставлений ВЛ-220 кВ нового поколения и ВЛ-220 кВ традиционной конструкции по величине натуральной мощности.

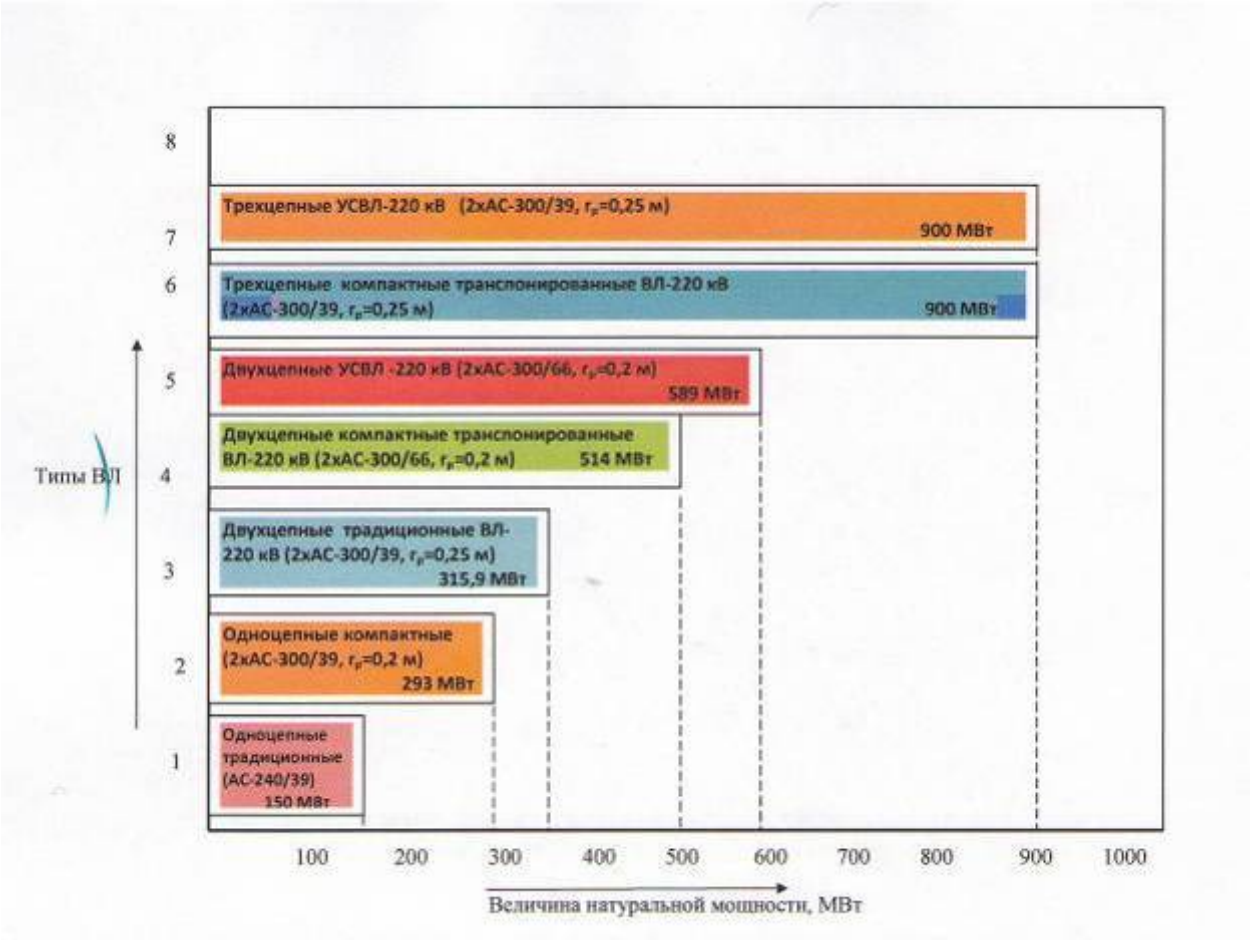

Рис. 4. **Величины натуральной мощности ВЛ – 220 кВ различных типов**

Приведенные данные показывают, что при принятых сопоставимых условиях ВЛ-220 кВ нового поколения по величине натуральной мощности превосходят аналогичные ВЛ-220 кВ (одноцепные и двухцепные традиционного типа) в 1,5-2 раза.

Расчетные данные свидетельствуют и о том, что двухцепные компактные ВЛ-220 кВ и двухцепные УСВЛ-220 кВ и, особенно трехцепные УСВЛ-220 кВ, по величине натуральной мощности приближаются к одноцепным трехфазным ВЛ-500 кВ обычного типа. Проведенные предварительные технико-экономические сопоставления показали, что удельные капитальные вложения, необходимые для двухцепных и трехцепных УСВЛ, не превышают величину удельной стоимости одноцепных ВЛ-500 кВ традиционной конструкции. При этом, за счет разности стоимости подстанций,

выполненных на класс напряжения 220 кВ и 500 кВ, может быть получена значительная экономия затрат, если отдать предпочтение выбору вариантов ВЛ-220 кВ нового поколения.

К настоящему времени отработаны методики и программы расчетов электрических параметров ВЛ нового поколения, их технических и технико-экономических показателей, а также экологических параметров, таких, как радиопомехи, акустические шумы, уровни напряженности электрического и магнитного поля в пространстве, окружающем ВЛ.

Представленные варианты ВЛ-220 кВ нового поколения удовлетворяют всем установленным нормативам и требованиям действующих правил устройства электроустановок (ПУЭ).

4. Методические подходы к выбору средств регулирования для ВЛ нового поколения

Неотъемлемыми элементами электропередач нового поколения являются устройства регулирования, относящиеся к категории FACTS. Классификация устройств FACTS представлена на рис. 5, их общие технические характеристики и функциональные возможности даны в таблице 2, а ориентировочные стоимостные показатели – на рис. 6 (на период 2009г.).

Выбор типов устройств FACTS для ВЛ 220 кВ определяется той ролью, которая возлагается на ВЛ данного класса напряжения. ВЛ 220 кВ нового поколения могут выполнять различные функции в энергосистемах:

– служить в качестве межсистемных связей для осуществления обменных перетоков мощности между автономно работающими энергосистемами;

– быть внутрисистемными линиями и осуществлять передачу заданной мощности между узлами сложно замкнутой системы;

– применяться для выдачи мощности электростанций в энергосистему;

– использоваться в качестве радиальных ВЛ для электроснабжения отдаленных крупных потребителей;

– выполнять роль глубоких вводов в крупных городах и густо населенных жилых районах.

В каждом из рассмотренных случаев применения ВЛ нового поколения необходимо учитывать конкретные требования к электропередачам того или иного класса напряжения и существующие общие технические ограничения (ограничения по допустимым отклонениям напряжения, ограничения по короне, акустическим шумам и радиопомехам, по уровню напряженности поля под ВЛ вблизи поверхности земли и др.).

Выбор тех или иных устройств FACTS, их мощности и характеристик в каждом из перечисленных основных пяти случаев применения ВЛ нового поколения определяется с учетом конкретных требований:

<u>Например, в первом случае - применение ВЛ нового поколения в качестве межсистемных связей устройства FACTS должно обеспечить:</u>

- увеличение пропускной способности линии до заданного уровня, если естественная пропускная способность недостаточна, что может быть достигнуто с помощью следующих типов устройств FACTS:

УУПК – управляемые устройства продольной компенсации;

БСК – батареи статических конденсаторов;

СК – синхронные компенсаторы;

СТК – статические компенсаторы;

СТАТКОМ – статические компенсаторы реактивной мощности;

ФРТ – фазорегулирующие устройства;

- регулирование заданного уровня напряжения в примыкающих к линии узлах, достигаемое с помощью:

СТК, СТАТКОМ, СК - при необходимости повышения напряжения в узлах; при необходимости ограничения напряжения требуется установка шунтирующих реакторов (ШР), управляемых шунтирующих реакторов (УШР), СК, СТАТКОМ, реакторных групп (ВРГ).

Во втором случае - применение ВЛ 220 кВ в качестве межсистемных связей отличается от первого тем, что, помимо устройств, указанных для первого варианта, необходима установка:

ФРТ – фазорегулирующих устройств;

ОРПМ – объединенных регуляторов потока мощности;

ВПТ – вставок постоянного тока;

УПК-ФРТ – комбинированных устройств УПК и ФРТ;

АСК – асинхронизированных компенсаторов.

В остальных случаях применения ВЛ нового поколения необходима соответствующая комбинация устройств FACTS, перечисленных выше.

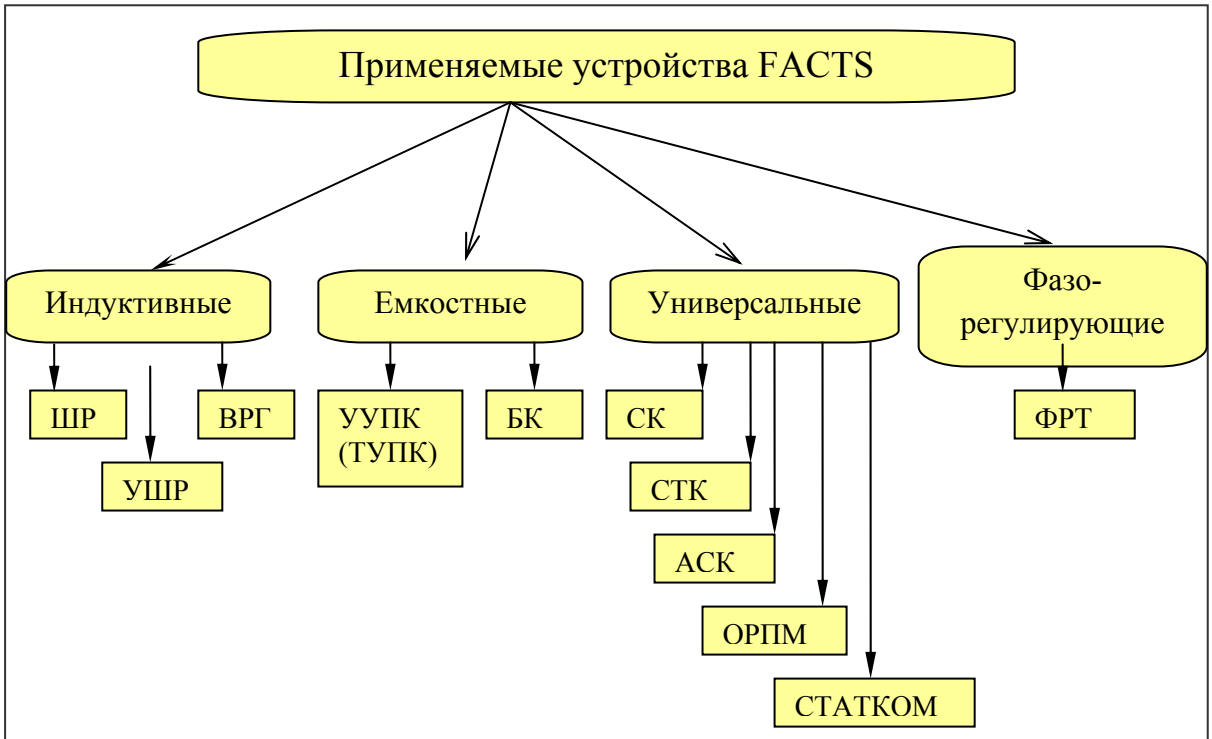

Рис. 5. Классификация устройств FACTS

Таблица 2

Технические характеристики и области применения устройств FACTS различных типов

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
1	Шунтирующий реактор (ШР)	Нерегулируемые масляные шунтирующие реакторы	Применяется для ступенчатого регулирования реактивной мощности, снижения уровней коммутационных перенапряжений, гашения дуги в паузе ОАПВ
2	Управляемый шунтирующий реактор с подмагничи-ванием постоянным током (УШР)	Выполняется на основе специального трансформатора с масляным охлаждением, в составе УШР на общем сердечнике содержится сетевая обмотка реактора, компенсирующая обмотка, обмотка управления, и вне бака с УШР - тиристорное выпрямительное устройство и фильтр. Быстродействие УШР определяется степенью форсировки и расфорсировки подмагничивания постоянным током и мощности выпрямительного устройства	УШР предназначены для плавного регулирования напряжения (реактивной мощности) при мощностях, протекающих по линиям электропередачи, не превышающих натуральную, УШР могут устанавливаться как на линиях электропередачи (линейные УШР), так и на шинах подстанции, не предназначены для обеспечения требований по устойчивости. Предпочтительная область применения – распределительные сети. Возможна комбинация, когда параллельно УШР подключается конденсаторная батарея (БСК).
3	Реакторные группы, коммутируемые выключатели (ВРГ)	Ступенчато-регулируемые реакторы, подключаемые к третичной обмотке автотрансформаторов (трансформаторов) посредством вакуумных выключателей с числом коммутаций 5000 – 10000, временем включения/отключения выключателя $\Delta t = 0{,}02 - 0{,}12c$.	Применяются для компенсации зарядной мощности линий электропередачи и узлах нагрузки для поддержания напряжения в требуемых пределах в установившихся режимах. ВРГ предназначены для ступенчатого регулирования напряжения (реактивной мощности) при мощностях, протекающих по линиям электропередачи, не превышающих натуральную. Предпочтительная область применения - распределительные сети. Возможны комбинации, когда параллельно ВРГ подключаются конденсаторные батареи (БСК)
4	Синхронные компенсаторы (СК)	Является комплексом, состоящим из синхронных машин и возбудителя. Имеется модификация СК с бесщеточным возбуждением. СК способны обеспечить регулирование реактивной мощности в пределах 100% выдачи и 30-50% потребления. Обладают высокой перегрузочной способностью (2-3 кратная перегрузка по току в течение 30 с)	Применяется для регулирования напряжения и повышения пределов статической и динамической устойчивости, увеличения пропускной способности электропередачи. Применим в любых электрических сетях
5	Статические тиристорные компенсаторы (СТК)	В составе СТК реактор с воздушным охлаждением и тиристорный вентиль с воздушным или водяным охлаждением, образующие тиристорные группы (ТРГ) с	Обеспечивают регулирование напряжения (реактивной мощности) при мощностях в линиях электропередачи как ниже, так и

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
		плавным регулированием угла зажигания тиристоров. Параллельно с ТРГ подключена конденсаторная батарея (КБ), а иногда и фильтро-компенсирующие цепи (ФКУ). Подключается к сети ВН через третичную обмотку НН автотрансформатора или через блочный повышающий трансформатор. Минимальная величина постоянной времени регулирования реактивной мощности составляет $\tau_{p\Sigma} = 0{,}01 - 0{,}02c$	выше натуральной. Предназначены также для повышения устойчивости и пределов передаваемой по линиям электропередачи мощности. Предпочтительная область применения: распределительные и магистральные сети, межсистемные связи для целей глубокого регулирования реактивной мощности и обеспечения устойчивости. Не эффективны в «слабых» сетях
6.	Статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения (СТАТКОМ)	Состоит из преобразователя напряжения, выполненного на силовых транзисторах, обеспечивающего генерацию и потребление реактивной мощности в диапазоне $\pm$ 100% установленной мощности устройства, без дополнительных силовых реакторов и конденсаторных батарей. Подключение к сети ВН через третичную обмотку НН автотрансформатора или через отдельный повышающий трансформатор НН/ВН	Применяется для динамической стабилизации напряжения, увеличения пропускной способности электропередачи, уменьшения колебаний напряжения, повышения устойчивости при электромеханических переходных процессах, улучшения демпфирования колебаний в энергосистеме. Применяется в любых электрических сетях, особенно эффективен в «слабых» сетях
7.	Фазоповоротное устройство (ФПУ)	Устройство, переключающее посредством выключателей или тиристорных ключей отпайки трансформатора, обеспечивающее регулирование фазы входного напряжения по отношению к выходному	Применяется для оптимизации в установившихся режимах потоков мощности по параллельным ЛЭП, повышения пропускной способности. Может применяться для повышения статической и динамической устойчивости энергосистем.
8.	Асинхронизи-рованные компенсаторы (АСК)	Является комплексом, состоящим из асинхронизированных электрических машин переменного тока и статических преобразователей частоты. Содержит на роторе две и более обмоток возбуждения, благодаря чему обеспечивается возможность регулирования реактивной мощности в пределах $\pm 100\%$ колебания. Обеспечивается также возможность регулирования не только величины, но и фазы вектора напряжения в энергосистеме. АСК обладают высокой перегрузочной способностью (двух – трех кратная перегрузка) по току в течение 300 сек. Возможна работа с переменной частотой вращения с маховиком на валу с целью повышения пределов динамических характеристик энергосистем	Применяются для регулирования напряжения и повышения пределов статической и динамической устойчивости, увеличения пропускной способности электропередачи, улучшения демпфирования энергосистемы. Применяются в любых электрических сетях, особенно эффективны в «слабых» сетях
9.	Батарея статических конденсаторов	Устройства емкостного типа для параллельного подключения к линиям	Для увеличения пропускной способности линий электропередачи сверх натуральной мощности, и

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
	(БСК)		регулирования уровня напряжения
10.	Управляемые устройства продольной компенсации) (УУПК, ТУПК)	Тиристорно-управляемые устройства продольной компенсации	Емкостная продольная компенсация для увеличения пропускной способности ВЛ сверх значения натуральной мощности, регулирования параметров режимов и повышения динамической устойчивости
11.	Объединенные регуляторы потока мощности (ОРПМ)	Устройства, обеспечивающие изменение фазы напряжения на выходе по отношению к входу	Позволяют осуществлять регулирование величины передаваемой по ВЛ мощности

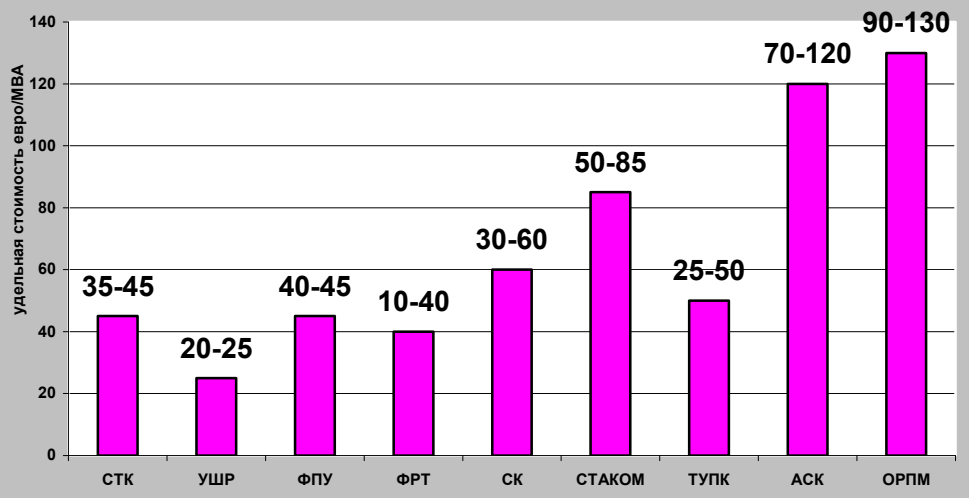

Рис. 6. Компенсирующие и управляющие устройства типа FACTS

5. Определение эффективности применения устройств типа FACTS для повышения пропускной способности ВЛ нового поколения, сверх и естественной пропускной способности.

Линии электропередачи нового поколения (компактные одноцепные, двухцепные, многоцепные, а также УСВЛ) обеспечивают при сопоставимых условиях существенно большую по сравнению с ВЛ обычного типа пропускную способность, благодаря улучшенным параметрам и увеличенной натуральной мощности линии.

Естественно полагать, что применение устройств типа FACTS на ВЛ нового поколения для дальнейшего повышения пропускной способности сверх их естественного значения, будет более эффективным, чем на ВЛ традиционных типов. Доказательством этого может служить, например, такой критерий, как коэффициент эффективности применения устройств FACTS емкостного типа для увеличения пропускной способности ВЛ различного исполнения, выраженный в виде показателя:

$$K_{KÓ}^{Ñ} = \frac{Ð_{\Sigma} - Ð_{Í\,ÀÒ}}{Q_{KÓ}^{Ñ}},$$

где: P_{Σ} – суммарная величина передаваемой по линии мощности, достигнутая с участием устройств FACTS;

$P_{нат}$ – величина натуральной мощности линии;

$Q_{KÓ}^{Ñ}$ - реактивная мощность компенсирующих устройств FACTS емкостного типа.

Применяя изложенный подход и используя расчетные данные режимов одной из энергосистем, удалось оценить эффективность применения устройств типа FACTS на примере ВЛ-220 кВ различных типов для достижения одного и того же эффекта повышения их пропускной способности.

Данные для анализа эффективности применения устройств типа FACTS сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Сопоставительные данные расчета эффективности применения устройств FACTS емкостного типа для увеличения передаваемой мощности на ВЛ-220 кВ различных типов

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Типы ВЛ-220 кВ				
			Двух-цепные ВЛ-220 обычного типа	Двух-цепные компакт-ные ВЛ-220	Двух-цепные УСВЛ-220	Трех-цепные компакт-ные ВЛ-220	Трех-цепные компакт-ные ВЛ-220
1.	Протяженность ВЛ	км	427	427	427	427	427
2	Количество цепей		2	2	2	3	3
3	Провода в фазах		1хАС-300	2хАС-300	2хАС-300	2хАС-300	2хАС-300
4	Величина натуральной мощности линии при U=220 кВ	МВт	240	391	448	563	563
5	Передаваемая мощность	МВт	570	570	570	570	870
6	Превышение передаваемой мощности по отношению к натуральной мощности ВЛ	МВт	330	179	122	0	307
7	Мощность компенсирующих устройств FACTS емкостного типа	МВАр	302	138	101	0	198
8	Коэффициент эффективности применения устройств FACTS емкостного типа $K_{ку}^{с}$	МВт/ МВАр (о.е)	1,09	1,29	1,2	-	1,55

Данные, приведенные в таблице 3, показывают, что при принятых расчетных условиях коэффициент эффективности применения устройств типа FACTS для обычных ВЛ составляет 1,09 МВт/МВАр, а для ВЛ нового поколения (1,2 - 1,5) МВт/ МВАр.

Для повышения пропускной способности воздушных линий электропередачи нового поколения, сверх естественного значения, наиболее эффективно применение устройств FACTS емкостного типа: УУПК, БСК, СК, СТК, СТАТКОМ, АСК.

6. Технические предложения по применению управляемых линий электропередачи на базе ВЛ нового поколения

Выполненные расчеты, сопоставления полученных результатов и их анализ позволяют сформулировать ряд основных технических предложений по применению ВЛ нового поколения.

Прежде всего надо отметить, что при принятии решений о применении ВЛ новых типов следует принимать во внимание то, что они обладают повышенной пропускной способностью, благодаря чему область их целесообразного применения отличается от области применения ВЛ традиционных конструкций. Основным показателем, характеризующим сопоставляемые типы ВЛ, является величина их натуральной мощности. В качестве других, не менее важных, следует также считать такие показатели, как удельные капитальные вложения на единицу величины передаваемой мощности, удельную площадь и ширину полосы отчуждения, а также экологические параметры, и, в первую очередь, акустические шумы, радиопомехи, уровни напряженности электрического поля под ВЛ вблизи поверхности земли.

В зависимости от значений параметров ВЛ нового поколения, конкретных расчетных и режимных условий определяются требования и к устройствам FACTS, их типу и мощности.

Технические требования к управляемым ВЛ нового поколения, созданным на базе ВЛ повышенной пропускной способности, определяются той ролью, которая возлагается на ВЛ, а также расчетными условиями и ограничениями.

В зависимости от локальных или системных требований к электропередачам должен производиться и выбор устройств FACTS с учетом их технических и технологических возможностей.

При сопоставлениях и обосновании вариантов целесообразно рассматривать следующие типы ВЛ переменного тока:

- обычные трехфазные, одноцепные ВЛ (ООВЛ);
- обычные двухцепные ВЛ (ОДВЛ);
- одноцепные компактные трехфазные ВЛ (ОКВЛ);
- двухцепные компактные ВЛ с транспозицией фаз цепей, обеспечивающей между любыми соседними фазами угловой сдвиг векторов напряжений $\theta=120^o$ (ДКВЛ);
- двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ), работающие в режимах при различных угловых сдвигах трехфазных систем векторов напряжений цепей: при фиксированных значениях $\theta=0^o$, $\theta=120^o$, $\theta=180^o$; или регулируемых - $\theta=0^o\div120^o$; $\theta=0^o\div180^o$.
- трехцепные компактные ВЛ с транспозицией фаз цепей, обеспечивающей между любыми соседними фазами угловой сдвиг напряжений $\theta=120^o$ (ТКВЛ), а также трехцепные УСВЛ при $\theta=0^o\div120^o$.

Для обеспечения требуемых параметров режимов указанных ВЛ при различных рассмотренных условиях необходимо применение в том или ином сочетании устройств FACTS, обладающих свойствами емкостной или индуктивной компенсации. Под емкостной компенсацией подразумевается возможность устройств FACTS генерировать реактивную мощность с целью покрытия недостающей зарядной мощности линии для компенсации ее потерь в линии при передаче по ней активной

мощности. Под индуктивной компенсацией понимается возможность устройств FACTS потреблять избыточную зарядную мощность линии для поддержания заданных уровней напряжений в узлах энергосистемы. Проведенные исследования позволяют на данном этапе сформулировать технические предложения по созданию и применению ВЛ различных типов и выбору для них устройств FACTS, которые по своим функциональным возможностям наиболее эффективно могут быть применены в сочетании с ВЛ повышенной пропускной способности. Устройства FACTS в своем большинстве могут быть применены в электроэнергетических системах в сочетании с ВЛ любых типов. Все устройства FACTS, носящие емкостной характер, обеспечивают дополнительную генерацию реактивной мощности и соответствующее повышение пропускной способности ВЛ сверх величины их натуральной мощности.

Применение устройств FACTS индуктивного типа, как правило, обусловлено необходимостью компенсации избыточной зарядной мощности, с целью поддержания заданных уровней напряжения при передаче по ВЛ активной мощности, величина которой ниже, чем значение натуральной мощности. Применение устройств FACTS, обладающих как емкостными, так и индуктивными техническими свойствами, должно определяться на основе конкретных расчетов режимных характеристик электропередачи, а также с учетом их стоимости. Устройства FACTS, обеспечивающие регулирование угла сдвига между системами векторов напряжений на входе и выходе, имеют свою область применения, в частности, для управления потоками мощности в замкнутых контурах энергосистемы, а также для регулирования режимов УСВЛ.

Выбор типов ВЛ в сочетании с устройствами FACTS основывается на расчетах параметров, режимных и стоимостных показателей в соответствии с заданными исходными данными и намеченной функциональной ролью электропередач.

На основании проведенного анализа функциональных признаков были сформулированы области применения ВЛ нового поколения:

1. Применение в качестве межсистемных транспортных связей, в том числе - для осуществления обменных перетоков мощности между автономно работающими энергосистемами или между узлами сложно замкнутой энергосистемы.
2. Применение в качестве внутрисистемных распределительных ВЛ.
3. Использование для выдачи мощности от удаленных электростанций. При этом эффективной может оказаться замена существующих ВЛ традиционной конструкции на ВЛ нового поколения при увеличении генерируемых мощностей.
4. Применение для электроснабжения удаленных крупных потребителей, в том числе замена существующих ВЛ традиционной конструкции на ВЛ нового поколения при увеличении потребляемой мощности и невозможности строительства дополнительных ВЛ.
5. Осуществление с помощью глубоких вводов в крупных городах и населенных пунктах.

Каждая из указанных областей применения ВЛ нового поколения различных классов напряжения имеет свои отличительные особенности, а также диапазоны передаваемых мощностей. ВЛ нового поколения во всех случаях их применения должны отвечать общим требованиям:

- удовлетворять всем нормативам по уровням напряжения вдоль ВЛ и в узлах примыкания;
- не превышать нормативные ограничения по экологическим параметрам;
- обеспечивать заданные величины пропускной способности при минимальных потерях мощности;
- обеспечивать заданные показатели надежности работы.

Специальными требованиями к ВЛ нового поколения, вытекающими из особенностей указанных областей применения ВЛ-220 кВ, могут быть:

- обеспечение заданного запаса статической и динамической устойчивости электропередачи (области 1, 3);
- создание возможностей регулирования величины передаваемой мощности, включая и изменение направления передачи мощности (области 1, 2);
- изъятие минимально возможных земельных полос отчуждения под строительство ВЛ (области 4, 5).

Указанным требованиям можно удовлетворить путем выбора тех или иных типов ВЛ нового поколения и соответствующих средств регулирования типа FACTS.

Рекомендуемыми областями применения ВЛ нового поколения напряжением 220 кВ с учетом требований по пропускной способности могут служить данные по их параметрам и величине натуральной мощности. В таблице 4 приведены величины натуральной мощности для различных типов ВЛ-220.

Таблица 4

Значение натуральной мощности ВЛ-220 кВ различных типов (при $U_{расч.}$=252 кВ

№ п/п	Наименование типов ВЛ-220 кВ	Размерность	Величина натуральной мощности, МВт	
			на одну цепь	на линию в целом
1.	Одноцепные ВЛ-220 кВ традиционной конструкции (провода АС-330/66)	МВт	155,1	155,1
2.	Компактная одноцепная ВЛ-220 кВ (провода АС-300/66)	МВт	277,9	277,9
3.	Двухцепная ВЛ-220 кВ традиционной конструкции (провода АС-300/66)	МВт	152,3	304,6
4.	Двухцепная компактная транспонированная ВЛ-220 кВ (провода 2хАС-300/66)	МВт	254,5	509,0
5.	Двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ-220 кВ (УСВЛ-220) (провода 2хАС-300/69): при θ=120º при θ=180º	 МВт МВт	 264,5 291,5	 529 583
6.	Трехцепные компактные транспонированные ВЛ-220 кВ (провода 2хАС-300/39)	МВт	300	900
7.	Трехцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ-220 кВ (трехцепные УСВЛ-220 кВ с проводами 2хАС-300/39): при θ=120º	МВт	300	900

Для увеличения пропускной способности приведенных типов ВЛ-220 кВ сверх величины натуральной мощности необходимо применение устройств FACTS емкостного типа. Расчетная мощность таких устройств может быть определена с учетом полученных результатов, а именно - каждый МВАр устройств FACTS емкостного типа обеспечивает увеличение пропускной способности ВЛ-220 кВ:

- двухцепных ВЛ обычной конструкции – на 1,09 МВт/ МВАр;
- двухцепных компактных ВЛ и двухцепных УСВЛ – на 1,2÷1,3 МВт/ МВАр;
- трехцепных компактных ВЛ и трехцепных УСВЛ – на 1,3÷1,5 МВт МВАр.

Для регулирования уровня напряжения ВЛ-220 кВ при изменении величины передаваемой мощности от величины максимальной до минимальной, включая режим холостого хода, на ВЛ-220 кВ рассматриваемых типов должны быть установлены устройства FACTS индуктивного характера.

На УСВЛ-220 кВ целесообразно устанавливать, кроме указанных устройств FACTS, фазоповоротные устройства (ФПУ), что позволяет в комплексе осуществлять управление параметрами режимов электропередачи, а также выполнять управление потоками мощности в замкнутых контурах энергосистемы.

Заключение

1. Увеличение пропускной способности электрической сети за счет применения ВЛ нового поколения в сочетании с устройствами FACTS оказывается одним из наиболее экономичных средств развития электрических сетей, поскольку позволяет снизить затраты на передачу мощности и энергии за счет уменьшения удельных затрат на строительство ВЛ и более эффективного использования устройств регулирования. При этом надо учитывать дополнительный эффект за счет повышения эффективности использования проводникового материала линии и сокращения площади земельных угодий, отчуждаемых под ВЛ.

2. В качестве ВЛ нового тип рассмотрены следующие виды ВЛ:

- компактные трехфазные одноцепные ВЛ (ОКВЛ);
- компактные трехфазные двухцепные ВЛ (ДКВЛ);
- управляемые двухцепные и многоцепные самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ);
- комбинированные многоцепные управляемые ВЛ, включающие компактные ВЛ и УСВЛ.

3. Применение ВЛ нового поколения наиболее эффективно совместно с установкой современных средств регулирующих устройств типа FACTS, придающих им свойства кибернетически управляемых электропередач (гибких электропередач типа Smart grid). Использование регулирующих устройств совместно с ВЛ нового поколения повышенной пропускной способности отличается большей эффективностью, чем их применение на ВЛ традиционных конструкций.

4. Рассмотренные конкретные варианты ВЛ нового поколения напряжением 220 кВ с проводами в фазах 2хАС-300/66 характеризуются следующими основными показателями:

<u>Одноцепные компактные ВЛ-220 кВ:</u>

- величиной натуральной мощности (Рнат) 277 МВт;
- отношением натуральной мощности к ширине коридора (Рнат/Lk) 6,46 МВт/м;
- удельной стоимостью 1 км ВЛ в расчете на 1 МВт натуральной мощности (Куд) 5,93 тыс.руб./км·МВт;

<u>Двухцепные компактные ВЛ-220 кВ:</u>

Рнат=509 МВт; Рнат/Lk=8,39 МВт/м; Куд =5,13 тыс.руб./км·МВт;

<u>Двухцепные управляемые (УСВЛ):</u>

Рнат=(209÷583)МВт, Рнат/Lk=(9,2÷10,1)МВт/м;Куд =(4,8÷4,4) тыс.руб./км·МВт;

<u>Трехцепные управляемые (УСВЛ):</u>Рнат=900 МВт.

5. По величине пропускной способности двухцепные и трехцепные компактные ВЛ и УСВЛ напряжением 220 кВ приближаются к одноцепным ВЛ-500 кВ традиционной конструкции, а поэтому могут в ряде случаев рассматриваться по отношению к ним в качестве альтернативных вариантов. Предварительные расчеты показали, что удельная стоимость одноцепной ВЛ-500 кВ и двухцепной (трехцепной) УСВЛ-220 кВ в расчете на 1 МВт/км натуральной мощности практически одинаковы.

При замене варианта одноцепной ВЛ-500 кВ традиционной конструкции двухцепной (или трехцепной) УСВЛ-220 кВ может быть достигнут значительный

экономический выигрыш за счет того, что стоимость подстанции 220 кВ более чем в 1,5 раза ниже, чем стоимость подстанции напряжением 500 кВ.

6. Приведенные методические подходы позволяют осуществлять выбор и обоснование применения электропередач нового поколения и средств регулирования на стадии проектных решений с учетом конкретных требований и расчетных условий.

Литература

1. Электропередача переменного тока/ В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, Г.В. Чалый, Л.П. Калинин. А.с. 566288 (СССР). / Заявл. 21.03.74. № 2006496. Опубл. В Б.И.,1977, № 27.

2. Электропередача переменного тока / Постолатий В.М., Веников В.А., Астахов Ю.Н., Чалый Г.В., Калинин Л.П. 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.В. Дорофеев. Развитие электроэнергетической системы России с использованием принципов активно – адаптивной сети. Доклады 6-й Международной конференции ТРАВЭК, Москва, 2010.

Сведения об авторах:

Постолатий Виталий Михайлович, д.х.т.н, академик АН Молдовы, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические станции, сети и системы и управление ими, управляемые, гибкие, компактные электропередачи, современные средства регулирования, энергетическая безопасность, общие вопросы энергетики.

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.

Суслов Виктор Миронович, научный сотрудник Лаборатории управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, моделирование процессов в энергетике.

Шакарян Юрий Гевондович, заместитель генерального директора НТЦ «Электроэнергетика» (ВНИИЭ), г. Москва, д.т.н., профессор. Сфера научных интересов: электрические станции, сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства и системы регулирования, сверхпроводящие кабельные линии электропередачи, электропривод, моделирование процессов в энергетике.

Тимашова Лариса Владимировна, начальник центра электротехнического оборудования НТЦ «Электроэнергетика» (ВНИИЭ), г. Москва. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства регулирования, электротехническое оборудование, климатология, проблемы экологии.

Карева Светлана Николаевна, инженер Центра электротехнического оборудования НТЦ «Электроэнергетика», (ВНИИЭ), г. Москва. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства регулирования, электротехническое оборудование, техника высоких напряжений.

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Берзан В.П., Пацюк В.И., Римский В.К., Тыршу М.С., Андрос И.В.
Институт энергетики АН Молдовы
E-mail:berzan@ie.asm.md
Шелягин В.Д., Никулин А.Т., Бернацкий А.В.
Институт электросварки им. Е.О. ПАТОНА НАН Украины
E-mail: laser-77@online.ua

Аннотация. Предложен метод параметрического анализа компенсации реактивной мощности тяговой сети в зависимости от положения нагрузки на перегоне между двумя тяговыми подстанциями. Получены решения задачи в явном виде при одностороннем и двустороннем питании комплексной нагрузки тяговой сетью. Выполнен параметрический анализ влияния активной нагрузки на характеристики компенсирующих устройств, смонтированных на шинах низкого напряжения тяговых подстанций в зависимости от местоположения этой нагрузки между источниками питания и самой нагрузки. Показано, что в зависимости от точки присоединения активной нагрузки к сети и ее значения компенсирующее устройство в общем случае должно генерировать как индуктивную, так и емкостную реактивную мощность для обеспечения значения коэффициента мощности тяговой сети $\cos\varphi = 1$.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсация.

Compensarea puterii reactive a reţelei de tracţiune a transportului feroviar electrificat

Berzan V.P., Patsyuk V.I., Rimschi V.X., Tirşu M.S., Andros I.V.
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei.
E-mail:berzan@ie.asm.md
Şeliaghin V.D., Nikulin A.T., Bernackiy A.V.
Institutul de sudare electrică "E.O.Paton" al Academiei Naţionale de Ştiinţe a Ukrainei
E-mail: laser-77@online.ua

Rezumat. S-a propus metoda de analiză parametrică privind compensaţia a puterii reactive a reţelei electrice de tracţiune în funcţie de punctul de conectare a sarcinii plasată intre două staţii de tracţiune. S-au obţinut soluţiile în formă evidentă a problemei la alimentarea sarcinii de la o singură sursă şi de la două surse de curent alternativ cu puterea nelimitată. S-a efectuat analiza parametrică privind influenţa sarcinii active asupra parametrilor şi caracteristicilor instalaţiilor de compensare a puterii reactive montate la barele de joasă tensiune a staţiei de tracţiune, precum şi a influenţei valorii acestei sarcini. S-a demonstrat, că în dependenţă de punctul de conectare a sarcinii la reţeaua de tracţiune, a valorii sarcinii instalaţia de compensaţie trebuie să genereze atât putere activă cu caracter capacitiv, cât şi putere cu caracter inductiv pentru a asigura valoarea factorului de putere la barele staţiilor de tracţiune $\cos\varphi = 1$

Cuvinte–cheie: compensarea, puterea.

REACTIVE POWER COMPENSATION OF THE TRACTION NETWORK OF THE ELECTRIFIED RAILWAY TRANSPORTATION

Berzan V.P., Patsyuk V.I., Rimschi V.X., Tirsu M.S., Andros I.V.
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova.
E-mail:berzan@ie.asm.md
Sheliagin V.D., Nikulin A.T., Bernackiy A.V.
Electrical Welding Institute "E.O.Paton" of the National Academy of Sciences of Ukraine
E-mail: laser-77@online.ua

Summary. The method of the parametrical analysis of reactive power compensation of traction network depending on loading position on stage between two traction substations is offered. Problem solutions are received in an explicit form at a unilateral and bilateral supplying of complex loading by traction network. The parametrical analysis of active loading influence on characteristics of the compensating devices mounted on low voltage bars of traction substations depending on a site of this loading between power supplies and the loading is made. It is shown, that depending on point of joining of active loading to network and its values the compensating device

generally should generate both inductive, and capacitive reactive power for maintenance of power factor value of traction network $\cos\varphi = 1$.

Key words: reactive power, compensation, electrified, railway.

1. Введение

Электрическая энергия применяется сегодня во всех отраслях экономики, а энергетика как базовая отрасль имеет очень развитую инфраструктуру. В данной инфраструктуре имеются сектора обеспечения первичными энергоресурсами, их преобразования в электрическую энергию, системы транспорта и распределения электрической энергии различным категориям потребителей.

Все электроприемники переменного тока являются потребителями как активной, так и реактивной мощности, причем, только генераторы электрических станций являются источниками активной мощности. Реактивная мощность, которая циркулирует между нагрузкой и генератором, приводит к дополнительным потерям и к снижению показателей энергетической эффективности цепочки: производство - транспорт-распределение - потребление [1].

Тем не менее, реактивная мощность необходима потребителям, которые используют переменное магнитное поле: асинхронные двигатели, индукционные печи, сварочные трансформаторы, выпрямители и т.п., а также звенья электрической сети – трансформаторы, реакторы и другое оборудование. Около 60% всей реактивной мощности, связанной с образованием переменных магнитных полей, потребляют асинхронные двигатели и около 25% – трансформаторы [2,3].

Наращивание энергетических мощностей приводит к известному удалению электростанций от нагрузочных узлов, но при этом передача реактивной мощности на большие расстояния практически невозможна и экономически нецелесообразна [4]. В силу особенностей физических процессов при передаче и распределение электрической энергии сами эти технические системы, являющиеся структурными элементами электроэнергетических систем, выступают в качестве генераторов и потребителей реактивной энергии. Эта особенность приводит к необходимости принятия специальных мер для компенсации реактивной мощности, особенно в протяжных линиях электропередачи. Другим фактором, определяющим соотношение между активной и реактивной мощностью, является сама нагрузка. Этот фактор также приведет к появлению в питающей сети потоков реактивной мощности, которые влияют на режим сети и на уровень технологических потерь при передаче электрической энергии потребителю.

При отсутствии локальной компенсации реактивной мощности потребитель переплачивает за потребление реактивной энергии сумму в размере около 30-40% от общей стоимости оплачиваемой энергии [5].

Использование устройств компенсации, например, конденсаторных установок позволяет [5,6]:

- разгрузить питающие линии электропередачи, трансформаторы и распределительные устройства;
- снизить расходы на оплату электроэнергии;
- снизить уровень высших гармоник при использовании определенного типа установок;
- подавить сетевые помехи, уменьшить несимметрию фаз;
- сделать распределительные сети более надежными и экономичными.

Поскольку реактивная мощность может генерироваться не только электрическими генераторами, но и статическими и вращающимися компенсирующими устройствами: конденсаторами, синхронными компенсаторами,

линиями электропередачи, то использование таких устройств для компенсации реактивной мощности и управления режимами в энергосистеме является вполне очевидным и реализуемым техническим решением.

В качестве показателя потребления цепью реактивной мощности используется коэффициент мощности cosφ [7]. В работе [1] отмечается, что этот показатель является малочувствительным при компенсации реактивной мощности, поскольку даже при значении $\cos\varphi = 0,95$ нагрузка потребляет реактивную мощность, которая составляет 33% от значения потребляемой активной мощности. Более удачным показателем в данной работе признается $tg\varphi = Q/P$, где Q, P – соответственно величины реактивной и активной мощности нагрузки. Можно отметить, что имеется определенная тенденция в нормировании более высоких допустимых значений величин используемых для оценки уровня потребления реактивной мощности в электрических цепях. Например, в 2007 году в РФ [8] установлены следующие требования к минимальному значению коэффициента мощности для точек присоединения потребителя к электрической сети: значение коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,944$ $(tg\varphi = 0,35)$ для сети 0,4 кВ и $\cos\varphi = 0,93$ $(tg\varphi = 0,4)$ для сети 6–20 кВ. [1]. Такое ужесточение вполне обосновано экономически. Так, например, за счет компенсации реактивной мощности нагрузки (повышение значения коэффициента мощности от $\cos\varphi = 0,5$ до предписанного значения) потери энергии в сети от реактивной мощности уменьшаются более чем на 60% [9]. Малая чувствительность изменения контролируемого параметра $\cos\varphi$ к изменению реактивной мощности $(\Delta cos\varphi / \Delta Q)$, а также неоднозначность нормирования параметра $tg\varphi$ усложняет системы управления и регулирования устройств компенсации и/или генерирования реактивной мощности. Это может быть основанием для предложения новых информативных показателей управления режимом компенсации реактивной мощности, которые были бы более чувствительными и адаптированными к системам регулирования и повышения показателей энергетической эффективности.

Наиболее эффективным и масштабным направлением сокращения потребления энергоресурсов и повышения энергетической эффективности является отраслевое энергосбережение за счет внедрения новых и усовершенствования существующих энергосберегающих технологий и оборудования [10-13], в том числе и на железнодорожном транспорте [14-15].

Принципиальным отличием тяговой сети железнодорожного электрифицированного транспорта переменного тока от традиционных распределительных сетей состоит в том, что нагрузка может изменяться не только во времени, но и передвигаеться в пространстве с определенной скоростью. Данная цепь имеет переменные во времени параметры и структуру, что усложняет задачу исследования стационарных и нестационарных процессов в данной цепи, а также компенсацию реактивной мощности с целью обеспечения требуемого значения коэффициента мощности на шинах тяговой подстанции.

Для таких цепей предложено использовать мгновенные расчетные схемы при заданном положении поезда на перегоне, причем в этом случае методы их расчета аналогичны расчетам сетей с сосредоточенными параметрами и стационарными нагрузками с сосредоточенными параметрами [16, 17]. Иногда сосредоточенные нагрузки в фидерной зоне тяговой сети заменяют на распределенные нагрузки вдоль сети [17], получая при этом цепочечные схемы замещения тяговой сети, что в целом представляется искусственным приемом.

Переменный характер нагрузки и изменение ее положения в пространстве создают сложности для обеспечения режима компенсации реактивной мощности на

шинах тяговых подстанций, например, стационарными нерегулируемыми батареями конденсаторов. Поэтому на ж/д начали применять регулируемые ступенями конденсаторные батареи, а для компенсации индуктивного падения напряжения использовать также продольную емкостную компенсацию [16, 17]. Как показано в [18], даже для цепи с постоянной структурой проблема компенсации реактивной мощности и повышения передаваемой мощности в нагрузку по электрической сети с постоянной топологией не является тривиальной задачей, и тем более это относится к случаю поперечной и/или продольной емкостной компенсации в тяговой сети.

Целью данной работы является разработка аналитического метода параметрического анализа компенсации реактивной мощности в зависимости от положения нагрузки на перегоне между двумя тяговыми подстанциями, а также определение влияния тяговой сети на режимы потребления и компенсации реактивной мощности на шинах тяговых подстанций при изменении точки подключения нагрузки к контактной сети. Для определения именно особенностей влияния сети на режим компенсации реактивной мощности в данной работе сделано допущение, что нагрузка сети имеет чисто активный характер, т.е. $\cos \varphi_н=1$.

2. Постановка задачи

Рассмотрим модельную задачу минимизации потребления реактивной мощности на входе и выходе участка тяговой сети электрифицированного участка железной дороги, расположенного между двумя трансформаторными подстанциями и питаемого с обоих концов однофазным переменным током. Представим тяговую электросеть как однопроводную длинную линию с распределенными погонными параметрами L, C, R, G. Вдоль участка сети длиной l движется электровоз, представляющий собой активную нагрузку, которую обозначим как R_S. Для минимизации значения реактивной мощности расположим в начале и в конце рассматриваемого участка тяговой сети (практически на шинах низкого напряжения тяговых подстанций) компенсирующие устройства с реактивными сопротивлениями X, которые подключены к тяговой сети параллельно. Рассмотрим сеть с двумя генераторными и пятью нагрузочными узлами, расположенными так, как это показано на *рис. 1*.

Предположим, что источники переменного напряжения обладают неограниченной мощностью, причем их работа на общие нагрузки не обязательно синхронизирована.

3. Метод решения

Для решения поставленной задачи воспользуемся методикой, приведенной в [1] (параграф 14).

В соответствии с методом комплексных амплитуд (МКА) токи и напряжения в концевых точках однородной линии длиной l связаны соотношениями

$$U_2 = U_1 \mathrm{ch}\gamma l - Z_0 I_1 \mathrm{sh}\gamma l\,;\; Z_0 I_2 = -U_1 \mathrm{sh}\gamma l + Z_0 I_1 \mathrm{ch}\gamma l \qquad (1)$$

или

$$U_1 = U_2 \mathrm{ch}\gamma l + Z_0 I_2 \mathrm{sh}\gamma l\,;\; Z_0 I_1 = U_2 \mathrm{sh}\gamma l + Z_0 I_2 \mathrm{ch}\gamma l\,, \qquad (2)$$

где $Z_0 = \sqrt{\dfrac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$, $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$ - соответственно волновое сопротивление и коэффициент распространения волн тока и напряжения в линии, а U_1, I_1, U_2, I_2 соответственно напряжения и токи на левом и правом концах линии.

Предположим, что рассмотренный участок линии является неоднородным и в точках сопряжения однородных участков подключены нагрузки с сосредоточенными параметрами P_1, P_2, P_3, P_4, P_5. Обозначим длины участков неоднородной линии через l_k, а точки стыковки участков – x_k: $x_k = \sum_{i=1}^{k} l_i$, $k = \overline{1,6}$, $x_0 = 0$, $x_6 = l$. Погонные параметры участка с номером k обозначим через L_k, C_k, R_k, G_k, а волновые сопротивления и коэффициенты распространения волн соответственно – $Z_{0,k}, \gamma_k$.

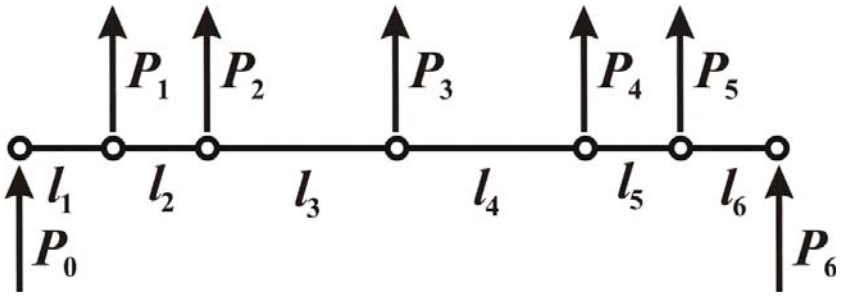

Рис. 1. Схемы расположения генераторных и нагрузочных узлов в сети переменного напряжения

Предположим, что все нагрузки $Z_{n,k}$ имеют комплексный характер и в точках сопряжения включены параллельно. В этом случае напряжение в точках стыка составной линии является непрерывной функцией, тогда как токи претерпевают разрыв первого рода. Обозначим напряжения и токи в узле с номером k как U_k, $I_k^- = I(x_k - 0)$, $I_k^+ = I(x_k + 0)$. Для линии с шестью разнородными участками подлежат определению 19 неизвестных: 7 напряжений U_k в узлах x_k, $k = \overline{0,...,6}$; 2 тока на концах линии $I_0^+ = I_0$, $I_6^- = I_6$ и 10 токов в точках сопряжения I_k^-, I_k^+, $k = \overline{1,...,5}$. Для однозначного определения этих неизвестных требуется построить систему из 19 уравнений. Эта система состоит из 12 уравнений типа (1), (2), пяти уравнений для нагрузки и двух значений напряжения в узлах генерации. Приведем эти уравнения в соответствие со схемой *рис. 1*, где через $\widetilde{U}_0, \widetilde{U}_6$ обозначены известные напряжения на шинах генераторов напряжения в точках x_0 и x_6:

$$U_0 = \widetilde{U}_0;\ Z_{0,1} I_1^- = -U_0 \mathrm{sh}\gamma_1 l_1 + Z_{0,1} I_0 \mathrm{ch}\gamma_1 l_1;$$

$$Z_{0,1} I_0 = U_1 \mathrm{sh}\gamma_1 l_1 + Z_{0,1} I_1^- \mathrm{ch}\gamma_1 l_1;\ U_1 = Z_{n,1}(I_1^- - I_1^+);$$

$$Z_{0,2} I_2^- = -U_1 \mathrm{sh}\gamma_2 l_2 + Z_{0,2} I_1^+ \mathrm{ch}\gamma_2 l_2;$$

$$Z_{0,2}I_1^+ = U_2 \mathrm{sh}\gamma_2 l_2 + Z_{0,2}I_2^- \mathrm{ch}\gamma_2 l_2 ;$$

$$U_2 = Z_{n,2}(I_2^- - I_2^+) ;\ Z_{0,3}I_3^- = -U_2 \mathrm{sh}\gamma_3 l_3 + Z_{0,3}I_2^+ \mathrm{ch}\gamma_3 l_3 ;$$

$$Z_{0,3}I_2^+ = U_3 \mathrm{sh}\gamma_3 l_3 + Z_{0,3}I_3^- \mathrm{ch}\gamma_3 l_3 ;\ U_3 = Z_{n,3}(I_3^- - I_3^+) ; \qquad (3)$$

$$Z_{0,4}I_4^- = -U_3 \mathrm{sh}\gamma_4 l_4 + Z_{0,4}I_3^+ \mathrm{ch}\gamma_4 l_4 ;$$

$$Z_{0,4}I_3^+ = U_4 \mathrm{sh}\gamma_4 l_4 + Z_{0,4}I_4^- \mathrm{ch}\gamma_4 l_4 ;\ U_4 = Z_{n,4}(I_4^- - I_4^+) ;$$

$$Z_{0,5}I_5^- = -U_4 \mathrm{sh}\gamma_5 l_5 + Z_{0,5}I_4^+ \mathrm{ch}\gamma_5 l_5 ;$$

$$Z_{0,5}I_4^+ = U_5 \mathrm{sh}\gamma_5 l_5 + Z_{0,5}I_5^- \mathrm{ch}\gamma_5 l_5 ;\ U_5 = Z_{n,5}(I_5^- - I_5^+) ;$$

$$Z_{0,6}I_6^- = -U_5 \mathrm{sh}\gamma_6 l_6 + Z_{0,6}I_5^+ \mathrm{ch}\gamma_6 l_6 ;$$

$$Z_{0,6}I_5^+ = U_6 \mathrm{sh}\gamma_6 l_6 + Z_{0,6}I_6 \mathrm{ch}\gamma_6 l_6 ;\ U_6 = \widetilde{U}_6 .$$

Если представим неизвестные переменные из системы уравнений (3) в виде транспонированного вектора $\overline{y}$ независимых переменных:

$$\overline{y} = (U_0, I_0, I_1^-, U_1, I_1^+, I_2^-, U_2, I_2^+, I_3^-, U_3, I_3^+, I_4^-, U_4, I_4^+, I_5^-, U_5, I_5^+, I_6, U_6)^T ,$$

то система (3) может быть записана в матричной форме

$$A\overline{y} = \overline{F} , \qquad (4)$$

где вектор $\overline{F} = (\widetilde{U}_0, 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,\widetilde{U}_6)$, а матрица A имеет простую трехдиагональную структуру.

В общем случае система уравнений с такой матрицей может быть записана в виде

$$b_0 y_0 + c_0 y_1 = F_0 ;$$

$$a_i y_{i-1} + b_i y_i + c_i y_{i+1} = F_i ,\ i = \overline{1, n-1} ; \qquad (5)$$

$$a_n y_{n-1} + b_n y_n = F_n .$$

Такие системы очень эффективно решаются методом прогонки по формулам [20]:

$$\alpha_0 = \frac{-c_0}{b_0}, \quad \beta_0 = \frac{F_0}{b_0};$$

$$\alpha_i = \frac{-c_i}{b_i + a_i\alpha_{i-1}}, i = \overline{1, n-1}; \quad \beta_i = \frac{F_i - a_i\beta_{i-1}}{b_i + a_i\alpha_{i-1}}, i = \overline{1, n}; \tag{6}$$

$$y_n = \beta_n; \; y_i = \alpha_i y_{i+1} + \beta_i, i = n-1, n-2, ...1, 0.$$

Для системы (3) можно получить явное решение в виде рекуррентных формул. Вначале покажем, как решается задача с одним генератором на левом конце и с заданными нагрузками $Z_{n,k}$ во всех остальных узлах. Отметим при этом, что рассматриваемая модель цепи питания соответствует тяговой сети с односторонним питанием, т.е. мы и в данном случае рассмотрим модельную задачу, которая принципиально совпадает с принятой схемой электроснабжения на электрифицированной железной дороге [17].

3.1. Решение в явном виде при одностороннем питании тяговой сети

Пусть линия длиной l состоит из N участков длиной l_k с параметрами L_k, C_k, R_k, G_k, $Z_{0,k}$, γ_k, $k = \overline{1, N}$ и питается с генераторного узла P_0, расположенного в точке $x = 0$. Обозначим напряжения и токи в узле с номером k как U_k, $I_k^- = I(x_k - 0)$, $I_k^+ = I(x_k + 0)$, $k = \overline{0, N}$. Тогда на каждом из участков с номером k имеют место соотношения типа (1) – (2), связывающие токи и напряжения на концах

$$Z_{0,k} I_{k-1}^+ = U_k \mathrm{sh}\gamma_k l_k + Z_{0,k} I_k^- \mathrm{ch}\gamma_k l_k;$$

$$U_{k-1} = U_k \mathrm{ch}\gamma_k l_k + Z_{0,k} I_k^- \mathrm{sh}\gamma_k l_k, k = \overline{1, N}. \tag{7}$$

На правом конце линии при $x_N = l$ и в узлах сопряжения $x_k = \sum_{i=1}^{k} l_i, k = \overline{1, (N-1)}$ выполняются условия

$$U_N = Z_{S,N}^- I_N^-, \; Z_{S,N}^- = Z_{n,N},$$

$$U_k = Z_{n,k}(I_k^- - I_k^+), k = \overline{1, (N-1)}. \tag{8}$$

Решение системы (7), (8) при выполнении условия на левом конце $U_0 = \widetilde{U}_0$ строится следующим образом. Из уравнений для последнего участка

$$Z_{0,N} I_{N-1}^+ = U_N \mathrm{sh}\gamma_N l_N + Z_{0,N} I_N^- \mathrm{ch}\gamma_N l_N;$$

$$U_{N-1} = U_N \mathrm{ch}\gamma_N l_N + Z_{0,N} I_N^- \mathrm{sh}\gamma_N l_N$$

с помощью граничного условия $U_N = Z_{S,N}^- I_N^-$ исключаем U_N и вычисляем отношение: $U_{N-1} / I_{N-1}^+ = Z_{BX,N}^+$. Тогда получаем выражение для входного сопротивления $Z_{BX,N}^+$ последнего участка линии $x \in [x_{N-1}, x_N]$, которое включает в себя сопротивление на правом конце и параметры этого участка линии

$$Z_{BX,N}^+ = Z_{0,N} \frac{Z_{0,N} \mathrm{sh}\gamma_N l_N + Z_{S,N}^- \mathrm{ch}\gamma_N l_N}{Z_{0,N} \mathrm{ch}\gamma_N l_N + Z_{S,N}^- \mathrm{sh}\gamma_N l_N}. \quad (9)$$

Таким образом, получаем связь напряжения U_{N-1} и тока I_{N-1}^+

$$U_{N-1} = Z_{BX,N}^+ I_{N-1}^+. \quad (10)$$

Далее используя (10), исключаем I_{N-1}^+ из условия сопряжения (8) в узле x_{N-1}, вычисляем отношение U_{N-1} к I_{N-1}^- и получаем связь напряжения U_{N-1} и тока I_{N-1}^-

$$U_{N-1} / I_{N-1}^- = Z_{S,N-1}^- = \frac{Z_{BX,N}^+ Z_{n,N-1}}{Z_{BX,N}^+ + Z_{n,N-1}}; \quad (11)$$

$$U_{N-1} = Z_{S,N-1}^- I_{N-1}^-. \quad (12)$$

Теперь переходим к участку линии $x \in [x_{N-2}, x_{N-1}]$. Из уравнений для этого участка

$$Z_{0,N-1} I_{N-2}^+ = U_{N-1} \mathrm{sh}\gamma_{N-1} l_{N-1} + Z_{0,N-1} I_{N-1}^- \mathrm{ch}\gamma_{N-1} l_{N-1};$$

$$U_{N-2} = U_{N-1} \mathrm{ch}\gamma_{N-1} l_{N-1} + Z_{0,N-1} I_{N-1}^- \mathrm{sh}\gamma_{N-1} l_{N-1}$$

с помощью условия (12) $U_{N-1} = Z_{S,N-1}^- I_{N-1}^-$ исключаем U_{N-1} и вычисляем отношение $U_{N-2} / I_{N-2}^+ = Z_{BX,N-1}^+$. Тогда приходим к выражению для входного сопротивления $Z_{BX,N-1}^+$, соответствующего двум последним участкам линии $x \in [x_{N-2}, x_N]$:

$$Z_{BX,N-1}^+ = Z_{0,N-1} \frac{Z_{0,N-1} \mathrm{sh}\gamma_{N-1} l_{N-1} + Z_{S,N-1}^- \mathrm{ch}\gamma_{N-1} l_{N-1}}{Z_{0,N-1} \mathrm{ch}\gamma_{N-1} l_{N-1} + Z_{S,N-1}^- \mathrm{sh}\gamma_{N-1} l_{N-1}}. \quad (13)$$

Таким образом получаем следующую связь между напряжением U_{N-2} и током I_{N-2}^+:

$$U_{N-2} = Z^{+}_{BX,N-1} I^{+}_{N-2}. \qquad (14)$$

Далее, используя (14), исключаем I^{+}_{N-2} из условия сопряжения (8) в узле x_{N-2}, вычисляем отношение U_{N-2} к I^{-}_{N-2} и получаем связь напряжения U_{N-2} и тока I^{-}_{N-2}:

$$U_{N-2} / I^{-}_{N-2} = Z^{-}_{S,N-2} = \frac{Z^{+}_{BX,N-1} Z_{n,N-2}}{Z^{+}_{BX,N-1} + Z_{n,N-2}}; \qquad (15)$$

$$U_{N-2} = Z^{-}_{S,N-2} I^{-}_{N-2}. \qquad (16)$$

Продолжая этот процесс, получаем рекуррентные формулы для напряжений и токов, которые для участка с номером *k* имеют вид

$$Z^{+}_{BX,k} = Z_{0,k} \frac{Z_{0,k} \mathrm{sh}\gamma_k l_k + Z^{-}_{S,k} \mathrm{ch}\gamma_k l_k}{Z_{0,k} \mathrm{ch}\gamma_k l_k + Z^{-}_{S,k} \mathrm{sh}\gamma_{k1} l_k};$$

$$U_{k-1} = Z^{+}_{BX,k} I^{+}_{k-1}, \; k = \overline{1,N}; \; Z^{-}_{S,k-1} = \frac{Z^{+}_{BX,k} Z_{n,k-1}}{Z^{+}_{BX,k} + Z_{n,k-1}};$$

$$U_{k-1} = Z^{-}_{S,k-1} I^{-}_{k-1}, \; k = \overline{2,(N+1)}. \qquad (17)$$

Решение задачи для токов и напряжений формируется последовательными вычислениями по формулам (17), начиная с известного значения напряжения на левом конце линии $U_0 = \widetilde{U}_0$.

По такой же методике можно получить решение в явном виде, когда нагрузка питается только от генераторного узла P_6, расположенного на правом конце рассматриваемого участка. При этом полагаем, что заданными являются нагрузки $Z_{n,k}$ в точках сопряжения которые имеют комплексный характер, и при этом выполняются граничные условия для левого конца тяговой линии $U_0 = -Z^{+}_{S,0} I^{+}_0 = -Z_{n,0} I^{+}_0$. Повторяя для этого случая преобразования уравнений данной цепи по способу, приведенному выше, но для задачи с генератором на левом конце, получаем расчетные формулы, аналогичные (17):

$$Z^{-}_{BX,k} = Z_{0,k} \frac{Z_{0,k} \mathrm{sh}\gamma_k l_k + Z^{+}_{S,k-1} \mathrm{ch}\gamma_k l_k}{Z_{0,k} \mathrm{ch}\gamma_k l_k + Z^{+}_{S,k-1} \mathrm{sh}\gamma_{k1} l_k};$$

$$U_k = -Z^{-}_{BX,k} I^{-}_k, \; k = \overline{1,N}; \; Z^{+}_{S,k} = \frac{Z^{+}_{BX,k} Z_{n,k}}{Z^{+}_{BX,k} + Z_{n,k}};$$

$$U_k = -Z^{+}_{S,k} I^{+}_k, \; k = \overline{1,(N-1)}. \qquad (18)$$

3.2. Решение в явном виде при двустороннем питании тяговой сети

В силу линейности рассматриваемой цепи можно получить решение задачи в явном виде для случая питания нагрузки одновременно от двух тяговых подстанций. Для этого воспользуемся полученными решениями для случаев одностороннего питания нагрузки. Формулы (17) и (18) позволяют получить решение задачи с двумя генераторами для узлов, изображенных на *рис. 1*. С этой целью по формулам (17) определим решение задачи с генератором на левом конце и условием $U_6 = 0$ или $Z_{S,6}^{-} = 0$ на правом конце, что равносильно КЗ правого конца линии, а по формулам (18) решим задачу с генератором на правом конце и условием $U_0 = 0$ или $Z_{S,0}^{+} = 0$, т.е. с короткозамкнутым левым концом. В силу линейности определяющих уравнений решение исходной задачи получается как сумма решений двух задач с одним действующим генератором при режиме КЗ на противоположеном конце линии.

4. Компенсация реактивной мощности на концах участка тяговой сети при двустороннем питании нагрузки типа R_S

Рассмотрим задачу компенсации реактивной мощности на концах линии при сопротивлении нагрузки $Z_{n2} = R_S$ при ее питании с двух сторон. На шинах низкого напряжения тяговых подстанций подключены компенсирующие устройства с реактивными сопротивлениями Z_{n1} , Z_{n3} (рис. 2). Рассмотрим задачу в общем виде, не предопределяя заранее характер реактивного сопротивления компенсирующих устройств (индуктивное или емкостное).

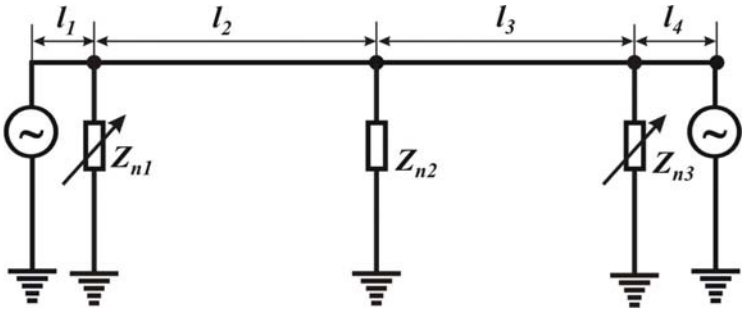

Рис. 2. Схемы расположения генераторных, компенсирующих и нагрузочных узлов в сети переменного напряжения

Система уравнений (3) в этом случае преобразуется к виду

$$U_0 = \widetilde{U}_0;\ Z_{0,1}I_1^{-} = -U_0 \mathrm{sh}\gamma_1 l_1 + Z_{0,1}I_0 \mathrm{ch}\gamma_1 l_1;$$

$$Z_{0,1}I_0 = U_1 \mathrm{sh}\gamma_1 l_1 + Z_{0,1}I_1^{-} \mathrm{ch}\gamma_1 l_1;\ U_1 = Z_{n,1}(I_1^{-} - I_1^{+});$$

$$Z_{0,2}I_2^{-} = -U_1 \mathrm{sh}\gamma_2 l_2 + Z_{0,2}I_1^{+} \mathrm{ch}\gamma_2 l_2;$$

$$Z_{0,2}I_1^{+} = U_2 \mathrm{sh}\gamma_2 l_2 + Z_{0,2}I_2^{-} \mathrm{ch}\gamma_2 l_2; \qquad (19)$$

$$U_2 = Z_{n,2}(I_2^- - I_2^+);\ Z_{0,3}I_3^- = -U_2 \mathrm{sh}\gamma_3 l_3 + Z_{0,3}I_2^+ \mathrm{ch}\gamma_3 l_3;$$

$$Z_{0,3}I_2^+ = U_3 \mathrm{sh}\gamma_3 l_3 + Z_{0,3}I_3^- \mathrm{ch}\gamma_3 l_3;\ U_3 = Z_{n,3}(I_3^- - I_3^+);$$

$$Z_{0,4}I_4^- = -U_3 \mathrm{sh}\gamma_4 l_4 + Z_{0,4}I_3^+ \mathrm{ch}\gamma_4 l_4;$$

$$Z_{0,4}I_3^+ = U_4 \mathrm{sh}\gamma_4 l_4 + Z_{0,4}I_4 \mathrm{ch}\gamma_4 l_4;\ U_4 = \widetilde{U}_4.$$

Если компенсирующие устройства (элементы Z_{n1}, Z_{n3} в схеме замещения) расположены вблизи концов линии, то $l_1 \to 0$ и $l_4 \to 0$, тогда из уравнений (1), (2) легко получить, что $I_1^- = I_0$, $U_1 = U_0$ и $I_3^+ = I_4$, $U_3 = U_4$ и система (19) принимает более простой вид

$$U_0 = \widetilde{U}_0;\ U_0 = Z_{n,1}(I_0 - I_1^+);$$

$$Z_{0,2}I_2^- = -U_0 \mathrm{sh}\gamma_2 l_2 + Z_{0,2}I_1^+ \mathrm{ch}\gamma_2 l_2;$$

$$Z_{0,2}I_1^+ = U_2 \mathrm{sh}\gamma_2 l_2 + Z_{0,2}I_2^- \mathrm{ch}\gamma_2 l_2; \qquad (20)$$

$$U_2 = Z_{n,2}(I_2^- - I_2^+);\ Z_{0,3}I_3^- = -U_2 \mathrm{sh}\gamma_3 l_3 + Z_{0,3}I_2^+ \mathrm{ch}\gamma_3 l_3;$$

$$Z_{0,3}I_2^+ = U_4 \mathrm{sh}\gamma_3 l_3 + Z_{0,3}I_3^- \mathrm{ch}\gamma_3 l_3;\ U_4 = Z_{n,3}(I_3^- - I_4);$$

$$U_4 = \widetilde{U}_4.$$

Предположим, что линия однородная, т.е. $Z_{0,2} = Z_{0,3} = Z_0$ и $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma$. В этом случае решая систему уравнений (20) предложенным выше способом, можно получить явные аналитические значения для токов на входе I_0 и выходе линии I_4:

$$I_0 = \frac{U_0}{Z_0}\left[\frac{Z_0}{Z_{n,1}} + \frac{Z_0 \mathrm{ch}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{ch}\gamma l}{Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l}\right] - \frac{\mathrm{U}_4 Z_{n,2}/Z_0}{Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l} =$$

$$= \frac{U_0}{Z_{n,1}} + \frac{U_0 Z_0 \mathrm{ch}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(U_0 \mathrm{ch}\gamma l - U_4\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)};$$

$$I_4 = \frac{\mathrm{U}_0 Z_{n,2}/Z_0}{Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l} - \frac{U_4}{Z_0}\left[\frac{Z_0}{Z_{n,3}} + \frac{Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{ch}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{ch}\gamma l}{Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l}\right] =$$

$$= -\frac{U_4}{Z_{n,3}} - \frac{U_4 Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{ch}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(U_4 \mathrm{ch}\gamma l - U_0\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)}. \qquad (21)$$

Реактивная мощность на входе и выходе линии вычисляется по формулам: $Q_0 = \mathrm{Im}(U_0 I_0^*)$ и $Q_4 = \mathrm{Im}(U_4 I_4^*)$.

Предположим, что компенсирующие элементы $Z_{n,1}$ и $Z_{n,3}$ являются чисто реактивными, т.е. содержат только индуктивные или емкостные составляющие. Тогда $Z_{n,1} = jX_{n,1} = j/b_{n,1}$ и $Z_{n,3} = jX_{n,3} = j/b_{n,3}$, где через $X_{n,1}$, $X_{n,3}$ обозначены реактивные сопротивления, а через $b_{n,1}$, $b_{n,3}$ – реактивные проводимости. Так как амплитуды входных напряжений U_0 и U_4 являются вещественными, то, решая уравнения $Q_0 = 0$ и $Q_4 = 0$ или $\mathrm{Im}(I_0) = 0$ и $\mathrm{Im}(I_4) = 0$, получаем явные формулы для значений реактивных проводимостей, при которых реактивная мощность на концах линии равняется нулю. В данном случае тяговая сеть не потребляет и не генерирует в питающую сеть реактивную мощность, за которую необходимо платить. Значения реактивных проводимостей $b_{n,1}$ и $b_{n,3}$, при которых происходит полная компенсация реактивной мощности на границе раздела тяговой и питающих сетей, определяется как решение уравнений $\mathrm{Im}(I_0) = 0$, $\mathrm{Im}(I_4) = 0$, где токи I_0, I_4 задаются формулами (21):

$$\mathrm{Im}(I_0) = \mathrm{Im}\left[\frac{U_0}{Z_{n,1}} + \frac{U_0 Z_0 \mathrm{ch}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(U_0 \mathrm{ch}\gamma l - U_4\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)}\right] =$$

$$= \mathrm{Im}\left[\frac{U_0}{Z_{n,1}}\right] + \mathrm{Im}\left[\frac{U_0 Z_0 \mathrm{ch}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(U_0 \mathrm{ch}\gamma l - U_4\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)}\right] = 0;$$

$$b_{n,1} = \frac{1}{X_{n,1}} = \mathrm{Im}\left[\frac{Z_0 \mathrm{ch}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(\mathrm{ch}\gamma l - \mathrm{U}_4 / U_0\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)}\right]; \qquad (22)$$

$$\mathrm{Im}(I_4) = -\mathrm{Im}\left[\frac{U_4}{Z_{n,3}} + \frac{U_4 Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{ch}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(U_4 \mathrm{ch}\gamma l - U_0\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)}\right] =$$

$$= -\mathrm{Im}\left[\frac{U_4}{Z_{n,3}}\right] - \mathrm{Im}\left[\frac{U_4 Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{ch}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(U_4 \mathrm{ch}\gamma l - U_0\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)}\right] = 0;$$

$$b_{n,3} = \frac{1}{X_{n,3}} = \mathrm{Im}\left[\frac{Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{ch}\gamma l_3 + Z_{n,2}\left(\mathrm{ch}\gamma l - U_0 / U_4\right)}{Z_0\left(Z_0 \mathrm{sh}\gamma l_2 \mathrm{sh}\gamma l_3 + Z_{n,2}\mathrm{sh}\gamma l\right)}\right]. \qquad (23)$$

5. Результаты параметрического анализа изменения мощности компенсации тяговой сети

Проведем по формулам (22), (23) параметрический анализ управления реактивной мощностью на входе и выходе идеальной линии компенсирующими устройствами, заданными в виде комплексных сопротивлений. Пусть длина линии равна l = 40 км или в безразмерном виде по отношению к волновой длине λ = 6000 км: l = 0.00667. Примем, что волновое сопротивление линии Z_B = 400 Ом. Для этих условиях на рис. 3 приведены графики зависимости значения реактивной проводимости $b_{n,1}$ (кривая 1) и $b_{n,3}$ (кривая 2) от месторасположения активной нагрузки $x = l_2/l$ для различных значений сопротивления нагрузки R_S = 150 Ом (a); 200 Ом (b); 250 Ом (c); 300 Ом (d); 350 Ом (e); 400 Ом (f). На рисунках одно деление по вертикальной оси, равное 0.005 в безразмерном виде, соответствует $0.125 \cdot 10^{-4}$ Ом$^{-1}$ в размерных единицах.

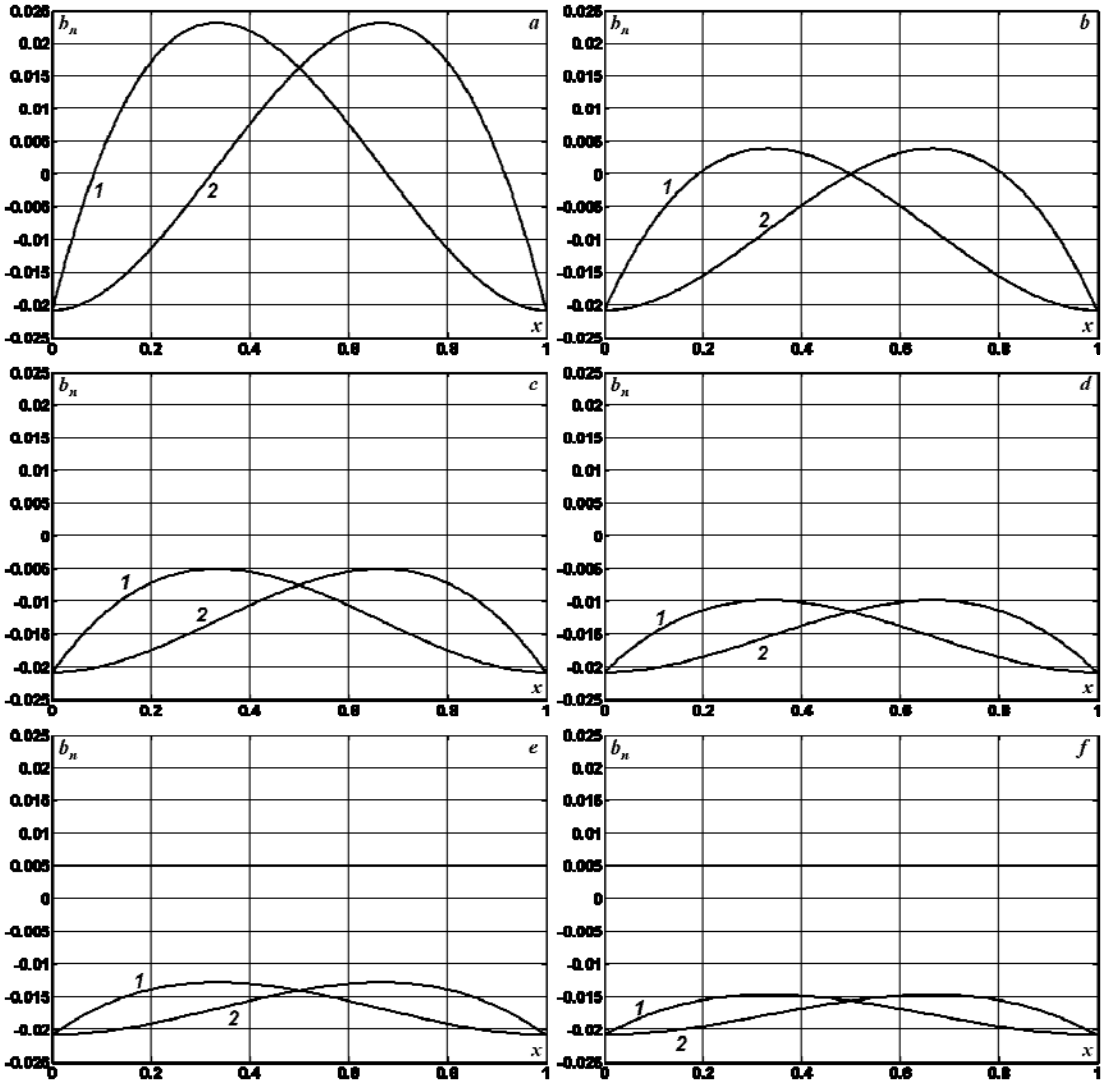

Рис. 3. Зависимость реактивной проводимости $b_{n,1}$ (кривая 1) и $b_{n,3}$ (кривая 2) от месторасположения активной нагрузки

Из рис. 3a видно, что для нагрузки R_S = 150 Ом, расположенной в начале линии, значения проводимостей $b_{n,1}$ и $b_{n,3}$ являются отрицательными, т.е. для компенсации на обоих концах линии требуется емкостной характер компенсирующих элементов. При

движении нагрузки вдоль линии значения $b_{n,1}$ и $b_{n,3}$ уменьшаются по модулю. При достижении движущейся нагрузкой точки $x = 0.085$ ($l_2 = 3.4$ км) значение проводимости $b_{n,1}$ становится равным нулю. В данный момент времени не требуется компенсация реактивной мощности, так как левый конец линии является согласованным с нагрузкой и из питающей сети потребляется только активная мощность. При этих условиях ток на шинах низкого напряжения тяговой подстанции совпадает по фазе с напряжением. Значение проводимости $b_{n,1}$ становится положительным при удалении нагрузки от точки $x = 0.085$ ($l_2 = 3.4$ км), при котором происходит компенсация реактивной мощности на шинах низкого напряжения тяговой подстанции, т.е. для обеспечения компенсации на левом конце линии требуется индуктивный характер цепи компенсирующего элемента. Индуктивный характер в цепи компенсирующего элемента сохраняется до достижения нагрузкой точки $x = 0.68$ ($l_2 = 27.2$ км), в которой вновь проводимость $b_{n,1}$ должна принять нулевое значение. При удалении от специфической точки в сторону правого конца тяговой сети компенсирующий элемент на левом конце линии вновь должен иметь емкостной характер.

Анализ показывает, что компенсация реактивной мощности на правом конце тяговой сети должна проводиться по аналогичному сценарию, что и на левом конце. При этом условии изменение характера реактивности компенсирующего устройства от емкостного к индуктивному и обратно - от индуктивного к емкостному происходит при подключении нагрузки R_S в конкретных точках линии. При подключении R_S к точкам линии с координатой $x = 0.32$ ($l_2 = 12.8$ км) и с координатой $x = 0.92$ ($l_2 = 36.8$ км) реактивная проводимость компенсирующего устройства на шинах тяговой подстанции на правом конце питающей линии равна нулю ($b_{n,3} = 0$).

При уменьшении потребления активной мощности нагрузкой, например, когда активное сопротивление нагрузки R_S увеличивается до 200 Ом (рис. 3,b), наблюдаем только количественные изменения требуемой для компенсации мощности тяговой сети, причем качественно характер мощности компенсации остается таким же, как и при значении нагрузки $R_S = 150$ Ом. При дальнейшем увеличении активного сопротивления нагрузки (рис. 3,c – 3,f), т.е. $R_S = 250$ Ом (c); 300 Ом (d); 350 Ом (e); 400 Ом (f), чтобы обеспечить условия компенсации реактивной мощности тяговой сети под нагрузкой, компенсирующие устройства должны генерировать только емкостную реактивную мощность при любом местоположении нагрузки на перегоне.

Даже такой простейший параметрический анализ процесса компенсации реактивной мощности в тяговой сети при постоянной активной нагрузке указывает на наличие ряда особенностей режима компенсации. При чисто активном характере и постоянном значении нагрузки тяговой сети анализ показывает, что компенсатор реактивной мощности на шинах низкого напряжения тяговой подстанции должен генерировать реактивную мощность как емкостного, так и индуктивного характера в зависимости от координаты подключения нагрузки к тяговой сети. При уменьшении потребления нагрузкой активной мощности возможны режимы только емкостной компенсации реактивной мощности тяговой сети. При двустороннем питании нагрузки имеем зеркальную симметрию изменения мощностей компенсирующих устройств на левом и правом концах тяговой сети в зависимости от положения нагрузки между источниками питания. При уменьшении значения потребляемой мощности нагрузкой диапазон требуемого регулирования компенсирующей мощности уменьшается.

6. Выводы

1. Предложен метод параметрического анализа компенсации реактивной мощности тяговой сети в зависимости от положения нагрузки на перегоне между двумя тяговыми подстанциями.
2. Получены решения задачи в явном виде при одностороннем и двустороннем питании комплексной нагрузки тяговой сети от тяговых подстанций с неограниченой мощностью.
3. Выполнен параметрический анализ влияния активной нагрузки на характеристики компенсирующих устройств, смонтированных на шинах низкого напряжения тяговых подстанций в зависимости от местоположения этой нагрузки между источниками питания и значения нагрузки. В зависимости от точки присоединения нагрузки к сети и ее значения компенсирующее устройство в общем случае должно генерировать как индуктивную, так и емкостную реактивную мощность для обеспечения значения коэффициента мощности тяговой сети $\cos\varphi = 1$.
4. При двустороннем питании нагрузки имеем зеркальную симметрию изменения мощностей компенсирующих устройств на левом и правом концах тяговой сети в зависимости от положения нагрузки между источниками питания. При уменьшении значения потребляемой мощности нагрузкой диапазон требуемого регулирования компенсирующей мощности уменьшается.

Литература

1. Овсейчук В., Трофимов Г., Кац А., Винер И., Укасов Р., Шимко А. Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности. Новости Электротехники, №4(52) 2008.
2. Справочник по электропотреблению в промышленности / Под ред. Г.П. Минина и Ю.В. Копытова. – М.: Энергия, 1978. – 496 с.
3. Паули В.К., Воротников Р.А. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии // Энергоэксперт. – 2007. – № 2.
4. Компенсация реактивной мощности / http://www.wildorg.ru/book/l004l0l/index.aspx
5. Компенсация реактивной мощности как средство сокращения затрат. *"Энергослужба предприятия" N 3 (5) - Сентябрь 2003* / http://energosp.ru/Go/ViewArticle/id=683
6. Актуальные вопросы и современные методы решения вопросов компенсации реактивной мощности для промышленных предприятий и сетей/Трусов Н.П.// *Санкт-Петербургская Электротехническая Компания.* http://spbec.ru/innovations/?23195
7. Нормативы уровня компенсации реактивной мощности в электрических сетях министерств и ведомств на период до 2000 г. Министерство энергетики и электрификации СССР. – 1987.
8. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения). Утвержден приказом Минпромэнерго России от 22.02.2007 № 49. Нормативный док РФ 2007

9. Общая характеристика компенсирующих устройств и видов компенсации реактивной мощности /http://leg.co.ua/info/podstancii/obschaya-harakteristika-kompensiruyuschih-ustroystv-i-vidov-kompensacii-reaktivnoy-moschnosti.html
10. Инжиниринг / http://www.alfar.ru/smart/4/432/.
11. Компенсация реактивной мощности – важный шаг к эффективному энергопотреблению/ http://b2bsearch.ru/2008/04/11/kompensacija-reaktivnojj-moshhnosti.html
12. Компенсация реактивной мощности - эффективная работа электрических сетей /http://www.bel.ru/news/energy/2007/06/26/24999.html
13. Красник В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. Москва: Энергоатомиздат, 1983.
14. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрофицированных железных дорог переменного тока. Москва:Транспорт,1976.
15. Мамошин Р. Р., Бей Ю. М., Пупынин В. Н., Шалимов М.Г Тяговые подстанции. Москва:Транспорт, 1980.
16. Подвижной состав и основы тяги поездов. Борцов П. И.Валетов А. И., Кельперис П. И., Менжинский Л. И., Миронов К. А., Наливкин М. Г., Семенов М. Я. М., «Транспорт», 1976, 352 с.
17. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. –М.:Транспорт, 1982.-528с.
18. РимскийВ.К., Берзан В.П., Пацюк В.И., Карчева Н.Ф., Андрос И.В. Волновые явления в неоднородных линиях. Параметрические цепи. Том.4. Кишинев: Тип. АНМ, 2008.-552с. ISBN 978-9975-62-075-8
19. Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И., Рыбакова Г.А., Капчеля Т.Г. Волновые явления в неоднородных структурах. Теория и методы расчета электрических цепей , электромагнитных полей и защитных оболочек АЭС. Том 5. Кишинев: Тип. АНМ, 2008.-664с. ISBN 978-9975-62-248-6
20. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М: Наука, 1978. – 592 с.

Informații despre autor.

V.Berzan. Dr. hab. în tehnică, director al Institutului de Energetică al AŞM. Domeniul intereselor ştiinţifice: diagnoza indistructivă a echipamentului electroenergetic, procese nestaţionare în circuite electrice neomogene, modelarea matematică, transportul energiei electrice la distanţe mari, surse regenerabile de energie. Autor a cca 200 lucrări ştiinţifice, inclusiv monografii 10, manuale 2.

V. Paţiuc. D.ş.f.-m. conferenţiar universitar la Universitatea de Stat a Moldovei, cercetător ştiinţific la Institutul de Energetică al AŞM. Domeniul intereselor ştiinţifice: metode numerice de calcul, fizica matematică, mecanica şi electrotehnica teoretică. Autor a peste 100 lucrări ştiinţifice, inclusiv 10 monografii**.**

V. Rimschi. Dr. hab. în tehnică.Domeniul intereselor ştiinţifice: fizica matematică, metode numerice de calcul, mecanica şi electrotehnica teoretică. Autor a peste 200 lucrări ştiinţifice, inclusiv 15 monografii.

M.Tîrşu. Dr. în tehnică, director adjunct pe probleme de ştiinţă al IE AŞM. Domeniul intereselor ştiinţifice: diagnoza indistructivă a echipamentului electroenergetic, procese nestaţionare în circuite electrice neomogene, modelarea matematică, surse regenerabile de energie. Autor a 75 lucrări ştiinţifice, inclusiv monografii 5.

В блокнот инженера

Уточненные алгоритмы расчета потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ в реальном времени

Мирошник А. А.
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенка (ХНТУСХ)

Аннотация. Предложен подход по уточнению величины потерь электрической энергии в воздушных линиях за счет учета влияния температуры окружающей среды и величины протекающего тока на сопротивление провода. Разработаны многофункциональные микропроцессорные устройства по расчету потерь электроэнергии.
Ключевые слова: потери электрической энергии, температура окружающей среды, многофункциональное микропроцессорное устройство.

Pentru agenda inginerului

ALGORITMELE PERFECȚIONATE DE CALCUL AL PIERDERILOR ENERGIEI ELECTRICE ÎN REȚELELE 0,38 KV ÎN TIMP REAL

Miroşnic A.

Rezumat. Este propusă o abordare pentru precizare a valorii pierderilor energiei electrice în liniile aeriene din contul luării în considrație a influenței temperaturii mediului înconjurător şi valorii curentului ce circulă pe rezistența firului. Sunt elaborate dispozitivele multifuncționale microprocesoare pentru calculul pierderilor energiei electrice.
Cuvinte cheie: pierderile energiei electrice, temperatura mediului înconjurător, dispozitivul multifuncțional, microprocesor.

For engineers note

REFINED ALGORITHMS OF ELECTRICAL ENERGY LOSSES CALCULATION IN 0,38 KV NETWORKS IN REAL TIME

Kharkov National Technical University of Agriculture Petr Vasylenko (KNTUA)
A. Miroshnyk

Abstract: an approach for closer definition of electrical energy losses size in air lines due to the accounting of environment temperature influence and flowing current size on the wire resistance is offered. Multifunctional microprocessor devices for energy losses calculation are elaborated.
Keywords: electrical energy losses, environment temperature, multifunctional microprocessor devices.

Одним из главных направлений повышения технико-экономической эффективности функционирования субъектов энергорынка Украины является комплексный подход к передаче, распределению и потреблению электроэнергии. Особенно это актуально для распределительных сетей (РС) 10-0,38 кВ. Повышение эффективности эксплуатации РС на сегодня стало возможным за счет применения современных вычислительных и программных средств, позволяющих перейти от прогнозных моделей к моделям оперативного наблюдения. Но существующие аналоги программных систем расчета и анализа режимов распределительных сетей характеризуются рядом существенных недостатков, которые осложняют их применение в РС 10-0,38 кВ, особенно из-за неопределенности исходной информации. Снизить уровень неопределенности возможно за счет оперативного съема информации в характерных точках РС, включая метеопараметры. Эта информация позволит уменьшить погрешность расчетов при определении потерь электрической энергии. В зависимости от полноты информации о нагрузках электрической сети для определения нагрузочных потерь электроэнергии рекомендуется использовать методы [1]:

- поэлементных расчетов;
- характерных режимов;

- характерных суток;
- средних нагрузок;
- числа часов максимальных потерь электроэнергии;
- вероятностно-статистический.

Выбор метода расчета потерь электрической энергии зависит от доступности исходной информации и требуемой точности. Наиболее точным из них является метод поэлементных расчетов, так как он позволяет учитывать потери в каждом элементе электрической сети, но и он имеет существенные недостатки:

- отсутствие методического и программного обеспечения оперативного расчета потерь электрической энергии в элементах сети, который бы учитывал влияние на параметры режима параметров окружающей среды;
- отсутствие технических средств автоматизированного контроля параметров окружающей среды.

При расчете потерь электрической энергии в воздушных линиях (ВЛ) необходимо учитывать влияние метеорологических параметров, особенно колебания температуры воздуха [2]. На сегодняшний день в расчетных моделях используются справочные параметры ЛЭП, которые приведены для температуры окружающего воздуха 20^0С, но температура окружающей среды в течение года (и даже суток) может существенно отличаться от этого значения. В международном стандарте «IEC 60287-2-2:1995 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2: Thermal resistance - Section 2: A method for calculating reduction factors for groups of cables in free air, protected from solar radiation» говорится лишь о нагрузочной способности линии, а вопросы мониторинга температуры провода в реальном времени даже не затрагиваются. Главной причиной этого является отсутствие на сегодняшний день методологического и технического обеспечения, но работы в этом направлении уже начаты. В [2] приведен алгоритм расчета сопротивления проводов ВЛ с учетом температуры воздуха, рабочего тока, а также скорости ветра. Поэтому сегодня в связи с широким внедрением информационных технологий появилась необходимость в совершенствовании методов определения потерь электроэнергии с учетом температуры окружающей среды. График зависимости сопротивления провода от температуры $R = f(t^0)$ приведен на рис. 1. Из графика видно, что с повышением температуры провода на 1^oС его сопротивление повышается на 0,4 %.

Известны законы, определяющие тепловое равновесие между проводником, по которому протекает ток, и параметрами окружающей среды. Тепло от нагретого проводника может передаваться в окружающую среду тремя способами: а) лучеиспускание; б) теплопроводность; в) конвекция. Уравнение теплового баланса для установившегося теплового режима имеет следующий вид:

$$I^2 R_{20}\left(1+\alpha\left(t^o_{ïð}-20\right)\right)+W_c=\pi d_{ïð}\left(\beta_{ê}+\beta_{ë}\right)\left(t^o_{ïð}-t^o_{îñ}\right), \qquad (1)$$

где I – ток в линии, А;

R_{20} – сопротивление провода при 20 ^{o}С, Ом/м;

α – температурный коэффициент сопротивления провода, 1/^{o}С;

$t^0_{пр}$ – температура провода, ^{o}С;

$t^0_{îñ}$ – температура окружающей среды, ^{o}С;

$\beta_к$, $\beta_л$ – коэффициент теплоотдачи провода при конвективном и лучистом теплообмене, Вт/(м·^{o}С);

W_c – теплота солнечного излучения, поглощаемая 1 м провода в единицу времени, Вт;

$d_{пр}$ – диаметр провода, м.

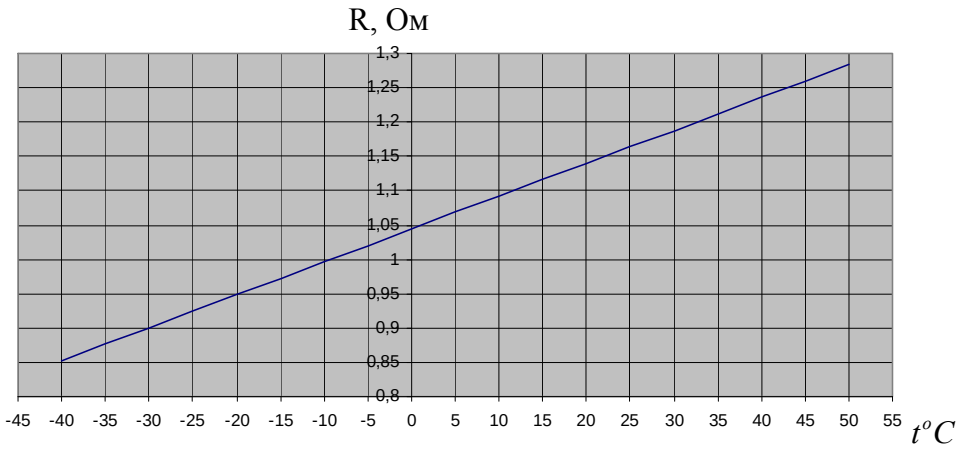

Рис. 1. График зависимости сопротивления провода АС-50 длиной 1 км от температуры окружающей среды, t^oC

Для определения теплоты солнечного излучения, поглощаемого проводом, существует несколько моделей [3, 4]. Теплота солнечного излучения определяется уравнением:

$$W_c = \varepsilon_n k_H d_{пр} W_p \sin\psi_c, \qquad (2)$$

где ε_n = 0,6 – коэффициент поглощения провода;

k_H – коэффициент, учитывающий влияние высоты над уровнем моря;

W_p – интенсивность суммарной радиации (прямой и отраженной), Вт/м^2;

ψ_c – активный угол наклона солнечных лучей.

При лучеиспускании количество передаваемого тепла пропорционально разности абсолютных температур в четвертой степени. Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяется по формуле Стефана-Больцмана:

$$\beta_{ë} = \frac{5,6\varepsilon}{t^0_{ïð} - t^0_{î\ ñ}}\left[\left(\frac{273 + t^o_{ïð}}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 + t^o_{î\ ñ}}{100}\right)^4\right], \qquad (3)$$

где ε – постоянная лучеиспускания (степень черноты провода);

$t^o_{ïð}$ – температура провода, ^{o}C;

$t^o_{î\ ñ}$ – температура окружающей среды, ^{o}C.

Постоянная лучеиспускания зависит от материала и состояния поверхности провода. По разным литературным данным [2, 5] она может изменяться от 0,11 для чистого алюминия до 0,8 для окисленного и загрязненного, при этом измерить этот параметр в условиях эксплуатации затруднительно.

Поскольку провода не нагреваются выше температуры 70°C, то роль лучеиспускания незначительна.

Теплопроводность тоже играет малую роль при охлаждении проводников, расположенных в воздухе, так как окружающий их воздух имеет низкую теплопроводность. Поэтому главную роль при охлаждении таких проводников играет конвекция – перенос тепла потоком воздуха.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в общем виде определяется исходя из критериальных уравнений конвективного теплообмена:

$$\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}), \tag{4}$$

где Nu – критерий Нуссельта, определяющий коэффициент теплоотдачи;

Re – критерий Рейнольдса, определяющий влияние скорости охлаждающей среды на конвективный теплообмен;

Pr – критерий Прандтля, характеризующий подобие физических свойств охлаждающей среды в процессах конвективного теплообмена. Для воздуха этот критерий можно считать постоянным в диапазоне температур от –50 до +40 ^{0}С.

При различных значениях критерия Рейнольдса функция (4) может иметь различный вид. При некотором критическом значении (обычно Re=5) считается, что конвекция перестает быть вынужденной и становится свободной, при этом вместо критерия Рейнольдса используется критерий Грасгофа (Gr), характеризующий протекание свободной конвекции. Однако в реальных условиях всегда есть некоторое движение воздуха. Согласно литературным источникам при антициклоническом характере погоды минимальную скорость ветра можно принять равной 0,6 м/с, при циклоническом характере погоды – 2 м/с [4]. По опубликованным материалам сессии СИГРЕ также рекомендуется принимать минимальную скорость ветра 0,6 м/с.

Большинство авторов [2 – 5] сходятся в том, что при малых скоростях ветра (Re<1000 или ν <5 м/с) витая структура провода практически не влияет на теплоотдачу и его можно рассматривать как гладкий цилиндр в воздушном потоке, при этом коэффициент теплоотдачи конвекцией приближенно рассчитывается по выражению:

$$\beta_k = 3,5 k_\psi \sqrt{\frac{\nu}{d_{пр}}}, \tag{5}$$

где k_ψ – коэффициент зависимости теплоотдачи при конвективном теплообмене от угла атаки ветра;

ν – скорость ветра, м/с;

$d_{пр}$ – диаметр провода, м.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией β_k является наиболее неопределенным параметром уравнения (1), тем не менее, он существенно влияет на значение допустимой нагрузки. Но главным влияющим фактором в теплоотдаче конвекцией в сетях 10(6) – 0,38 кВ является температура провода, так как среднегодовая скорость ветра по Украине не превышает 4 м/с, то есть скорость ветра практически не влияет на охлаждение провода.

Так, в [2] показано, что для проводов малых сечений влияние скорости ветра и влажности не столь существенны, как влияние температуры окружающей среды на величину сопротивления провода, учет которого дает возможность точнее рассчитывать технические потери в РС. Так, учет температуры провода позволяет уточнить среднегодовые потери до 8%, а влияние скорости ветра – всего до 0,4 %, что лежит в пределах погрешности приборов учета.

Так как теплоотдача лучеиспусканием и теплопроводностью незначительны, а скоростью ветра в связи со сложной топологией сети и невозможностью определить его в реальном времени можно пренебречь, то уравнение теплового баланса в общем виде можно представить, как:

$$I^2 R = cF(t_2^0 - t_1^0), \qquad (6)$$

где I – ток, протекающий по проводу, А;

R – сопротивление провода, Ом;

F – площадь поверхности проводника, м^2;

c – коэффициент теплоотдачи, равный количеству тепла, отводимого с 1 м^2 поверхности провода в 1 с при разности температур провода и окружающей среды в 1^0, Вт/м^2·^{0}С;

t_1^0 – температура окружающей среды, ^{0}С;

t_2^0 – температура провода, ^{0}С.

Левая часть уравнения представляет собой количество выделившегося тепла в каждую секунду времени, а правая – количество тепла, переходящего в окружающую среду.

Так как передача тепла осуществляется преимущественно через конвекцию [5], то сопротивление провода будет изменяться в зависимости от температуры окружающей среды:

$$R = R_{20}\left(1 + \alpha\left(t_{пр}^0 - 20\right)\right), \qquad (7)$$

где R_{20} – удельное сопротивление провода при температуре 20 ^{0}С;

α – температурный коэффициент удельного сопротивления;

$t_{ïð}^o$ – температура провода.

Из (6) и (7) видно, что температура провода зависит не только от температуры окружающей среды, но и от величины тока, протекающего по проводнику:

$$t_{пр}^0 = t_{о\,с}^0 + t^0(I), \qquad (8)$$

где $t_{о\,с}^0$ – температура окружающей среды;

$t^0(I)$ – температура нагрева провода от прохождения по нему тока.

В [5] отмечается важность наличия инструмента непрерывного контроля температуры провода для более полного использования нагрузочной способности воздушных линий и подчеркивается, что в настоящий момент не представляется возможным оборудовать все линии датчиками температуры. Нами предлагается [7] рассчитывать температуру провода на основании уравнения теплового баланса для установившегося теплового режима с учетом влияния на нагрев провода как температуры окружающей среды, так и величины протекающего по проводу тока.

С учетом вышесказанного выражение для определения потерь электрической энергии с учетом температуры окружающей среды будет иметь вид:

$$\Delta W = I^2 R_{20j}\left(1+\alpha\left(t_{o.c}^0 + \frac{1+\alpha\left(t_{o.c}^0-20\right)}{\frac{2c\sqrt{\pi F}}{I^2 R_{20}}-\alpha}-20\right)\right)\Delta t\,. \qquad (9)$$

График зависимости потерь мощности от температуры окружающей среды и величины протекающего тока для ВЛ с проводом АС-50 $P(I, t_{o\,c}^0)$ представлен на рис. 2.

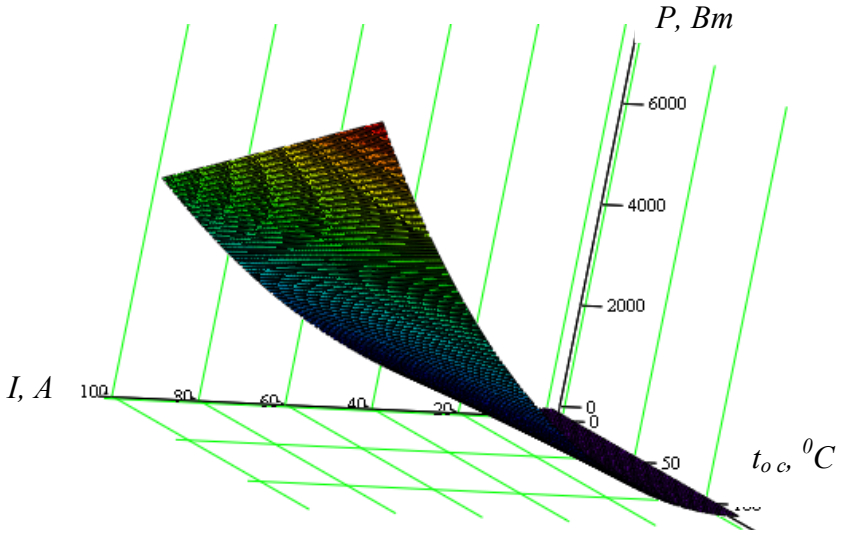

Рис. 2. График изменения потерь мощности в трехфазной ВЛ, выполненной проводом АС-50, с учетом влияния температуры окружающей среды и величины тока на сопротивление провода $P(t_{o\,c}^0, I)$

Нормальные режимы РС рассчитываются для определения отчетных показателей, планирования режимов и оценки их эффективности, а также их оперативной корректировки. В первом случае периодичность расчетов составляет сутки и больше, во втором – расчеты проводятся каждый час, и с повышением уровня автоматизации управления есть стойкая тенденция к уменьшению периода расчетов до 10-15 минут и меньше [8]. В качестве исходных данных при этом используются телеизмерения или архивы АСКУЭ.

Наиболее сложной и неоднозначной проблемой формирования исходной информации для проведения поэлементного расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях является определение независимых параметров текущего режима сети. Это связано с проблемой оснащения устройствами телеметрии всех потребителей электрической энергии. На сегодня это возможно в результате расширенного внедрения АСКУЭ в сети 10-0,38 кВ.

Сформированная таким образом расчетная модель электрической РС является в достаточной степени адекватной и адаптированной к выполнению расчета установившегося режима сети с возможностью дальнейшего определения и структурирования потерь мощности и электроэнергии по элементам и по всей сети в целом.

Для более объективного нормирования технологического расхода электроэнергии в распределительных сетях, для выявления очагов потерь, а также для более точного отражения технологического расхода электроэнергии в тарифах на электроэнергию целесообразно разработать не только модели и методы, но и

технические средства по мониторингу потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях.

Реализация данного подхода в реальном времени возможна только в случае автоматизации мониторинга потерь мощности и электроэнергии в сетях 0,38 кВ. Эффективность мониторинга может быть повышена за счет повышения достоверности информации, которая снимается в характерных точках сети, и с учетом влияния температуры окружающей среды и величины протекающего тока на сопротивление элементов сети.

Процесс мониторинга установившихся режимов сети с последующим расчетом потерь электрической энергии в реальном времени представляет собой сложную задачу. Для ее реализации необходимо автоматизировать весь процесс сбора, обработки, передачи информации о параметрах режима и температуре окружающей среды, а также сам процесс расчета потерь. Эти требования могут быть удовлетворены путем совершенствования АСКУЭ за счет расширения их функциональных возможностей на нижнем уровне [9]. В [2] предлагается учитывать температуру воздуха при расчете годовых потерь и отмечается, что «перспективным направлением повышения точности расчета удельных активных сопротивлений может стать автоматическая регистрация в условиях эксплуатации температуры провода с помощью специализированных средств контроля температуры проводов воздушных линий».

На сегодняшний день существует множество автоматизированных систем, таких как SMART, DATAGIR C2000 и т.д., но все они не учитывают влияние температуры окружающей среды на сопротивление провода ВЛ. В связи с этим нами разработаны новые подходы по совершенствованию нижнего уровня АСКУЭ, а именно использования на нижнем уровне многофункциональных микропроцессорных устройств (ММУ) по контролю параметров режима и температуры окружающей среды с последующей передачей информации по GSM/GPRS или PL-каналу на верхний уровень АСКУЭ и реализацией дополнительных функций по мониторингу потерь электроэнергии с учетом влияния температуры окружающей среды и величины протекающего тока на сопротивление элементов сети [10 – 12].

Все вышеизложенное нашло отражение в совместных научно-исследовательских работах кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента ХНТУСГ с АК «Харьковоблэнерго» [13] в связи с созданием единой базы данных технического оборудования и системы мониторинга распределительных сетей 6(10)-0,38 кВ с последующей интеграцией в биллинговые комплексы автоматизированного расчета с бытовыми и промышленными потребителями.

Выводы

Учет влияния температуры окружающей среды и величины протекающего тока на сопротивление элементов сети при расчете потерь электрической энергии позволит повысить точность расчета потерь, нормировать технологический расход электроэнергии на транспорт по сетям, выявлять очаги потерь, составлять балансы, а также более точно отражать технологический расход электроэнергии в тарифах на электроэнергию.

Литература

1. Воротницкий В. Э., Железко Ю. С., Казанцев В. Н. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Воротницкий В. Э., Туркина О. В. Оценка погрешностей расчета переменных потерь

электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий / Энергосистемы и электрические сети. – 2008. – №10.
3. Бургсдорф В. В., Никитина Л. Г. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по току их проводов // Электричество. – 1989. – №11. – С. 7 – 14.
4. Зарудский Г. К., Зиннер Л. Э., Сыромятников С. Ю. Расчет температуры проводов воздушных линий электропередачи СВН на основе метода критериального планирования эксперимента // Вестник МЭИ. – 1997. – №12. – С. 17 – 23.
5. Левченко И. И., Сацук Е. И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях // Электричество. – 2008. – №4. – С. 2 – 8.
6. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
7. Мірошник О. О. Методи та підходи до розрахунку втрат електричної енергії в розподільчих електричних мережах / Праці ТДАТА «Наукове фахове видання». – Мелітополь: ТДАТА, 2007. – Вип. 7, Т. 3.
8. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Поліщук А. Л. Інформаційне забезпечення розрахунку втрат електроенергії в розподільних мережах / Вісник ХНТУСГ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2007. – Вип. 57, Т. 1.
9. Черемісін М. М., Зубко В. М. Автоматизація обліку та управління електроспоживанням, – Харків: Факт, 2005.
10. Пат. 85724 Україна, МПК G 01 R 21/06 G 01 R 22/00. Лічильник електричної енергії / Черемісін М. М., Мірошник О. О., Трибель В. І.; заявник та патентовласник Черемісін М. М., Мірошник О. О., Трибель В. І. – № а 2007 00698, заявл. 23.01.2007, опубл. 25.02.2009 Бюл. №4.
11. Черемисин Н. М., Мирошник А. А., Трибель В. И. Микропроцессорные средства учета потерь электроэнергии в зависимости от параметров окружающей среды / Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – №2
12. Черемисин Н. М., Мирошник А. А. Автоматизация контроля и управление электропотреблением в электрических сетях – эффективность и пути развития в условиях рыночных отношений / Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2007. – №1.
13. Дьяконенко В. А. Проблемные вопросы при расчетах норматива ТРЭ по районам АК «Харьковоблэнерго» / Электрические сети и системы. – 2009. – №2.

Мирошник Александр Александрович, окончил в 2004 г. факультет энергетики и компьютерных технологий Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства им. П. Василенка (ныне Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенка). В 2009 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Повышение эффективности мониторинга потерь электроэнергии в распределительных сетях» в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт». Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий (АиКТ) института энергетики и компьютерных технологий (ЭКТ) Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П. Василенка (ХНТУСХ). E-mail: Miroshnyk@rambler.ru

PRINCIPIILE DE DETERMINARE A INTENSITĂȚII ENERGETICE ALE PRODUSELOR AGRICOLE

F. Erhan, V. Rotari (Universitatea Agrară de Stat din Moldova, catedra Electrificarea şi automatizarea mediului rural)
Anastasia Mocanu (Universitatea de Stat din Cahul)
terhan@mail.ru

Rezumat: În procesal de producere şi prelucrare primară al oricărui produs agricol se cheltuie un volum de resurse energetice. Sub noțiunea de intensitate energetică al produselor agricole se subînțelege cantitatea de energie minimal necesară pentru producerea unei unități de produs agricol**.**
Cuvinte–cheie: intensitate energetică, produs agricol**,** volum de energie.

PRINCIPLES OF THE DETERMINATION ENERGY INTENSITY OF THE AGRICULTURAL PRODUCTS

F. Erhan, V. Rotari, Agrarian University of Moldova
Anastasia Mocanu, State University of Cahul
terhan@mail.ru

Abstract: In the primary production and conversion process of agricultural product a set of energy resources is consumed. By the notion of energy intensity of agricultural products minimal quantity of energy required for the production of agricultural product unit is considered.
Key words: energy intensity, agricultural product, minimum necessary energy, volume of energy.

ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Ерхан Ф.М., Ротарь В. (Государственный аграрный университет Молдовы, кафедра Электрификации и автоматизации сельского хозяйства)
Мокану А. Г. (Кагульский Государственный университет)
terhan@mail.ru

Аннотация. В процессе производства и первичной переработки сельскохозяйственной продукции всегда используются энергетические ресурсы. Под энергоемкостью сельскохозяйственной продукции подразумевается минимально необходимый объем энергии для производства и первичной переработки единицы продукции, которая может быть представлена на рынке.
Ключевые слова: энергоемкость сельскохозяйственной продукции, минимально необходимая энергия, первичная переработка продукции.

Întroducere

În procesul de producere şi prelucrare primară al produselor agricole se cheltuie un volum de resurse energetice de diferite forme (benzină, motorină, matriale lubrifiante, energie electrică, etc). În dependență de local unde se produce produsul şi de tehnologia de prodecere a produsului agricol respectiv se cheltuie diferite cantități de resurse energetice, care au o pondere directă în formarea costului produsului respectiv. Ca rezultat al acestui fenomen unul şi acelaşi produs agricol produs în diferite țări ce dispun de diverse tehnologii de producere dispun de diverse intensități energetice şi ca urmare sinecostul şi prețul de realizare este divers. Din cele descrise reiese, că intensitatea energetică a produselor agricole are o influența directă asupra pieții de desfacere şi a concurenței produselor agricole identice.

Desfăşurarea problemei

Pentru a determina intensitatea energetică la producerea produselor agricole e necesar ca consumul de resurse energetice (indiferent de tipul lui) şi locul de producere al acestui produs să fie comparat şi determinat în raport de o unitate de produs agricol. Acest fenomen poate fi

efectuat cel mai optim atunci cînd toate resursele energetice cheltuite se transformă în combustibil convențional şi intensitatea energetică se determină în raport de combustibilul convencional.

a. Trecerea echivalentă a diferitor tipuri de combustibil în combustibil convențional.

Pentru a efectua determinarea intensității energetice la producerea şi prelucrarea primară a producelor agricole în conformitate cu [1-5] apare nedcesitatea de a efctua trecerea echivalentă a diferitor tipuri de combustibil în combustibil convențional, care dă posibilitatea de a opera cu unele şi aceleaşi noțiuni şi cantități de energie indiferent de tipul combustibilului utilizat.

În conformitate cu [1-5] pentru a efctua trecerea echivalentă a diferitor tipuri de combustibil în combustibil convențional se utilizează următorii coeficienți , care sunt prezentați în tabelul 1.

Tabelul 1

Determinarea coeficienților de trecere echivalentă de la diferite tipuri de combustibil la combustibil convencional

Nr.crt.	Denumirea combustibilului	Unit. de măsură, l/ht.	Cantitatea	
			Unități, kg	Tip
1	Benzină	1, litru	1,500	comb.conv.
2	Motorină	1, litru	1.450	comb.conv.
3	Materiasle lubrifiante	1, litru	1,438	comb.conv.
4	Gaze naturale lichifiate şi nelichifiate	1, litru	1.242	comb.conv.
5	Materiale fosile	1, m^3	670-940	comb.conv.
6	Energie electrică	1, kWh	0.328 – 0.352	comb.conv.

Procedurile tehnologice pentru sădirea şi cultivarea viței de vie pentru primul an tehnologic sunt prezentate în tabelul 2.

Tabelul 2

Tipurile de tehnologii utilizate pentru cultivarea şi creşterea viței de vie

Nr.crt.	Denumirea tehnologiei	Unit. de măsură, l/ht.	Cantitatea	
			Unități, kg	Total ,kg.c.c.
1	Aratul solului pentru sădire	42, litri	1,450	60.9
2	Boronire	18	1.450	26,1
3	Sădire	24	1,450	34,8
4	Cultivare	4x16	1.450	92,8
5	Stropire	3x16	1.450	69,6
6	Lubrifiante	8 litri	1,438	11,5
7	Resurse energetice (benzină)	32 litri	1,5	48,0
	Total resurse energetice	-	-	343,7

Procedurile tehnologice pentru îngrijirea viței de vie în anul al doilea tehnologic sunt prezentate în tabelul 3.

Tabelul 3

Tipurile de tehnologii utilizate pentru cultivarea şi creşterea viței de vie

Nr.crt.	Denumirea tehnologiei	Unit. de măsură, l/ht.	Cantitatea	
			Unități, kg	Total ,kg.c.c.
1	Cultivare	4x16	1.450	92,8
2	Stropire	3x16	1.450	69,6

Continuare tab 3.

Procedurile tehnologice pentru îngrijirea viţei de vie în anul al treilea tehnologic sunt prezentate în tabelul 4.

Tabelul 4

Tipurile de tehnologii utilizate pentru cultivarea şi creşterea viţei de vie

Nr.crt.	Denumirea tehnologiei	Unit. de măsură, l/ht.	Cantitatea	
			Unităţi, kg	Total ,kg.c.c.
1	Cultivare	4x16	1.450	92,8
2	Stropire	3x16	1.450	69,6
3	Lubrifiante	8 litri	1,438	11,5
4	Resurse energetice (benzină)	32 litri	1,5	48,0
5	Culegerea primei roade	3x16	1,450	69,6
6	Total resurse energetice	-	-	291,5

Consumul sumar de resurse energetice pentru efectuarea tehnologiilor de creştere şi îngrijire a unui hectar de viţă de vie ţinând cont de toate cerinţele respective pentru primii trei ani sunt prezentate în tabelul 5.

Tabelul 5.

Consumul sumar de resurse energetice pentru efectuarea tehnologiilor de creştere şi îngrijire a unui hectar de viţă de vie

Nr. crt.	Anul de îngrijire	Volumul consumului de resurse energetice, kg. c. c.	
		Unităţi,	Total, kg.c.c.
1	Primul an de îngrijire a viţei de vie	kg.c.c.	343,7
2	Anul 2 (doi) de îngrijire a viţei de vie	kg.c.c.	221.9
3	Anul 3 (trei) de îngrijire a viţei de vie	kg.c.c.	291,5
4	Total consum de resurse energetice	kg.c.c.	857,1

Rezultatele obţinute sunt verificate cu cele statistice experimentale şi comparate cu materialele [2,6,8] teoretice, care practic comit o eroare nu mai mare de 5% , deci $\Delta<5\%$.

Concluzii

Din analiza materialelor statistice (din mai multe zone ale Republicii Moldova unde se cultivă viţa de vie) şi cele analitice (tehnice) se poate de constatat că au fost argumentate şi determinate cheltuielile de resurse energetice cu destinaţia de sădire şi prelucrare primară a culturilor agricole multianuale (prelucrare a viţei de vie) conform cerinţelor agro - tehnologice contemporane (actuale) pentru fiecare an tehnologic până la prima roadă şi au fost determinate chieltuielele de energie la prelucrarea primară a strugurilor şi obţinerea vinului brut.

Bibliografie

1.Determinarea intensităţii energetice la producerea şi prelucrarea primară a strugurilor şi a vinului şi elaborarea măsurilor de micşorare a ei. Adeverinţă de înregistrare a rezultatelor activităţii de cercetare ştiinţifică, nr.273,14.05.2010, Chişinău.

2. Regulament pentru furnizarea şi utilizarea energiei electrice. ANRE; Energia, 2005; nr. 6; p. 10-33.
3. Metodologia determinării, aprobării şi aplicării tarifelor la energia electrică livrată de întreprinderile de distribuţie „RED NORD" şi „RED NORD-VEST"S.A; ANRE; Energia, 2004; nr. 2 p. 8-25.
4. Instrucţia pentru determinarea consumului specific (perderilor tehnice) a energiei electrice în reţelele electrice. ANRE; Energia, 2005; nr. 5 p. 8-18.
5. Metodologia determinării, aprobării şi aplicării tarifelor pentru serviciile de transport şi distribuţie a energiei electrice. ANRE; Energia, 2004; nr. 1; p. 13 -21.

Erhan Fiodor Mihail, doctor habilitat în tehnică, profesor universitar, şef catedrei „ Electrificarea şi automatizarea mediului rural", Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Interesele ştiinţifice se află în planul fiabilităţii sistemelor de distribuţie şi alimentare cu energie a consumatorilor şi a auditului energetic al întreprinderilor agricole şi de prelucrare a produselor agricole şi analizei şi determinării intensităţii energetice la producerea şi prelucrarea primară a produselor agricole. Autor şi coautor a mai mult de 160 lucrări ştiinţifice şi metodico-didactice dintre care se pot evidenţia 2 manuale, 3 brevete de invenţie, 2 monografii ştiinţifice şi o serie de articole ştiinţifice publicate în reviste recenzate, raporturi la diverse Conferenţe Ştiinţifice Internaţionale.

Ерхан Федор Михайлович, доктор хабилитат технических наук, профессор, заведующий кафедрой „Электрификация и автоматизация сельского хозяйства" Государственного аграрного университета Молдовы. Научные интересы находятся в области надежности электроснабжения потребителей и энергоаудита сельскохозяйственных потребителей и перерабатывающей промышленности и определения энергоемкости при производстве и первичной переработке сельскохозяйственных продуктов. Автор и соавтор более 160 научных и методических работ, среди которых 2 учебника, 3 авторских свидетельства, 2 научные монографии, научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, и доклады на различных международных научных конференциях.

Rotari Viorel Vasile, doctorand, lector superior universitar al catedrei „Electrificarea şi automatizarea mediului rural", Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Interesele ştiinţifice se află în planul auditului energetic al întreprinderilor agricole şi de prelucrare a produselor agricole şi analizei şi determinării intensităţii energetice la producerea şi prelucrarea produselor agricole. Autor şi coautor a 12 lucrări ştiinţifice şi metodico-didactice şi o serie de articole ştiinţifice publicate în reviste recenzate, raporturi la Conferinţe Ştiinţifice Internaţionale.

Ротарь Виорел Василевич, аспирант, старший преподаватель кафедры „Электрификация и автоматизация сельского хозяйства" Государственного аграрного университета Молдовы. Научные интересы находятся в плоскости энергоаудита сельскохозяйственных потребителей и перерабатывающей промышленности и определения энергоемкости при производстве и первичной переработке сельскохозяйственных продуктов. Автор и соавтор 12 научных и методических работ, научных статьей, опубликованных в рецензируемых журналах, и докладов на различных международных научных конференциях.

УДК 621.56/59

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОНАСОСНАЯ УСТАНОВКА НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ИСПАРИТЕЛЯМИ, РАБОТАЮЩИМИ НА РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УРОВНЯХ И ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ

Шит М.Л. (Институт энергетики АН Молдовы),
Балануцэ А.П.(Технический университет Молдовы),
Шит Б.М. (Институт энергетики АН Молдовы)

Аннотация. Разработана структурная схема промышленного теплового насоса на диоксиде углерода, функционирующем в сверхкритическом термодинамическом цикле, с двумя параллельно включенными испарителями, работающими на разных температурных уровнях (преимущественно для винодельческих заводов). Тепловой насос предназначен для одновременной выработки тепла и холода и работает при переменной тепловой нагрузке. Показано, как включение эжекторов в схему теплового насоса обеспечивает повышение его тепловой эффективности. Способ построения гидравлической схемы и системы управления обеспечивает полную управляемость теплового насоса.
Ключевые слова: тепловой насос, диоксид углерода, испаритель, регулируемый эжектор.

INSTALAȚIE CU POMPA DE CĂLDURĂ PE DIOXID DE CARBON CU EVAPORATOARE CE FUNCȚIONEAZĂ ÎN REGIMURILE DE TEMPERATURĂ DIFERITE ŞI LA SARCINA TERMICĂ VARIABILĂ

Şit M.L. (Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei)**,**
BALANUȚĂ A. (Univeristatea Tehnică a Moldovei)**,**
Şit B.M. (Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei)

Rezumat. Este elaborată schema structurală a pompei industriale de căldură pe dioxid de carbon, ce lucrează în ciclul transcritic cu două evaporatoare conectate paralel, ce funcționează la diferite nivele de temperatură (în prealabil pentru uzinele de vinificare). Pompa de căldură este destinată pentru elaborarea simultană a căldurii şi a frigului şi funcționează la sarcina termică variabilă. Se demonstrează cum conectarea ejectoarelor în schema pompei de căldură asigură ridicarea efecienţei lui termice. Modul de construire a schemei hidraulice şi sistemului de dirijare asigură controlul deplin al pompei de căldură.
Cuvinte cheie: pompa de căldură, dioxid de carbon, evaporator, ejector reglabil.

INDUSTRIAL CARBON DIOXIDE HEAT PUMP STATION WITH EVAPORATORS WORKING AT VARIOUS TEMPERATURE LEVELS AND AT VARIABLE LOAD

Sit M.L. (Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova),
Balanuta A. (Technical University of Republic of Moldova),
Sit B.M. (Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova)

Abstract. The block diagram of an industrial carbon dioxide heat pump working in a supercritical cycle, with two evaporators included in parallel working at different temperature levels (mainly for wine-making factories) is developed. Heat pump is intended for simultaneous production of heat and cold and works at variable thermal loading. It is shown, how an ejector inclusion in the heat pump scheme provides growth of its thermal efficiency. The way of construction of the hydraulic scheme and a control system provides full controllability of the thermal pump.
Key words: heat pump, carbon dioxide, control system, evaporator, controllable ejector.

1. Тепловые процессы в технологии виноделия и использование в них теплонасосных установок

Использование теплонасосной установки (ТНУ) рассмотрим при проведении таких операций, как брожение, обработка вина теплом и холодом, криомацерация и мацерация мезги. Одновременно с криомацерацией при температуре 2…5°С можно проводить термомацерацию при температуре 40…75°С и, при необходимости, подогревать бродящее сусло при низких температурах окружающего воздуха. Одновременно с брожением сусла при температуре $12-16^oC$ при брожении по «белому» способу можно проводить обработку кагора при температуре $60-65^oC$. Технологические процессы, в которых можно использовать ТНУ на винодельческих заводах, по мере развития сезона переработки винограда, следующие: криомацерация и термомацерация мезги, отстой сусла, брожение, экстракция сахара из выжимок, обработка вина холодом, хранение вина на холоде. Параллельно с криомацерацией на заводах по производству вина может производиться термомацерация при температуре 60…70 ^oC в такого же типа резервуарах для изготовления сухого вина в течение 0,5 часа и для кагора в течение 12 часов. После нагрева мезги ее необходимо охладить в потоке до 28^oC при температуре хладагента $4-10^oC$. Обычно для этого используется холодная вода. Теплоту воды, используемой для охлаждения мезги, можно использовать в тепловом насосе для получения воды для санитарных и технических нужд вместо использования для этого котельной. После завершения криомацерации тепловой насос может быть использован для охлаждения сусла в емкости с рубашкой или в потоке до 10…14 ^oC. Тепло, выделяющееся при этом процессе, может быть использовано для мойки и дезинфекции высвобождающихся емкостей. Режим работы испарителя при этом 5^oC, а газоохладителя 65^oC. После отделения сусла тепловой насос используется при брожении для стабилизации температуры 16-18°С при брожении по «белому» способу (температура испарителя 11-13°С) и для стабилизации температуры 28-30°С (температура испарителя 20°С) при брожении по «красному» способу. На одном и том же заводе могут быть использованы одновременно как первый, так и второй тип брожения. При процессе перегонки барды тепловой насос может быть использован совместно с установкой, работающей по органическому циклу Ренкина (ORC).

Вино должно выдерживаться при температуре 8…11°С для белых вин и 14…16°С для красных столовых вин. Тогда в период с апреля по июль вино может охлаждаться за счет использования ТНУ вместо существующей холодильной установки и при этом вырабатывать тепловую энергию, необходимую предприятию. В период после завершения выдержки вина установка может быть использована для кондиционирования воздуха в помещениях (вместо существующих кондиционеров) и также вырабатывать тепло для нужд предприятия. Использование теплового насоса с регенеративным теплообменником на тепловых трубах в составе пастеризационно–охладительной установки в линии розлива вина позволит снизить расход пара.

Стоимость выработанной теплоты от использования теплонасосной установки может быть определена путем следующих простых рассуждений. Пусть тепловой насос мощностью 10 кВт и со средним COP=3,5 эксплуатируется в течение 8 месяцев в течение 24 часов в сутки. Тогда им будет выработано количество теплоты Q, равное: $Q = 10\hat{e}\hat{A}\grave{o} \cdot 24 \cdot 30 \cdot 8 \cdot 3600\tilde{n} = 0,576 * 3600 = 2073,6GJ \approx 493,7Gcal$.

Стоимость выработанной тепловой энергии составляет при тарифе 70 долларов за 1 Гкал 493,7*70=34510 долларов. Стоимость электроэнергии для выработки такого количества теплоты при тарифе 0,12 доллара за 1 кВт составит

57600кВт/3,5*0,12=1974,9 доллара (57600 кВт – тепловая мощность за период работы ТНУ). Прибыль (стоимость теплоты минус затраты на электроэнергию) за 8 месяцев составит 34510-1975=32535 доллара. При стоимости ТНУ 10000 доллара простой срок окупаемости составит: 80000/32535~2,5 месяца. Поскольку до установки теплового насоса на винодельческих заводах используются уже холодильные установки, то эксплуатационные затраты в расчет не принимаются.

2. Требования к ТНУ для виноделия и особенности ее проектирования

Основным требованием к ТНУ является наличие максимума общего СОР при минимуме стоимости изделия. Другим требованием является способность ТНУ компенсировать неравномерность поступления винограда на обработку и, из-за этого, возникающую неравномерность процессов тепловой обработки вина, сусла, мезги. Это требование обеспечивается за счет накопителя теплоты. Теплонасосная установка должна иметь функцию передачи переменной тепловой мощности в тепловую установку, на которую она нагружена. Это обеспечивается за счет промежуточного контура для работы с установкой для брожения вина или с другой установкой. ТНУ должна иметь опцию регулирования температуры работы испарителей. ТНУ должна иметь два испарителя для возможности одновременного обслуживания процессов криомацерации и брожения, или охлаждения вина и процессов хранения вина.

Рассмотрим, как использовать условия, связанные с температурой воды для проектирования ТНУ для условий Республики Молдова. По данным [1] в июле 2004 – 2007 гг. на участке “Naslavcia-Otaci” температура воды в Днестре не превышала 14-16°C при температуре воздуха 30-35°C и более. В сентябре – октябре во время сезона промышленной переработки винограда температура воды находится в диапазоне 10-15°C. В более холодный период года температура воды достигает $4^{\hat{i}}\tilde{N}$. Рассмотрим, как использовать эту воду для получения максимального СОР ТНУ (см. рис.1).

Сначала вода из водопроводной сети (или артезианской скважины) температурой 10–20°C проходит через переохладитель газа теплового насоса и нагревается приблизительно до 14–24°C. При этом газ после ГО охлаждается приблизительно до $27-28^{o}C$. Затем поток воды проходит через перегреватель газа после испарителя и нагревает газ до $12^{o}C$. При этом сама вода снова охлаждается до 16…20°C. Далее этот поток воды (с добавлением воды для нагрева в газоохладителе ТНУ) охлаждает газ перед второй ступенью компрессора, нагреваясь до 30°C, и поступает на газоохладитель. Такая схема может быть примером рационального использования воды для работы ТНУ в зависимости от ее температуры. Следует отметить, что вода после установки нагрева вина или термомацерации также может быть подана на вход газоохладителя совместно с основным потоком воды, необходимой для обеспечения режимов работы теплообменных аппаратов ТНУ.

Вторым вариантом использования воды (на рисунке не приведен) может быть следующая схема ее подачи в ТНУ. Вода температурой 10–20°C (из водопроводной сети или артезианской скважины) сначала подается в перегреватель газа, где она охладится до температуры $8-16^{o}C$, после чего нагреется снова до температуры $14-16^{o}C$ в переохладителе газа, установленном за газоохладителем. Затем необходимо охладить газ перед второй ступенью компрессора до $20^{o}C$. При этом вода после газоохладителя охладится до $25^{o}C$, а температура газа после газоохладителя будет около $29^{o}C$. Так как тепловая мощность газоохладителя в 5-6 раз больше тепловой мощности переохладителя, перегревателя газа, охладителя газа перед второй ступенью компрессора, то необходимо соединить два потока воды – один – холодный от

основного источника воды, другой – теплый – после ее прохода через переохладитель, перегреватель газа, охладитель газа перед второй ступенью компрессора. Также воду, охладившуюся до $25-30^{o}C$ после обработки кагора теплом, полученным от теплового насоса, можно подать опять на вход газоохладителя теплового насоса.
Рассмотрим уравнение, связывающее давления нагнетания и всасывания компрессора с вопросом практического выбора регулирующих клапанов.

$$\Delta P_1^{'} + \Delta P_2^{'} + \Delta P_{f1} + \Delta P_{e1} = P_4 - P_5 \square P_d \qquad (1)$$

$$\Delta P_1^{'} + \Delta P_2^{''} + \Delta P_{f2} + \Delta P_{e2} = P_4 - P_5 \square P_d \qquad (2)$$

$$k_1\sqrt{\Delta P_1} = k_2\sqrt{\Delta P_{f1}} + k_3\sqrt{\Delta P_{f2}} = k_4\sqrt{\Delta P_1^{'}} + k_5\sqrt{\Delta P_2^{'}}, \quad (3)$$

где: $\Delta P_{f1}, \Delta P_{f2}$ – падения давлений на регулирующих клапанах регуляторов расхода;
$\Delta P_{e1}, \Delta P_{e2}$ – падения давлений на линиях, соединяющих выходы испарителей с выходом эжектора;
$\Delta P_1, \Delta P_2^{'}, \Delta P_2^{''}$ – падения давлений на РК1, РК2, РК3 (регуляторы давления на испарителях и газоохладителе). Работа регуляторов расхода газа основана на принципе поддержания постоянного перепада давлений регулирующим клапаном, параллельно подключенным к дросселю (заданный перепад давления на дросселе, обеспечиваемый клапаном, определяется задаваемым расходом среды).
Уравнения (1) и (2) отражают то, что сумма перепадов давления в замкнутом контуре равна разности давлений между входом и выходом компрессора (пренебрегаем падениями давлений на теплообменниках, установленных в контурах), а уравнение (3) то, что расход через регулирующий клапан давления ГО равен сумме массовых расходов через испарители или пропорционален сумме квадратных корней из падений давления на регуляторах давления испарителей.
ТНУ состоит из двухступенчатого компрессора 1 (1-1 и 1-2 ступени компрессора), охладителя газа второй ступени 2, газоохладителя 3, переохладителя газа 4, регулирующего клапана давления компрессора 5, ресивера 6, регуляторов расхода через первый и второй испарители 7,11, промежуточных емкостей 8 и 12, регулирующих клапанов давления испарителя 9, 13, испарителей 10,14 (один испаритель (поз.10) используется в системе управления брожением, а другой (поз.14) в технологическом процессе криомацерации), инжектора (смесителя) 15, с регулируемым приводом 16, аккумулятора 17 (он же отделитель жидкости), перегревателя газа перед первой ступенью компрессора 18.
Особенностью схемы является то, что регуляторы расхода газа через испарители расположены перед регуляторами давления испарителей, и то, что перепад давления на них больше зависит от расхода, чем перепад давления на регуляторах давления. Ресиверы 6, 8,12 служат для обеспечения надежной работы клапанов 5, 7, 11 в жидкой среде. Инжектор 15 служит для смешивания газов на выходе испарителей 10 и 14.
Схема накопителя тепловой энергии для ТНУ (рис.2) работает следующим образом. При пуске в работу установки аккумулятор 6 заполняется до определенного уровня насосом 1 (или от водопроводной сети) через вентили 2 и 3 и газоохладитель 5 (рис.1) горячим теплоносителем. При достижении заданного объема воды в баке-накопителе закрывается вентиль 7, и насос 8 через вентиль 4 начинает подавать из аккумулятора

греющий агент в нагрузку (обратный клапан после вентиля 2 не показан). Дальнейшее заполнение аккумулятора (поз.6) производится при закрытом вентиле 7. При достаточном напоре воды в водопроводной сети насос (поз.1 на рис.2) может отсутствовать.

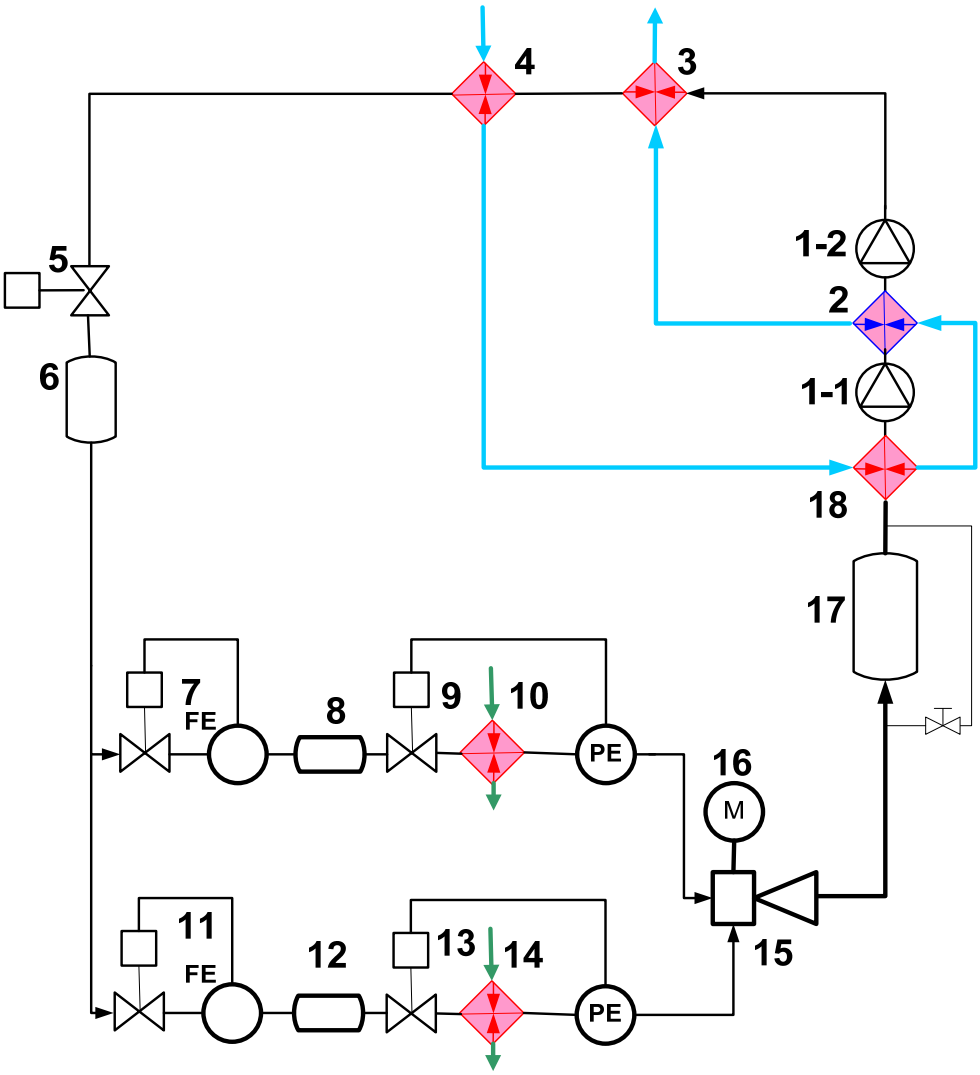

Рис.1. Схема теплонасосной установки с двумя испарителями

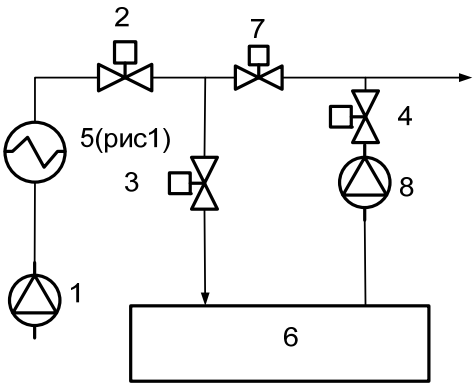

Рис. 2. Схема работы накопителя тепловой энергии ТНУ

При снижении нагрузки ТНУ, вызванной требованиями процесса брожения, аккумулятор начинает отдавать в нагрузку накопленную теплоту. Насос 1 отбирает тепловой агент из процесса обработки вина теплом или от водопроводной сети (в зависимости от условий ведения технологического процесса). В рассматриваемой ТНУ приоритетными (с точки зрения роли ТНУ в технологии) являются процессы **охлаждения** (бродящего сусла, вина и криомацерации в зависимости от сроков использования ТНУ). Процессы нагрева воды: для технологических целей (обработка вина теплом, термомацерация), для санитарных целей (мойка емкостей и др.) являются вторичными.

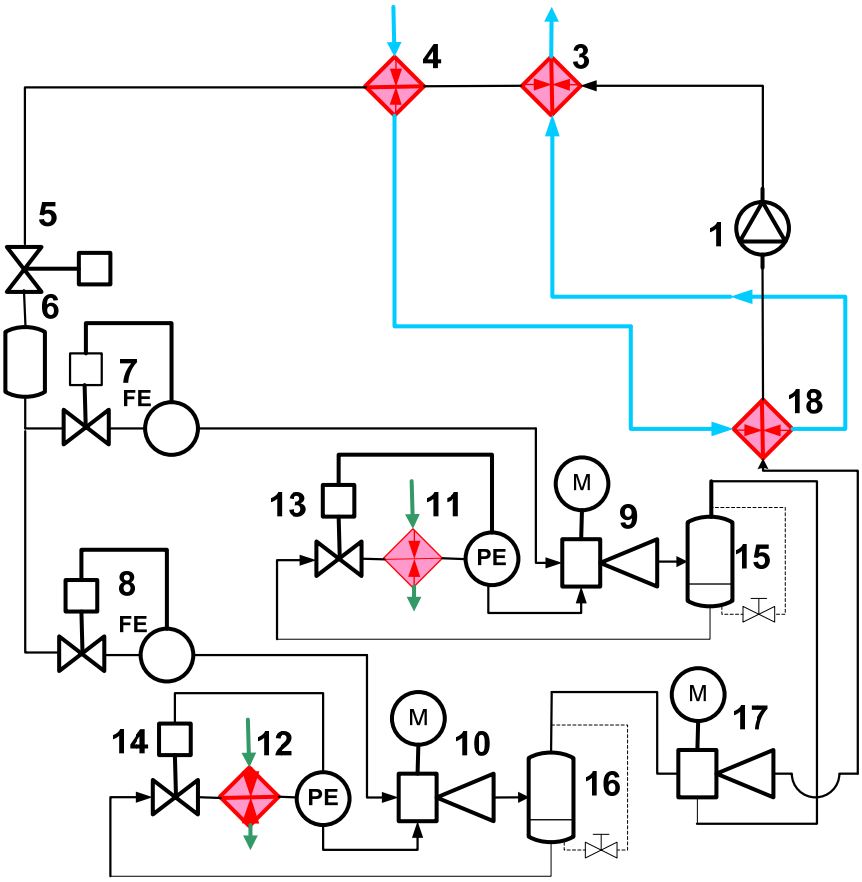

Рис. 3. Схема ТНУ с повышенным СОР

В процессах нагрева ТНУ играет роль вспомогательного источника тепловой энергии. В случае, когда по условиям технологии приоритеты использования ТНУ меняются (процессы нагрева приоритетные), аккумулятор холода устанавливается со стороны испарителя ТНУ. Рассмотрим схему ТНУ с двумя испарителями, включенными по схеме с повышенным СОР. Базой для этой схемы являются схемы, описанные в [2,7-15]. Отметим, что в этой схеме достаточно применить одноступенчатый компрессор, и теплообменники 4 и 18 могут быть заменены одним рекуперативным теплообменником (правда, за счет ухудшения управляемости объекта). Рассмотрим эффективность этой схемы ТНУ с использованием уравнения (1) для чего рассмотрим, как изменяется ***давление газа после эжектора при изменении расхода потока с большим давлением*** (G_1). При идеальном преобразовании энергии потоков газов, зависимость давления после эжектора в зависимости от давлений на его входах и коэффициента эжекции имеет вид [1]:

$$p_c = p_1^{1/(1+u)} \cdot p_2^{u/(1+u)} \quad . \qquad (4)$$

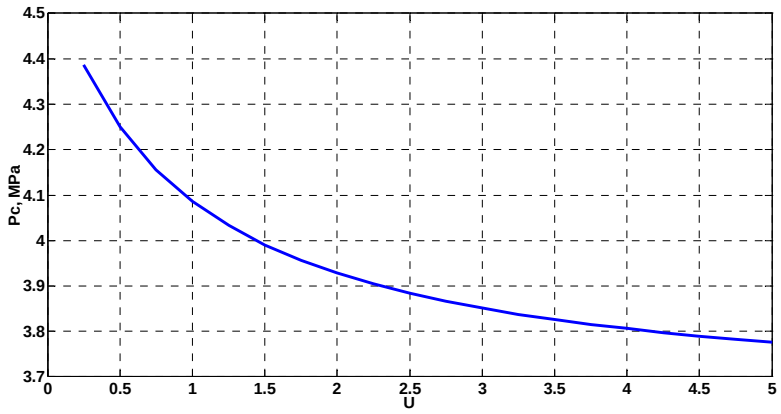

Рис. 4. Зависимость давления на выходе эжектора от коэффициента эжекции при давлении инжектирующего потока 4,73 МПа и давлении инжектируемого потока 3,6 МПа при идеальном преобразовании энергии потоков

Во втором случае давления на рабочих (эжектирующих) входах эжекторов составят 6,5 МПа, а давления на входах эжектируемых потоков соответственно 3,6 (пунктирная линия) и 4,73 МПа (сплошая линия).

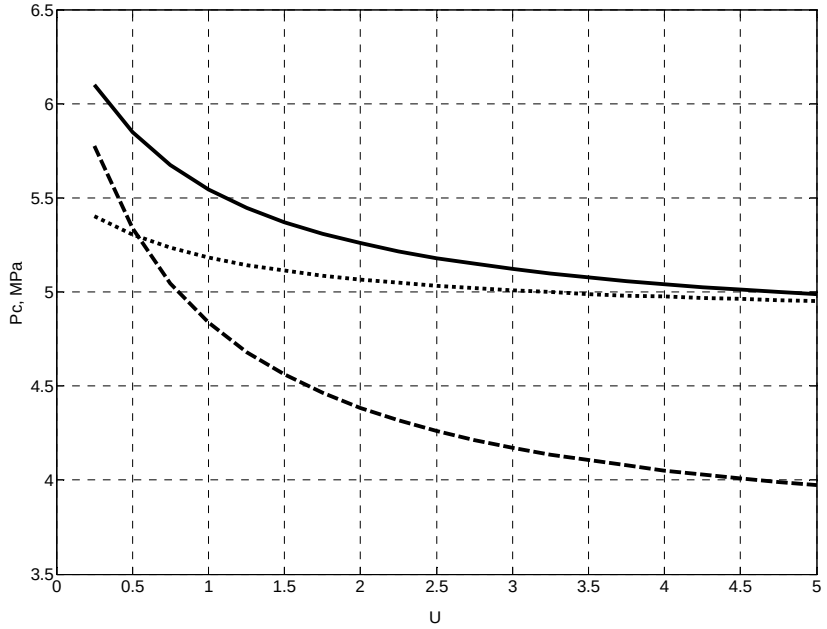

Рис. 5. Зависимость давления на выходе эжекторов от коэффициента эжекции при давлении инжектирующего потока 6,5 МПа и давлениях инжектируемых потоков 3,6 (пунктирная линия) МПа и 4,73МПа (сплошная линия**)** и после третьего эжектора (точечная линия) при идеальном преобразовании энергии потоков

Как показали расчеты эжекторов с использованием методик [4 и 5], отношения давлений на выходе эжекторов для схем рис. 1 и рис.3 близки к отношению давлений для идеального эжектора. Количество оборудования в схеме рис. 3 по сравнению со

схемой рис.1 возросло незначительно (дополнительно два эжектора и один отделитель жидкости) при значительном росте СОР. Следует отметить, что для схемы рис.3 эжекторы 9 и 10 могут быть выполнены нерегулируемыми, так как регулирование расходов обеспечивается регуляторами давления и расхода соответствующих эжекторов.

3. Общие положения по проектированию закона управления ТНУ

Рассмотрим систему «тепловой насос – установка для брожения вина» при возмущении температурой воды, поступающей на газоохладитель (ГО). Для системы управления газоохладителем в динамике одно из требований к качеству переходного процесса при скачкообразном возмущении – это наличие апериодического переходного процесса температуры воды при минимальном времени переходного процесса. Управлениями ГО при управлении температурой нагреваемой среды могут быть: *со стороны теплового насоса*: температура и давление хладагента на его входе, расход хладагента через ГО, а *управлением со стороны нагрузки* – расход нагреваемой среды. Возмущения – температура и расход воды на входе в ГО. Из-за переменности параметров передаточных функций ГО в зависимости от режима работы система должна быть спроектирована с использованием принципа инвариантности при условии переменных параметров коэффициентов регулятора и с условием наличия некоторых логических правил.

Пусть из-за действия случайных возмущений изменилась (допустим, возросла) температура воды на выходе ГО. Тогда регулятор должен проанализировать причину изменения: это изменения каких-то параметров хладагента или изменение расхода воды? В динамике при непрерывном изменении «подозрительных» факторов необходимо этот (или эти факторы) выделить. Одним из вариантов выделения причины возмущения является включение в алгоритм управления блока вычисления (в ускоренном масштабе времени) нормированных взаимокорреляционных функций между возмущениями и выходом, причем, в этом блоке каждый определенный период времени значения коэффициента взаимной корреляции обновляются (можно использовать знаковые корреляционные функции). После определения причины изменения выходной величины включается та или иная схема управления выходом системы. Если увеличить задание компрессору по давлению хладагента, то при этом уменьшится и температура хладагента после ГО или давление хладагента на выходе ГО. Ппри этом система в ускоренном масштабе времени должна определить, что предпочтительно: увеличить только задание по температуре или только задание по давлению хладагента, после чего включатся в работу все остальные системы (по цепочке). Можно уменьшить расход хладагента через компрессор, что также приведет к изменению мощности, потребляемой компрессором от сети (если причиной было изменение расхода воды через ГО). Таким образом, проще всего регулировать температуру воды расходом хладагента, если возмущением в системе является расход воды, с корректировкой этой температуры изменением температуры хладагента на входе в ГО.

Пусть система работает при: максимальной тепловой нагрузке испарителя контура брожения, испарителя контура криомацерации, и газоохладителя. Пусть в какой-то момент времени необходимо снизить мощность, отдаваемую испарителем в контур брожения. Для этого необходимо уменьшить расход хладагента через испаритель этого контура и расход газа через соответствующий эжектор. Доля этого имеются следующие **управления** (расход газа через компрессор, давление ГО, температура перегрева газа перед компрессором, ход иглы эжектора-смесителя, расход

газа через испаритель), которые воздействуют на следующие **выходы** (давление после газоохладителя (ГО), давления после испарителей, давление после эжектора-смесителя).

Из графика зависимости (рис.3) видно, что с ростом коэффициента эжекции давление на выходе эжектора падает. Из теории эжекторов [4], известно, что

$$u = \frac{G_2}{G_1} = \frac{p_{02} F_2 q(\lambda_2)\sqrt{T_{01}}}{p_{01} F_1 q(\lambda_1)\sqrt{T_{02}}}. \qquad (5)$$

Как следует из формулы (5) обеспечить переменный коэффициент эжекции «u» при постоянных давлениях и температурах и неизменных площадях сечений прохода эжектирующего и эжектируемого газов на начальном участке камеры смешения эжектора невозможно, даже если предположить, что эжектор будет работать в критическом режиме. Поэтому эжектор должен быть выполнен регулируемым.

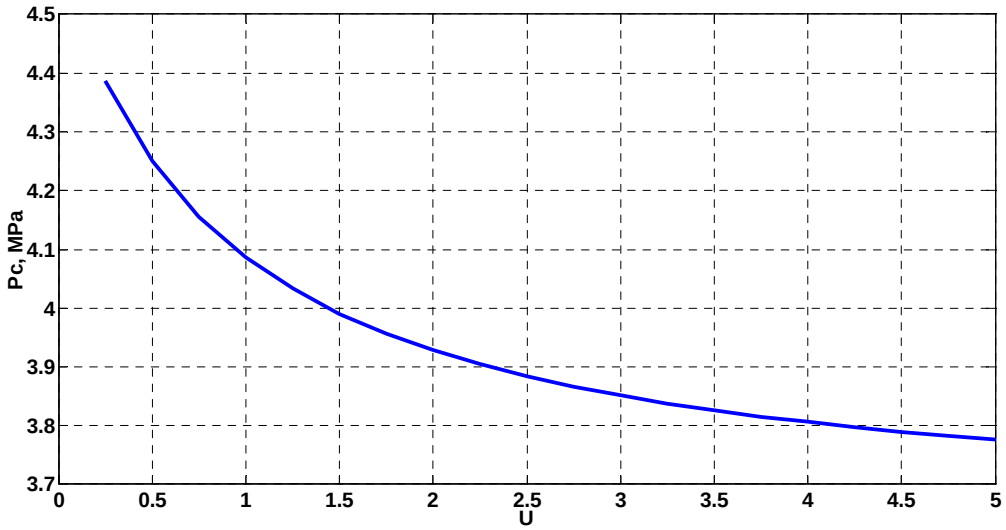

Рис. 3. Зависимость давления на выходе эжектора от коэффициента эжекции при давлении инжектирующего потока 4,6 МПа и давлении инжектируемого потока 3,63 МПа при идеальном преобразовании энергии потоков

При возмущении начальной температурой нагреваемой среды ТНУ реагирует изменением температуры на выходе газоохладителя. При возмущении расходом нагреваемой среды, ТНУ реагирует изменением расхода со стороны аккумулятора. Если нагрузка испарителей переменная, то необходимо решить задачу по распределению расхода газа в соответствии с нагрузками на испарители. Для ее решения организуем делитель потока, выполненный в виде двух регуляторов расхода, поз. 7 и поз. 11, установленных после ресивера 6 (рис.1).

Возмущающее воздействие – рост тепловой нагрузки испарителя установки брожения (ИУБ). Рассмотрим качественно процесс реакции системы на это возмущение.

1. Пусть нагрузка ИУБ возросла. Критерием роста нагрузки может являться рост температуры и скорости изменения температуры бродящей среды. Это означает, что процесс брожения пошел более интенсивно. ТНУ должна увеличить тепловую мощность, отдаваемую в установку для брожения. При *росте нагрузки* происходит *рост перегрева рабочего тела после испарителя*, так как еще не произошла реакция

системы на возмущение и снижение его эффективности (снижается теплоотдача испарителя).

2. САР ТНУ дает управляющие воздействия: на увеличение величины расхода среды в промежуточном контуре испарителя, на увеличение площади поверхности промежуточного теплообменника в промежуточном контуре и увеличение расхода рабочего тела через компрессор (все это обеспечивает передачу повышенной тепловой мощности в нагрузку).

3. При *изменении расхода рабочего тела* через (ИКБ) ввиду его параллельного включения по отношению к испарителю второго контура (ИВК) происходит перераспределение перепадов давлений на регуляторах давления после испарителей и регуляторах расхода газа через испарители.

4. Регулирующий клапан после газоохладителя (ГО) *прикрывается* с тем, чтобы поддержать давление в ГО. Перепад давления на нем увеличивается по сравнению с прошлым режимом, но, так как давление всасывания компрессора не должно измениться, то *регулирующие клапаны, регулирующие режимы работы испарителей, переходят в положения, при котором они* должны будут обеспечить постоянный перепад давлений между нагнетанием и всасыванием и постоянные давления после испарителей с учетом перегрева газа после них. Таким образом, обеспечивается необходимый режим поддержания расхода через ИКБ и давлений после испарителей.

Расход регулируется компрессором – первое управление, давление перед ГО и температура рабочего тела перед ГО регулируются регулирующим клапаном и путем изменения перегревом газа перед компрессором – второе управление. При этом необходимо помнить, что с ростом расхода через испаритель, потребуется и рост перегрева газа после эжектора–смесителя.

1. Предположим, что тепловая нагрузка на первый испаритель **возросла, а на второй снизилась** за счет роста температуры нагрузки у первого испарителя и изменения расхода охлаждаемой среды у второго испарителя.

При этом увеличится значение величины перегрева в первом испарителе, а во втором наметится тенденция к увеличению выхода жидкой фазы. Давление в первом испарителе меньше (по условию работы), а во втором больше. При этом если суммарный расход хладагента не изменяется, то произойдет перераспределение расхода между испарителями. Регулирующий клапан перегрева **первого испарителя** *откроется* (чтобы исключить перегрев хладагента после испарителя путем увеличения расхода через испаритель), при этом *повысится* давление на испарителе за счет того, что перепад давлений на клапане уменьшится, *температура кипения* хладагента *повысится*, *расход хладагента* через него *повысится*. Действие температуры хладагента и расхода хладагента на отдачу теплоты в нагрузку будут противоположных знаков. Если в результате роста перегрева регулирующий клапан *снизит давление* в испарителе и станет закрываться, чтобы *понизить* температуру кипения, то в этом случае расход рабочего тела снизится, и действие этих двух параметров на технологический процесс опять будет *противоположным*. Но в этом случае нарушается требование технологии о неизменности температуры кипения в испарителе.

Результат будет зависеть от конструктивных параметров испарителя и схемы работы установки для охлаждения, что нежелательно. При этом, вместо того, чтобы просто повысить расход хладагента через испаритель, может произойти его дальнейший разогрев.

Очевидным становится требование о независимом регулировании, как расхода, так и давления (температуры хладагента) в первом испарителе.

Во **втором испарителе** (из-за роста расхода хладагента в первом испарителе) расход хладагента *снизится, давление возрастет*. Возникнет воздействие на нагрузку с

разными знаками: за счет роста температуры испарения во втором испарителе увеличится его теплоотдача, за счет снижения расхода снизится количество теплоты, отдаваемое нагрузке. При этом реакция второго испарителя на изменение нагрузки зависит от факторов, определяемых конструкцией испарителя и условиями технологического процесса, и точно может быть определена без анализа конкретной конструкции установки для охлаждения, связанной со вторым испарителем.

Если нагрузка на первый испаритель **снизилась, а на второй возросла,** то регулирующий клапан перегрева первого испарителя начнет закрываться (с целью стабилизации перегрева хладагента после первого испарителя), при этом *снизится* давление на испарителе, температура кипения первого испарителя понизится, расход хладагента через него *снизится*. Снижение температуры кипения первого испарителя приведет к дальнейшему уменьшению его температуры кипения, и будет действовать противоположно изменению расхода через испаритель.

Во втором испарителе расход хладагента *повысится*, давление *снизится*. Возникнет воздействие на нагрузку второго испарителя с одинаковыми знаками: за счет роста температуры испарения во втором испарителе снизится его теплоотдача, за счет снижения расхода снизится количество теплоты, отдаваемое нагрузке.

Очевидно, что система с двумя испарителями, где не регулируется независимо расход хладагента и температура испарения, хорошо подходит только для систем с одинаковой тепловой нагрузкой.

Выводы

1. Показано, что система с двумя испарителями, в которой не регулируются независимо расход хладагента и температура испарения, подходит только для систем с одинаковой тепловой нагрузкой, а также то, что в двухтемпературном тепловом насосе с двумя испарителями эжектор для смешивания потоков хладагента после испарителей должен быть выполнен регулируемым.
2. В теплонасосной установке, в которой эжекторы включены в контуры циркуляции хладагента через испарители происходит рост коэффициента тепловой эффективности.
3. Необходимым условием эффективной работы установки является наличие узлов регулирования давления хладагента и его расхода через каждый испаритель.

Литература

1. Зубкова Е., Шленк Д. Современное состояние качества воды реки Днестр, http://tiras.vox.md/materials/127-131.pdf
2. Лавренченко Г.К., Швец С.Г. Анализ энергетических характеристик двухтемпературной компрессорной холодильной машины. «Технические газы», № 1, 2009, с.22…26.
3. Hirotsugu Hateuchi “Ejector with throttle controllable nozzle and ejector cycle using the same”, patent USA 6966199 B2, 2005.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Изд. третье, Наука, 1969, с.824.
5. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – 3-е изд. – М:. Энергоатомиздат, 1989.–352 с.
6. Sîrghi C., Zironi R. Aspecte inovative ale enologiei moderne. Editura „SIGMA”, Chişinau, ISBN 5-88554-018-7., 1994, pp. 261.
7. Hirotsugu Hateuchi Ejector cycle system. Patent USA 6438993 F25B 1/06, 2002.

8. Bulinski Z., Smolka J., Fic A., Banasiak K., Novak A.J. "A comparison of heterogeneous and homogenious models of two-phase transonic compressible CO_2 flow through a heat pump ejector". IOP Conf. Series: Material aand Engineering 10 (2010) 012019 doi: 10.1088/1757-899X/10/1/012019 http://iopscience.iop.org/1757-899X/10/1/012019/pdf/1757-899X_10_1_012019.pdf
9. J. Smolka, Z. Bulinski, A. Fic, K. Banasiak, A.J. Nowak, A. Hafner "Two-phase transonic compressible CO_2 flow through a heat pump ejector based on homogeneous equilibrium model". ECCM 2010, IV European Conference on Computational Mechnics. Paris, France, May 16-21 2010. http://www.eccm2010.org/complet/fullpaper_1338.pdf
10. Спиридонов Е.К., Школин С.Б. Исследование предельных режимов двухфазного эжектора. Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия «Машиностроение», 2008. – Вып.11.– №10(110).– С.55–61.
11. Chen Guang-min, Liang Li-xia, Xu Xiao-Xiao, Zhu Zhi-jang, Chen Qi "Experimental investigation of an adjustable ejector for CO_2 heat pump water heaters" Journal of Zhejiang University SCIENCE A 2009 10(11): 1678-1682.

Сведения об авторах:

Шит Михаил Львович – к.т.н, заведующий лабораторией микропроцессорных систем управления Института энергетики АНМ, область научных интересов: системы управления в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве, системы управления мобильными объектами. E-mail: ieasm@cc.acad.md.

Балануцэ Анатолий Павлович – доктор хабилитат технических наук, заведующий Кафедрой виноделия Технического университета Молдовы. Область научных интересов – энергосберегающие технологии в виноделии. E-mail: balanuta@mail.md

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 более 20 статей и одного патента. E-mail: boris_fld@rambler.ru

УДК 539.3.01:532.12

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ДОПУЩЕНИЙ УРАВНЕНИЯ НАВЬЕ-СТОКСА

Бударин В.А. *Одесский национальный политехнический университет, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1*

Аннотация. Статья посвящена анализу некоторых этапов вывода системы уравнений Навье-Стокса в координатной форме. Целью анализа является выяснение многолетних трудностей замыкания системы, причин расхождения точных решений при малых числах Рейнольдса и возникновения неустойчивых решений при использовании компьютерных программ.
Ключевые слова: уравнение Навье-Стокса, приближенное уравнение, замыкание уравнения, коррекция статуса.

ANALIZA UNOR IPOTEZE ALE EQUAȚIEI NAVIER-STOKES

V.Budarin
Universitatea Națională Politehnică din Odesa
Rezumat. Articolul este consacrat analizei unor etape ale deducerii sistemului de ecuații Navier-Stokes. Scopul analizei este elucidarea dificultăților multianuale ale închiderii sistemului, cauzelor de divergențe ale soluțiilor precise la numerele mici ale Reinolds şi apariția soluțiilor instabile oferite de programele specializate de calcul.
Cuvinte–cheie: ecuație Navier-Stokes, ecuație de orientare, blocarea ecuației, carecția statutului.

ANALYSIS OF SOME ASSUMPTIONS OF NAVIER-STOKES EQUATION
V.Budarin
Odesa National Politecnical University

Abstract. Several stages of the derivation of Navier-Stokes equations in coordinate form are analyzed. The purpose of the analysis is the determination of long-term problems of system closure, of reasons for differences of exact solutions for low Reynolds numbers and the appearance of unstable solutions using computer programs.
Keywords: Navier-Stokes equation, approached equation, equation closure, status correction.

1.ВВЕДЕНИЕ

В основе теоретического описания конвективного теплообмена, взаимодействия текучей среды и твердого тела во внешней и внутренней задаче гидродинамики, а также при расчете многих других процессов лежит система уравнений движения вязкой жидкости Навье-Стокса [1, 2]. На протяжении значительного периода времени удалось получить небольшое количество точных решений простых частных задач, которые имеют одно общее свойство - решения справедливы при весьма малых числах Рейнольдса. Например, одна из задач, связанных с вязким течением на плоскости, возникающем при контакте с ней вихревой нити, справедлива при числе Re < 5,5. Для других задач эти числа Рейнольдса могут быть значительно меньше [3, 4].

В тепловой энергетике и во многих других областях такие числа Рейнольдса отсутствуют, что привело к разработке других методов расчета практически важных задач, среди которых выделим путь, основанный на расширении возможностей классических точных решений. Сюда относятся, в частности, осесимметричные и закрученные течения, течения с ускорением и др. [3]. Например, в работе [5] рассматривается распространение точного решения о течении вязкой затопленной струи Ландау на гидродинамические течения (идеальная жидкость) и акустические

течения. Данный путь не получил широкого распространения в инженерной практике, однако является весьма полезным, например, при проведении сравнительных или тестовых расчетов.

Другим путем использования системы уравнений Навье-Стокса, которое имеет четыре неизвестных, является ее замыкание с помощью полуэмпирических уравнений теории турбулентности с последующим ее численным решением. Весь комплекс проблем данной области рассматривается в Computer Fluid Dynamic (CFD). Этот путь оказался весьма плодотворным, и для его реализации разработаны специализированные математические пакеты Fluent, Esi_CFDrc, Flow Vision и др. Получаемые результаты характеризуются хорошей наглядностью, большим количеством вычисляемых параметров, но одновременно часто являются неустойчивыми и требуют сравнения результатов, полученных разными методами [6]. Тем не менее, электронные базы данных решенных задач постоянно пополняются и используются проектировщиками.

Третьим путем получения уравнений движения является составление расчетной схемы частной задачи и применение к ней частного случая уравнения Навье-Стокса или непосредственно уравнения равновесия, следующего из правил теоретической механики. Примером такой задачи является течение Пуазейля [1, 4, 7]. Характерной особенностью получаемого этим путем результата является возможность применения решения для всех чисел Рейнольдса, вплоть до возникновения турбулентности. Это означает, что малые числа Рейнольдса в классических точных решениях не характеризуют физические особенности процесса, а отражают свойство (недостаток) математической модели. Такой вывод следует, в частности, из результатов сравнения теории и эксперимента в задаче об определении сопротивления шара [4]. Данный путь получения уравнения движения требует хорошего понимания частного процесса для составления корректной расчетной схемы. Кроме того, существует вероятность возникновения скрытых допущений, что требует проведения эксперимента или сравнительных расчетов.

Анализ рассмотренных путей решений задачи движения показывает, что наиболее информативное решение можно получить с помощью общего дифференциального уравнения движения, а учитывая недостаток математической модели, основанной на уравнении Навье-Стокса, ключевой задачей совершенствования методов расчета течений различных классов является выяснение причин возникновения ограничений по числу Рейнольдса.

Одним из возможных ответов на этот вопрос является анализ уравнения для вычисления среднего давления, которое является дополнительной гипотезой, оправдываемой практикой [1].

В настоящей статье обсуждается данная гипотеза, оценивается ее влияние на точные решения уравнения Навье-Стокса, а также предлагается путь исключения негативного влияния этой гипотезы.

2.СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ

Уравнение Навье-Стокса предназначено для описания течения широко распространенного частного вида текучей среды – вязкой ньютоновской жидкости. Основой для вывода этого уравнения послужило уравнение движения в напряжениях (Навье), которое в координатной форме имеет вид,

$$X + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) = \frac{du_x}{dt}$$

$$Y+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial p_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}\right)=\frac{du_y}{dt} \qquad (1)$$

$$Z+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial p_{zz}}{\partial z}\right)=\frac{du_z}{dt},$$

где: X, Y, Z – удельные массовые силы, м/с^2 , p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} – проекции нормального напряжения на оси координат, Па, ρ - плотность, кг/м^3 , τ_{ij} – касательные напряжения, Па, $\frac{du_x}{dt}=\frac{\partial u_x}{\partial t}+\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}$ - полное ускорение частицы вдоль оси x, м/с^2 , u_x, u_y, u_z –проекции скорости на оси координат, м/с.

Уравнение (1) имеет девять неизвестных и требует для своего замыкания еще шесть уравнений.

Уравнение Навье-Стокса получено с целью сокращения количества неизвестных, что делает его более пригодным для использования. В результате получена следующая система уравнений для несжимаемой ньютоновской жидкости [1].

$$X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\cdot\nabla^2 u_x=\frac{du_x}{dt}$$

$$Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\nu\cdot\nabla^2 u_y=\frac{du_y}{dt} \qquad (2)$$

$$Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\cdot\nabla^2 u_z=\frac{du_z}{dt}$$

где: p_x, p_y, p_z – проекции давления на оси координат, ν - кинематическая вязкость, $ì^2/c$.

Эта система уравнений имеет четыре неизвестных и также незамкнута, как и система (1). Системы уравнений (1) и (2) являются нелинейными в связи с присутствием в правой части трех конвективных ускорений.

3. КРАТКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ (1) И (2)

1. Отличие систем в части нормальных сил состоит в разных результатах решения уравнений. Решив систему (1), мы получим компоненты нормального напряжения p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} , т.е. конечный результат расчета. Решив систему (2), мы получим промежуточный результат, который требует пересчета величины p в компоненты давления $p_x = -p_{xx}$, $p_y = -p_{yy}$, $p_z = -p_{zz}$. Этот пересчет выполняется с помощью следующего линейного уравнения:

$$p=\frac{p_x+p_y+p_z}{3} \qquad (3)$$

Таким образом, уравнение (3) предполагает, что расчетная величина p (давление) является средним арифметическим от искомых компонент давления. В итоге имеет место противоречие между нелинейным характером уравнения (2) и предположением о линейном характере изменения результатов расчета. В общем случае такое допущение является некорректным и не может привести к положительным результатам расчета процесса течения.

Задача осреднения результатов расчетов возникает и в других областях науки. Например, в технической термодинамике и в теории теплообмена существует много задач, в которых результаты решения нелинейных уравнений усредняются по нелинейным формулам [8, 9].

Однако для некоторых частных задач уравнение (3) можно считать справедливым, но при использовании еще одного допущения. Необходимо принять, что линейный закон осреднения (3) справедлив для нелинейной функции, что верно, если сократить интервал осреднения. В этом случае кривую можно заменить на отрезок прямой.

Выводы

1. Уравнение (3) содержит семантическую неточность, т.к. является приближенным. Более правильным является использование в уравнении (3) знака приближенного равенства. Отмеченное противоречие приводит к изменению статуса системы Навье-Стокса с точного на приближенное.

2. Требование малости интервала осреднения для корректности уравнения (3) означает, что система (2) должна стать линейной, т.е. в правой части должна присутствовать только частная производная по времени, а конвективные ускорения должны стремиться к нулю. Это возможно, если компоненты скорости в выражениях для конвективных ускорений являются малыми, что соответствует малым числам Рейнольдса.

В настоящее время известные точные решения этой системы фактически подтверждают указанный вывод, т.к. они справедливы при $Re \approx 10^{-3} \ldots 5{,}5$ [3].

4. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ И ЕГО ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ

В настоящее время общепризнанными являются три модели текучей среды: идеальная, невязкая и, наиболее общая, вязкая жидкость. Все эти модели взаимосвязаны между собой системой условий, и любые дополнительные уравнения, претендующие на роль замыкающих, должны учитывать эти взаимосвязи. На рисунке 1 показана взаимосвязь условий и математических моделей текучей среды, которые следуют из общего уравнения движения.

Таким образом, из уравнения (1) можно получить частные случаи уравнений движения для трех моделей текучей среды. В то же время более распространенной схемой получения этих же уравнений считается упрощение системы Навье-Стокса [1]. Последний путь получения, например, уравнения Эйлера (по условию $\nu = 0$) не означает, что оно является также приближенным, так как имеет другой путь упрощения, следующий из точного уравнения. В то же время уравнения пограничного слоя содержат те же допущения, что и уравнения (2), и также должны считаться приближенными.

Модель невязкой жидкости должна считаться точной, так как никак не связана с уравнением Навье-Стокса, однако содержит шесть неизвестных, что ограничивает ее использование. Тем не менее, оно может использоваться для решения некоторых частных задач. Пример использования этой модели текучей среды для расчета разрывного течения вращающейся жидкости с двумя поверхностями давления приведен в работе [10].

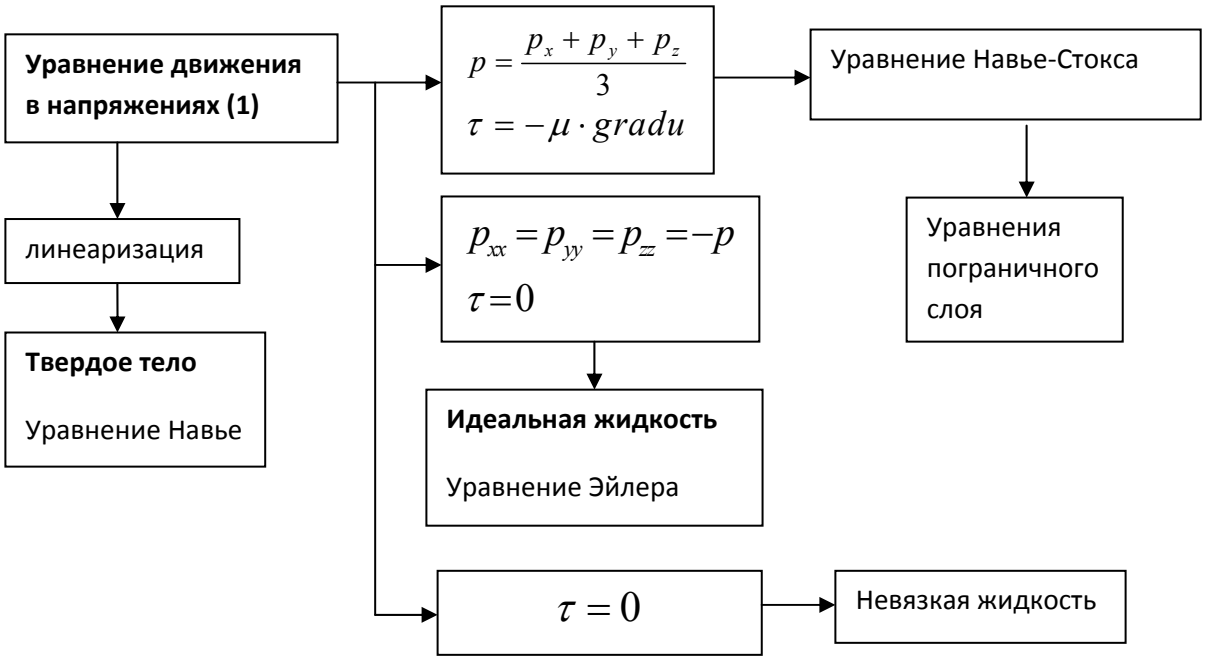

Рис. 1. Условия и результат их применения к общему уравнению движения (1)

5. ПЕРСПЕКТИВЫ КОРРЕКЦИИ СТАТУСА УРАВНЕНИЯ НАВЬЕ-СТОКСА

1. Уравнения Навье-Стокса, а также приближенные (полуэмпирические) уравнения теории турбулентности, которые позволяют замкнуть уравнение движения, составляют систему, все уравнения в которой приближенные. Решение такой системы также должно считаться приближенным, что может проявиться в непрогнозируемых (неустойчивых) результатах.

2. Из анализа допущений следует, что существенно улучшить возможности системы уравнений п.1 не представляется возможным. Более рациональным следует считать путь составления замкнутой системы уравнений на основе уравнений (1), дополнив ее шестью уравнениями по аналогии с используемыми в другой области механики сплошной среды – теории упругости.

3. Взаимосвязь различных уравнений такой системы можно иллюстрировать схемой рисунка 2. Силовое поле (напряжений) содержит три уравнения, т.к. вектор силы можно разложить на три составляющих. Поле скоростей деформаций содержит шесть уравнений, т.к. раскладываются векторы линейных и угловых деформаций. В итоге получаем девять уравнений, образующих замкнутую систему. Из схемы также следует, что некоторые частные задачи можно решать с использованием уравнений для любого поля с последующим пересчетом результатов в параметры второго поля с помощью уравнений связи.

4. Рассмотренная схема взаимосвязей таких же уравнений, но с другим математическим содержанием, широко используется для решения частных задач в сопротивлении материалов [10]. Это дает надежду, что при более подробной разработке уравнений рисунка 2 возможно продвинуться на пути создания новых расчетных методов решения задач механики жидкости и газа с учетом влияния температуры и давления.

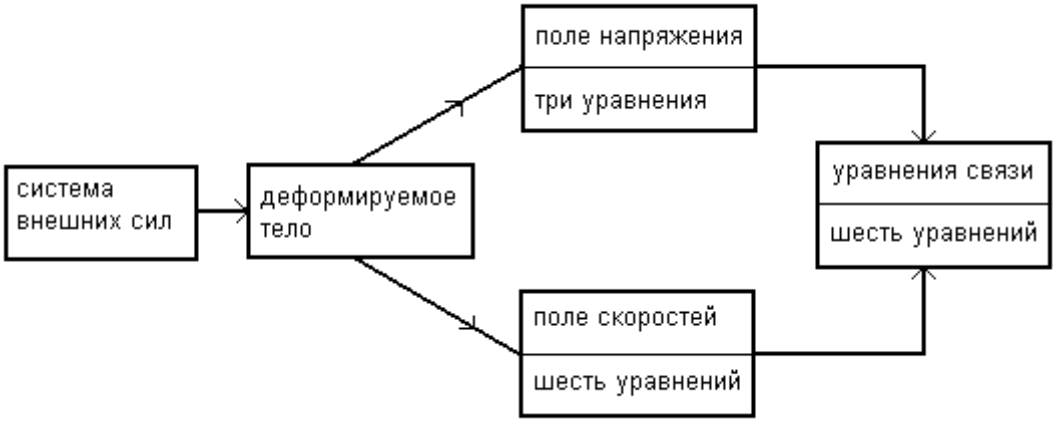

Рис.2. Взаимосвязь физических полей и уравнений, возникающих при воздействии на текучую среду системы внешних сил.

6. ВЫВОДЫ

1. В результате анализа процесса вывода системы уравнений Навье-Стокса найдено противоречие, которое требует изменения статуса системы с точного на приближенный.

2. Для замыкания общего уравнения движения жидкости и его частных случаев предлагается использовать теорию деформационного движения, аналог которой плодотворно используется в другой области механики сплошной среды – теории упругости.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5, переработанное. ГРФМЛ изд. Наука, М., 1978. – 736 с.
2. Charles L. Fefferman EXISTENCE & SMOOTHNESS OF THE NAVIER–STOKES EQUATION, Princeton University, Department of Mathematics, Princeton, NJ 08544-1000.
3. Вязкие течения с парадоксальными свойствами /Гольдштик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1989. – 336 с.
4. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика.М., Наука, 1964. – 814 с.
5. Броман Г.И., Руденко О.В. Затопленная струя Ландау: точные решения, их смысл и приложения. УФН, т.180, N1, 2010, с.97 – 104.
6. Роуч.П.Вычислительная гидродинамика. М., Мир, 1980. – 616 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Т.6, М., ГРФМЛ, 1988 – 733 с..
8. Киррилин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика.М., Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
9. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Энергоиздат, М., 1981. – 1981. – 417 с.

10. Бударин В.А.Метод расчета движения жидкости. Одесса, Астропринт, 2006. - 140с.
11. Демидов С.П. Теория упругости. Учебник для вузов.– М., Высш. Школа,1979. – 432 с.

Бударин В.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической, общей и нетрадиционной энергетики ОНПУ, область научных интересов – уравнения движения жидкости, вихревые потоки конечных размеров, практическое использование вихревых трубок с двумя поверхностями давления.
e-mail: vit-b@inbox.ru

КОМПЛЕКТ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТВЕРДОГО БИОТОПЛИВА (ПЕЛЛЕТ ИЗ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА)

Слюсаренко В.В. , АО «Алиментармаш», г. Кишинёв

Аннотация: В работе описана проблема, возникающая при производстве подсолнечного масла методом «горячего» прессования, а именно проблема отходов – лузги семян подсолнечника. Приведены примеры её использования в качестве твёрдого биотоплива. Описаны преимущества гранул из лузги подсолнечника перед традиционными видами твёрдого топлива. Приведена аппаратно-технологическая схема комплекта оборудования для производства топливных гранул из лузги подсолнечника. Приведены характеристики производимых на комплекте пеллет из лузги.

Ключевые слова: лузга подсолнечника, топливные гранулы, пеллеты, прессование, комплект оборудования, гранулирование, твёрдое биотопливо.

Set de echipamente pentru producerea biocombustibilului solid (pelete din floarea-soarelui)

Sliusarenko V., "Alimentarmaş"S.A., Chişinău

Rezumat: În articol este descrisă o problemă, care are loc în procesul producerii uleiului prin metoda presării “fierbinte”, şi anume problema deşeurilor - coji de seminte ale răsăritei. Sunt prezentate exemple de utilizare a deșeurilor în calitate de biocombustibil solid. Sunt descrise avantajele peletelor din floarea soarelui fața de tipuri tradiționale ale combustibilui solid. Este prezentată schema tehnologică a echipamentului pentru producerea peletelor de combustibil produse din floarea soarelui. Sunt prezentate caracteristicile peletelor produse din coajă.

Cuvinte–cheie: coji de floarea–soarelui, pelete din lemn, pelete, extrudare, granulare, biocombustibil solid.

Set of equipment for the production solid biofuel (pellets made of sunflower)

Slusarenko V., JSC "Alimentarmash", Chişinău

Abstract: A problem which appears during the process of sunflower oil production by hot-pressing, namely the problem of wastes - husks of sunflower seeds is described in this article. The examples of its use as a solid biofuel are shown. The advantages of sunflower pellets compared to the traditional types of solid fuel are discussed. Hardware and technological scheme of the equipment for the production of fuel pellets made of sunflower is shown. The characteristics of pellets produced from the set of the husk are shown as well.

Keywords: sunflower husks, wood pellets, pellets, extrusion, equipment set, granulation, solid biofuel.

Введение

При производстве подсолнечного масла методом «горячего» прессования образуется 11-16% лузги, которой на предприятиях накапливается огромное количество – от нескольких тонн до нескольких десятков тонн (в зависимости от мощности маслоэкстрационного или маслопрессового завода). Чаще всего лузгу вывозили на отвалы, при этом проблемами являлись низкий насыпной вес лузги, способность её к возгоранию и тлению, что создаёт неприятный запах и сильно ухудшает экологическую обстановку. Из-за низкого насыпного веса предприятия несли большие расходы на транспортировку лузги на свалку.

На современных маслоэкстракционных заводах лузгу сжигают в котлах с получением пара, который в дальнейшем можно использовать как на технологические нужды, так и на отопление, а также на выработку электроэнергии. Но котлы для сжигания лузги, как импортные, так и производства стран СНГ – дорогие, при этом не всегда надёжны в эксплуатации, в некоторых из них не решены проблемы с засорением шлаковыми образованиями и с утилизацией выхлопных газов, что может привести к конфликту с экологическими ведомствами. Кроме того, при таком способе использования лузги степень её утилизации не превышает 50%. [1].

Материалы и методы

Одним из наиболее выгодных способов утилизации лузги, позволяющим не только избежать лишних затрат, но и получить дополнительную прибыль, является производство на её основе твёрдого биотоплива (т.н. пеллет и брикетов) с последующей их реализацией , в т.ч. и на экспорт. В странах ЕС давно и успешно используют растительное сырьё для получения энергии, и в настоящее время спрос на твёрдое биотопливо значительно превышает предложение.

Наиболее эффективным способом производства твёрдого биотоплива является *гранулирование*, поскольку при этом конечная влажность готового продукта составляет всего 8-12%, а исходный материал уплотняется в 5-10 раз. Гранулированное биотопливо обладает также рядом других преимуществ, среди которых следует отметить постоянство качественных характеристик, удобство хранения, возможность использования в отопительных системах с автоматической подачей топлива.

Гранулы из лузги подсолнечника имеют огромные преимущества по сравнению с традиционными видами топлив:

- теплотворность их составляет 17000÷19000 кДж/кг, что больше, чем у древесины, и сравнима с некоторыми видами угля (таблица 1);
- при сжигании 2000 кг топливных гранул выделяется столько же тепловой энергии, как и при сжигании 3200 кг древесины, 957 м^3 газа, 1000 л дизельного топлива, 1370 л мазута;
- горение гранул в топке котла происходит более эффективно – количество остатков (золы) не превышает 1,0÷3,0% от общего объема используемых гранул;
- при сжигании гранулы не оказывают негативного воздействия на окружающую среду;
- гранулы не содержат скрытых пор, склонных к самовоспламенению при повышении температуры;
- увеличение насыпного веса готового продукта по сравнению с исходным сырьем в 6÷6,5 раза и, следовательно, снижение затрат при транспортировке.

В таблице 1 приведены некоторые параметры лузги подсолнечника, топливных гранул из неё по сравнению с древесными опилками и каменным углем.

Таблица 1. Сравнительные характеристики некоторых видов топлива [1]

Тип топлива / Параметры	Древесные опилки	Лузга подсолнечника	Топливная гранула из лузги подсолнечника	Уголь каменный
Средний насыпной вес, кг/м^3	220÷250	90	550÷600	1000
Теплотворность, кДж/кг	17150	19320	19320	19800÷21000
Влага, %	6÷8	4÷7	8÷10	-
Зольность, %	0,5÷1,0	0,35÷3,0	1,0÷3,0	10÷20

Благодаря вышеперечисленным качествам гранулы обладают высокой конкурентоспособностью по сравнению с другими видами топлива.

Технология производства топливных гранул из лузги подсолнечника не сильно отличается от технологии производства древесных или торфяных гранул. В большинстве случаев это сырьё не требует предварительной сушки, так как имеет влажность не более 14-15%. Подсолнечная лузга измельчается при помощи молотковой

дробилки и подается непосредственно на линию гранулирования. Перед прессованием измельчённая подсолнечная лузга должна пройти влаго-термическую обработку (обработку острым паром, а при недостаточной влажности – горячей водой). При выходе из прессующей камеры гранулятора гранулы необходимо охладить, отсеять от образовавшейся при гранулировании и транспортировании крошки и передать на хранение бестарно (насыпью или в бункере) либо в таре (мешках или биг-бэгах).

Результаты и дискуссии

На АО «Алиментармаш» (Кишинёвском заводе пищевого оборудования), специализирующемся на выпуске оборудования по производству и переработке растительных масел (в том числе и из семян подсолнечника) [2], была разработана аппаратурно-технологическая схема производства гранул из лузги подсолнечника (рис.1). В соответствии с принятой схемой был разработан и изготовлен комплект необходимого оборудования.

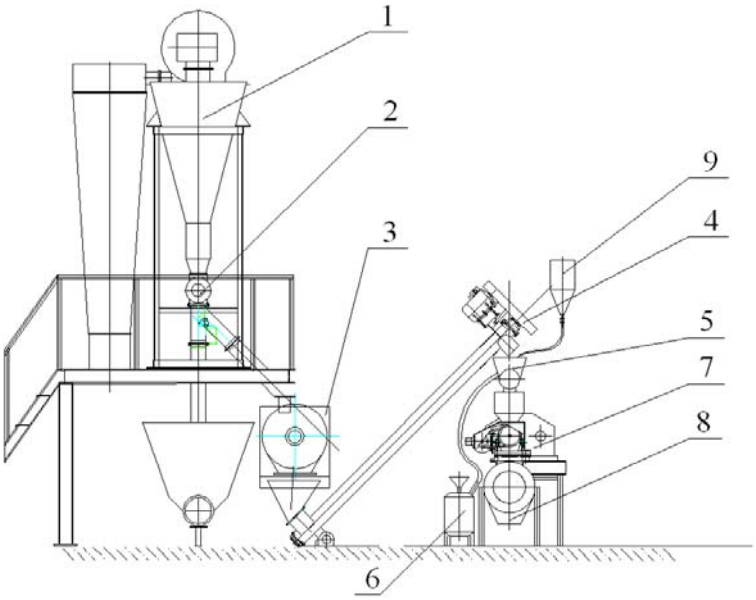

Рис. 1. Аппаратурно-технологическая схема комплекта оборудования для производства топливных гранул из лузги подсолнечника

1 - циклон, 2 - шлюзовый затвор, 3 - молотковая дробилка, 4 - винтовой транспортёр, 5 - смеситель лузги, 6 - парогенератор, 7 - пресс-гранулятор, 8 - барабанный сепаратор, 9 - бачок для воды

Принцип работы комплекта оборудования заключается в следующем. Подсолнечная лузга при помощи пневмотранспорта поступает в циклон 1, а оттуда, пройдя шлюзовый затвор 2, поступает в молотковую дробилку 3, где измельчается в мелкую фракцию. Измельченная лузга затем поступает в приемный бункер винтового транспортёра 4, а из него в приемный бункер смесителя лузги (кондиционера) 5. В кондиционере лузга при помощи парогенератора 6 обрабатывается паром, чтобы размягчить волокна и активизировать связующее вещество. При недостаточной влажности лузги (менее 12%) в смеситель из бачка для воды 9 подаётся вода в количестве, необходимом для увлажнения лузги до 15…18%. Пройдя обработку горячим паром и водой, лузга попадает в прессующую камеру пресса-гранулятора 7. Полученные на прессе-грануляторе мягкие горячие гранулы нужно охладить и придать им твёрдость во

избежание их крошения. Это происходит в барабанном сепараторе 8, где одновременно с охлаждением (при помощи вентилятора) происходит отсев мелкой крошки, получаемой во время гранулирования и транспортировки. Охлаждённые твердые гранулы поступают на хранение.

Влажность исходного материала, подвергаемого уплотнению, влияет не только на качество гранул, но и на экономичность работы прессов-грануляторов. Высокая пористость сырья делает его очень чувствительным к наличию в системе воды. Профессор В.Ф.Некрашевич установил, что зона оптимальной влажности лежит в пределах 15…18%. При увеличении влажности частиц выше 18% уменьшается их прочность: частицы набухают, увеличивается их объём. Частицы воды, находящиеся между частицами сырья, препятствуют их сближению и работают как клинья. Это приводит к ухудшению качества гранул и увеличению энергоёмкости процесса прессования [3]. Производительность пресса-гранулятора первоначально можно определить по формуле [3]:

$$Q = S_o l \rho z \beta / t, \text{ кг/с}, \qquad (1)$$

где: S_o –площадь поперечного сечения канала, м^2;

l –длина канала, м;

ρ – плотность гранул, кг/м^3;

z – количество каналов в матрице;

β – коэффициент использования живого сечения матрицы;

t – время прессования, т.е. время пребывания порции материала в канале прессования, с.

Производительность комплекта оборудования, созданного на АО «Алиментармаш» 120÷150 кг/ч (по сырью). В таблице 2 приведены характеристики гранулированного биотоплива, полученного из лузги подсолнечника.

Таблица 2

Характеристики пеллет из подсолнечной лузги.

Характеристики	Единица измерения	Значение
Диаметр	мм	8-10
Длина	мм	8-25
Влажность	%	6,8
Летучие вещества:		
- к массе топлива	%	78,9
- к массе горючих веществ топлива	%	87,0
Зольность рабочая	%	2,53
Содержание серы	%	0,24
Теплота сгорания:		
-низшая сухого вещества	кДж/кг	20030
-низшая рабочая	кДж/кг	18500
-высшая рабочая	кДж/кг	19870
Коэффициент перевода в условное топливо	Ед.	0,63

Выводы

1. Одним из путей решения проблемы с утилизацией лузги подсолнечника, получаемой в процессе «горячего» метода производства растительного масла, является получение из лузги пеллет – топливных гранул.
2. Созданный АО «Алиментармаш» комплект оборудования для производства топливных гранул из лузги подсолнечника обеспечивает технологический процесс их производства согласно установленным требованиям к качеству получаемого продукта.

Литература

1. http//crystal.kiev.ua
2. www.almash.md
3. Практикум по дисциплине: Заготовка и переработка сельскохозяйственной продукции и биоотходов. Авторский коллектив под руководством проф. Гаврланда. Чешский университет живых наук в Праге. Кишинев-Прага, 2009.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЁРДОГО БИОТОПЛИВА В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

В.В. Слюсаренко, АО «Алиментармаш», г. Кишинёв

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы создания на АО «Алиментармаш» в течение последних 20 лет технологического оборудования для производства растительных масел из семян масличных культур: от пресса для окончательного отжима масла до минимаслозаводов с использованием в качестве источника энергии для нагрева жидкого теплоносителя (термомасла «Ариан») твердого биологического топлива – лузги семян подсолнечника.
Ключевые слова: пресс, прессование, масло, подсолнечник, лузга, минимаслозавод, термомасло, теплоноситель, биотопливо, жаровня.

UTILIZAREA TEHNOLOGIEI DE PRODUCȚIE A BIOCOMBUSTIBILULUI SOLID DE ULEIURI VEGETALE

V. Sliusarenco, SA "Alimentarmaş", mun. Chişinău

Rezumat: Această lucrare analizează problemele de creare la SA "Alimentarmaş"în ultimii 20 de ani a echipamentelor tehnologice pentru producerea de uleiuri vegetale din semințe oleaginoase: din presa pentru spin final de ulei de la minifabricile de producer a uleiurilor vegetale, folosind ca sursă de energie pentru încălzirea lichidului de răcire (Thermo "arian") a biocombustibilului solid - coji de seminte de floarea soarelui.
Cuvinte–cheie: presa, presare, unt, coji de floarea soarelui, ulei termic, minifabrici, lichid de răcire, biocombustibili, precum şi o tipsie.

SOLID BIOFUEL UTILIZATION IN VEGETABLE OIL PRODUCTION

***V.* Slusarenko, JSC "Alimentarmash", Khisinau**
Abstract. The paper deals with questions of creating at JSC "Alimentarmash "in the last 20 years the technological equipment for the production of vegetable oils from oilseeds: from the press for the final spin to mini oilfactory, using as an energy source for heating the liquid coolant (Thermal oil "Arian") of solid biofuels - husk of sunflower seeds.
Key words: press, pressing, oil, husk of sunflower seeds, minioilfactory, thermal oil, coolant, biofuel,roaster.

Введение.

Одним из направлений деятельности Кишинёвского завода пищевого оборудования (ныне АО «Алиментармаш») [1] , является производство и реализация технологического оборудования для получения и переработки растительных масел из семян масличных культур: рапса, сои, подсолнечника, софлора, кунжута, хлопка, а также из косточек винограда и ядер грецких орехов.

До 1992 года предприятие из оборудования для получения растительных масел выпускало (небольшими сериями) только пресса для окончательного отжима масла марки М8-МШП (рис.1) производительностью 10-12 т/сутки (по семенам подсолнечника) [2].

Техническая характеристика пресса М8-МШП (при переработке семян рапса)

Производительность техническая , тонн/сутки – не менее 7;
Остаточная масличность жмыха (при однократном прессовании), % – не более 12;
Установленная мощность электродвигателя, кВт – 11;

Габаритные размеры, мм, не более – 3380x1150x1370;
Масса, кг, не более – 2250.

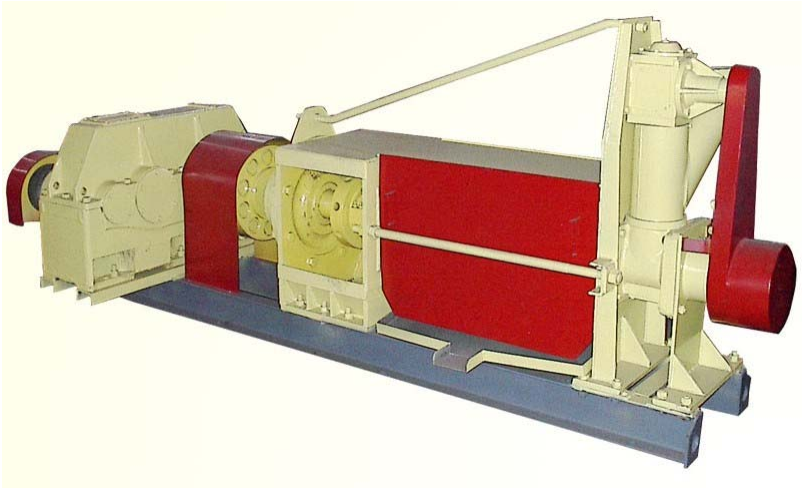

Рис. 1. Пресс для окончательного отжима масла М8-МШП

Материалы и методы

В 1992 голу руководством завода было принято решение освоить весь спектр оборудования для получения растительных масел, т.е. на базе вышеуказанного пресса разработать и изготовить технологическую линию, включающую в себя необходимое оборудование для выполнения следующих технологических операций: очистка и и обрушивание семян подсолнечника, измельчение ядра, влаго-тепловая обработка мятки, прессование мезги и фильтрование растительного масла. Первая такая линия, получившая название М8-МКА, смонтирована и запущена в с. Дороцкая р-на Дубэсарь республики Молдова в 1993. Она состояла из приёмного бункера, элеватора-нории, магнитного сепаратора, семенорушки, вальцевого станка, каскада из четырёх огневых жаровен (которые отапливались лузгой, получаемой после обрушивания семян), прессов (2) для окончательного отжима масла М8-МШП, рамного фильтра для фильтрации полученного масла. Технологическая схема работы линии приведена на рис.2.

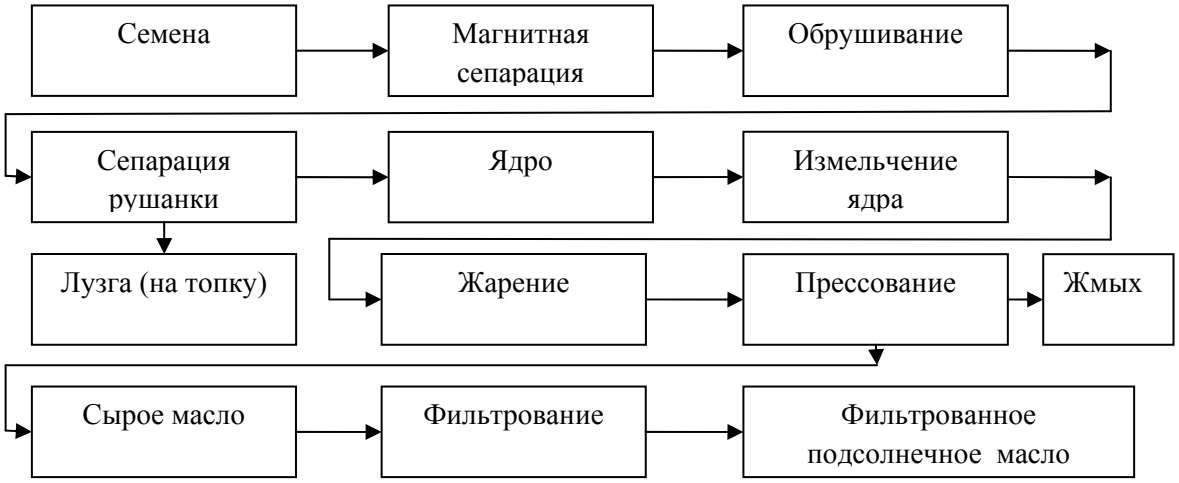

Рис.2. Технологическая схема работы линии производства растительных масел М8-МКА

С тех пор было выпущено несколько десятков таких линий, многие из которых эксплуатируются и по сей день. На одной из линий вместо огневых жаровен были установлены жаровни с электроподогревом. Техническая характеристика линии приведена в таблице 1.

Таблица 1

Техническая характеристика комплекта оборудования для производства растительного масла М8-МКА [2]

Наименование показателя	Единица измерения	Значение величины
Производительность	кг/ч (т/сутки)	416-625 (10-15)
Установленная мощность	кВт	55-70
Расход воды(Р=0,2-0,3 МПа)	$м^3$/ч	0,3
Потребление электроэнергии	кВт/ч	Не более 50
Остаточная масличность жмыха	%	До 7
Занимаемая площадь	$м^2$	Не более 180
Масса	кг	27 000

Недостатком огневых жаровен, как было установлено в процессе эксплуатации, является необходимость тщательного контроля над процессом нагрева (горения лузги), необходимость постоянного заполнения топок лузгой, что предполагает большие затраты ручного труда. Качество получаемого масла в основном зависит от квалификации истопника (зачастую получаемое масло имеет тёмный цвет с характерным привкусом горелых семян, что свидетельствует о чрезмерном нагреве жаровен).

В 1993 году параллельно с линией М8-МКА начался выпуск принципиально новых линий (ныне она называется комплект М8-МКИ, рис.3, [2]), в которых исключалось обрушивание семян подсолнечника, а семена после очистки на магнитном и барабанном сепараторах поступали в пресс предварительного отжима масла ПШМ-250 (ныне они заменены прессами М8-МПБ, [2]), где измельчались и нагревались до температуры +80-90˚С. Затем нагретая измельчённая масса поступала в пресс окончательного отжима масла М8-МШП.

Отжатое на линии масло (приближенное по качеству к маслам «холодного отжима») фильтровалось на рамных фильтр-прессах. На рис.4 приведена технологическая схема линии М8-МКИ, а в таблице 2 − её техническая характеристика.

В этом же году был изготовлен опытный образец барабанного вакуум-фильтра для фильтрования растительных масел через слой фильтровального перлитного порошка при помощи вакуумного водокольцевого насоса типа ВВН. В дальнейшем начался серийный выпуск фильтров, получивших название - комплекс вакуумной фильтрации М8-КФМ (рис.5). Хотя линии М8-МКИ в начале их выпуска пользовались большим спросом благодаря простоте конструкции и высокой монтажной готовности (ввод в эксплуатацию производился практически в день доставки на место эксплуатации), в последние годы спрос на них резко упал.

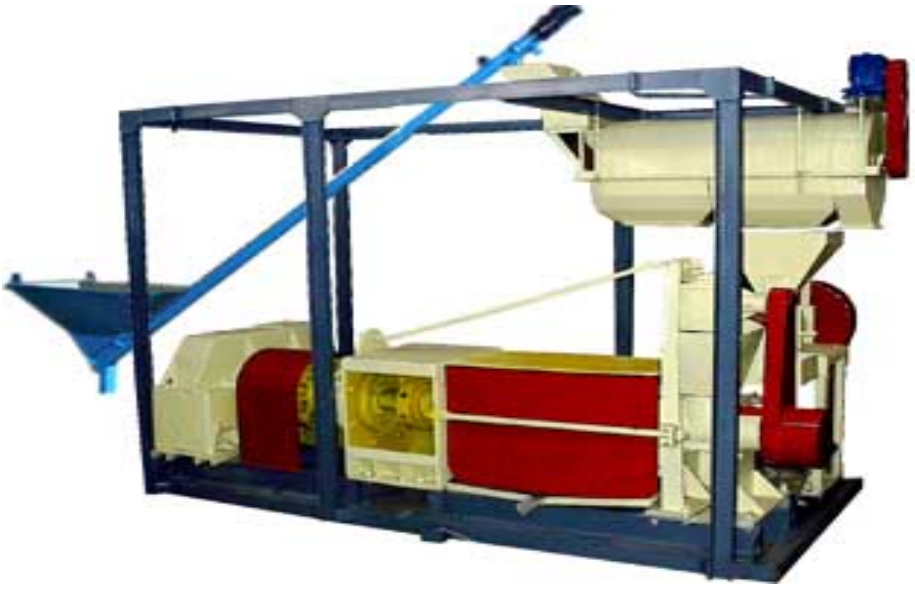

Рис. 3. Комплект оборудования для производства растительных масел М8-МКИ

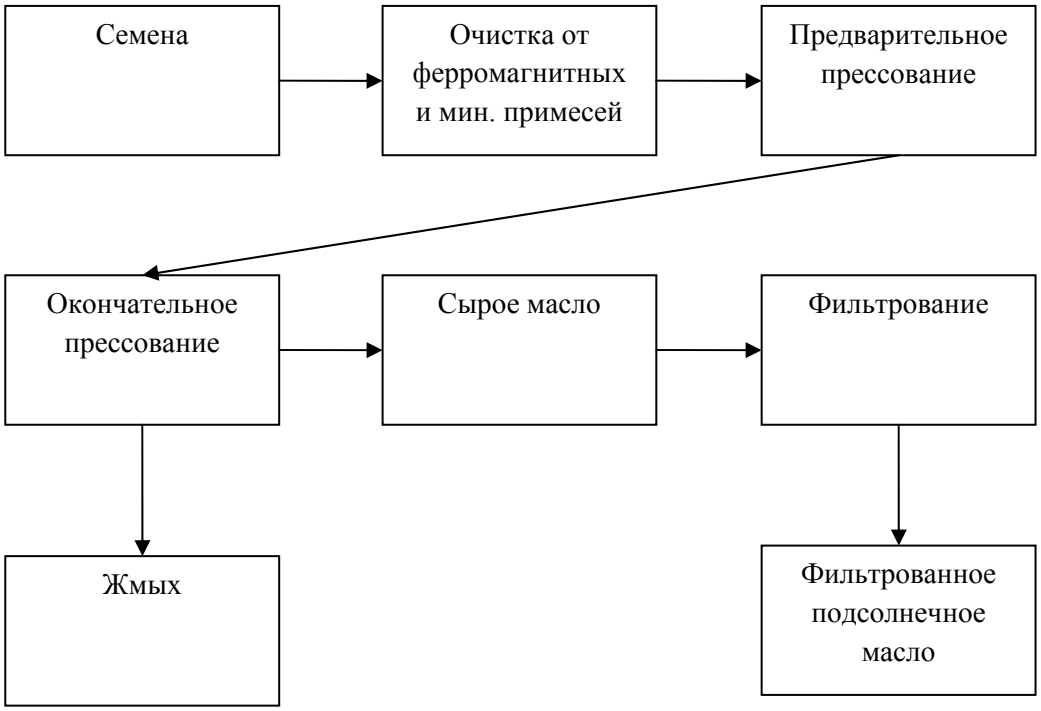

Рис.4. Технологическая схема работы линии производства растительных масел М8-МКИ

Основным недостатком линий М8-МКИ является сравнительно невысокий процент выхода масла (остаточная масличность жмыха в пределах 11-12%). Это вызвано тем, что переработка семян подсолнечника велась без их обрушивания, а лузга, как известно, является пористым материалом (впитывает в себя масло) и, кроме того, увеличивает содержание восков в масле.

К негативным сторонам переработки семян подсолнечника без отделения лузги также можно отнести:

1) снижение производительности оборудования;

2) более быстрый износ рабочих органов оборудования (за счёт абразивности лузги);

3) снижение массовой доли протеинов в жмыхе, т.е. снижение его ценности как белкосодержащего ингредиента при производстве кормов;

4) переход вместе с восками в масло переходят пестицидов, красителей, продуктов окисления масла и т.д.

Таблица 2

Техническая характеристика комплекта оборудования для производства растительного масла М8-МКИ [2]

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Производительность (по подсолнечнику)	кг/ч (т/сутки)	Не менее 300 (не менее 7)
Количество оставшегося в жмыхе масла (в перерасчёте на абсолютно сухой продукт)	%	10-15
Установленная мощность	кВт	32,8
Занимаемая площадь	$м^2$	10
Габаритные размеры	мм	3300x3000x2800
Масса	кг	5400

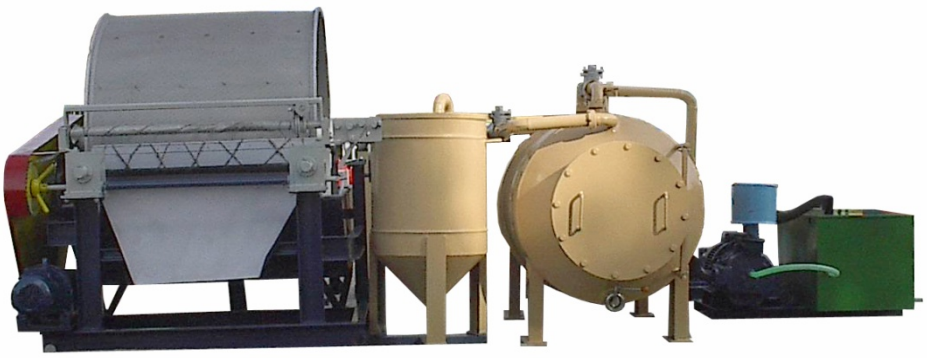

Рис. 5. Комплекс вакуумной фильтрации растительных масел М8-КФМ

В 2004 году АО «Алиментармаш» получило заказ от совместного молдо-германского предприятия «Bio Componj Raps» SRL на разработку проекта комбината по переработке масличных культур в г. Липкань р-на Бричень, предполагающего разработку технологии переработки семян рапса с целью использования получаемого рапсового масла в качестве биотоплива. Также, согласно разработанному проекту, была произведена поставка необходимого технологического оборудования – линии по переработке семян рапса методом «холодного» прессования с подогревом мятки и его монтаж.

В 2006 году данное производство (I очередь – 50 т/сутки по семенам) было сдано в эксплуатацию. Линия получила название М8-МКИ (рапс), переработка семян велась по следующей технологической схеме (рис. 6):

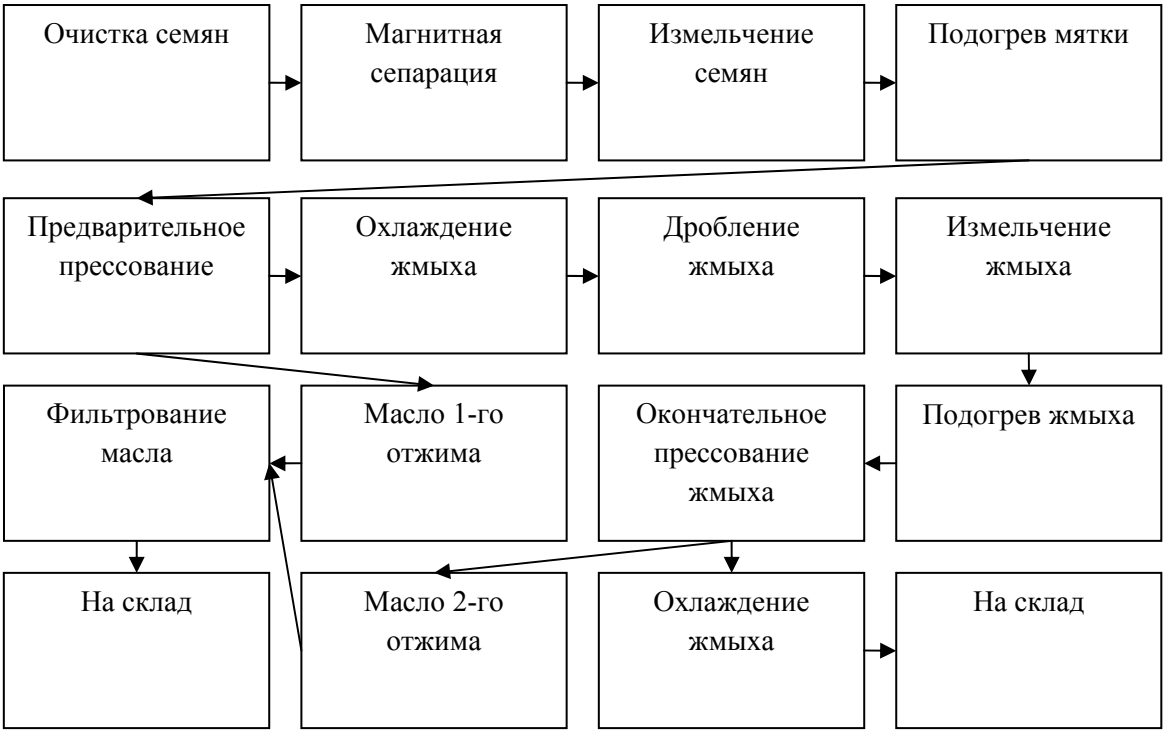

Рис. 6.Технологическая схема работы линии производства рапсового масла М8-МКИ (рапс)

Общий вид линии двукратного «холодного» прессования семян рапса М8-МКИ (рапс) с подогревом мятки приведён на рис.7, техническая характеристика – в таблице 3.

Таблица 3

Техническая характеристика линии двукратного «холодного» прессования рапса М8-МКИ (рапс) с подогревом мятки

Наименование показателей	Единица измерения	Значение величины
Производительность (по семенам рапса)	т/сутки	10-12
Количество оставшегося в жмыхе масла: после первого прессования после второго прессования	%	12-13 9-11
Установленная мощность, в т.ч. ТЭНов	кВт (макс) кВт	До 80 (24)
Занимаемая площадь	кв.м	28
Масса, не более	кг	18000

Были попытки в 2007 году данную схему применить для переработки семян подсолнечника (Херсонская обл., пгт. Нововоронцовка, Украина), но, как показала эксплуатация входящих в линию транспортёров с подогревом М8-3ВТМЗ, поддерживать требуемую температуру нагрева (+85-90˚С) не удавалось: происходило подгорание мятки, а при снижении температуры не удавалось получить должный отжим (масличность жмыха оставалась на уровне 11-12%).

Рис. 7. Линия производства рапсового масла М8-МКИ (рапс)

Результаты

В 2008 году, вследствие проведенных маркетинговых исследований, посещения ряда промышленных предприятий, производящих оборудование для масложировой промышленности, а также маслоцехов, где это оборудование эксплуатируется, было установлено, что в качестве аппарата для проведения влаго-термической обработки возможно использовать чанные жаровни, работающие на жидком теплоносителе – термомасле «Ариан».

В качестве термогенератора для нагрева масла возможно применить специальные печи, использующие в качестве горючего отходы переработки семян подсолнечника – подсолнечную лузгу.

В этом же году специалистами АО была разработана конструкторская документация на жаровни чанные марок М8-3ЖЧ и М8-6ЖЧ (вторая цифра указывает на количество чанов в жаровне), а также на теплогенератор – печь нагрева М8-ПН.

На базе вышеуказанных чанных жаровен М8-ЖЧ и теплогенераторов – печей нагрева М8-ПН в 2009 году была смонтирована линия по производству подсолнечного масла методом «горячего» прессования производительностью 20 т/сутки (по семенам подсолнечника) в г. Унгень, а весной 2010 года – аналогичная линия на 10 т/сутки – в г. Бэлць.

В конце июля 2010 года четыре фуры с оборудованием линии на 20 т/сутки (по семенам) отправились в г. Коканд (Узбекистан), а в начале сентября оборудование линии на 10 т/сутки было отгружено в г. Кзыл-Орду (Казахстан). Бригады

специалистов АО вылетели в эти республики для проведения монтажа, пуско – наладочных работ и запуска в эксплуатацию указанных линий.

Проведенные испытания и пробная эксплуатация линий в гг. Унгень и Бэлць показали их высокую эксплуатационную надёжность и хорошие технологические показатели: остаточная масличность жмыха при двукратном «горячем» прессовании не превышает 7%.

Перед отправкой в Узбекистан оборудование было сертифицировано в НИСМе Республики Молдова.

Схема типового минимаслозавода по переработке семян подсолнечника методом двукратного «горячего прессования» с использованием в качестве теплоносителя для нагрева чанных жаровен М8-ЖЧ термомасла марки «Ариан», нагреваемого в печах нагрева М8-ПН путём сжигания твёрдого биотоплива – лузги подсолнечника, приведена на рисунке 8.

Технологическая линия состоит из бункера приёмного 1, элеватора-нории 3, комплекса очистки семян подсолнечника 2, шнекового транспортёра 4, агрегата размольно-вальцевого 5, комбинированного элеватора-нории 7, жаровни шестичанной 6, пресса предварительного отжима масла ($n_{об/эл}$= 1000мин$^{-1}$) 8, маслосборников для сбора масла 20, электронасосного шестерёнчатого агрегата 21, транспортёра для окончательной выгрузки жмыха 9.

Теплогенератором служит печь для нагрева 10, состоящая из самой печи, дымовой трубы, системы трубопроводов с термомаслом, перекачивающего высокотемпературного герметического электронасоса с водяной системой охлаждения, расширительного бачка.

В комплект оборудования входят также комплекс вакуумной фильтрации М8-КФМ, комплект оборудования для рафинирования масла М8-ЛРМ3. Для сбора и хранения масла предусмотрены три ёмкости (поз. 22), оборудованные шестерёнчатыми электронасосами.

Для управления оборудованием в составе комплекта предусмотрены шкафы управления. Для розлива и укупорки масла в ПЭТ-бутылки и полиэтиленовые канистры имеется установка розлива и укупорки 15.

Линия работает следующим образом. Семена подсолнечника, соответствующие требованиям ГОСТ 22391-89, засыпаются в приёмный бункер 1. При помощи элеватора-нории 3 по лоткам 30 и 28 семена поступают на комплекс очистки семян 2, где производится их обрушивание и удаление части лузги в циклон вентиляционной установки для питания печи нагрева 10.

Часть лузги вместе с ядром при помощи шнекового транспортёра 4 поступает в агрегат размольно-вальцевый 5, где производится дробление ядра и части лузги на частицы (проход через 1-миллиметровое сито не менее 70%). Измельчённая масса, называемая мяткой, при помощи элеватора-нории 7 поступает в 1-ю жаровню, где происходит её нагрев до +80-90˚С и высушивание до влажности 5%. Затем мезга поступает в 1-й пресс М8-МШП 8, предварительного отжима масла, где происходит отжим основного количества масла. Отжатое масло поступает в установленные рядом с прессами 8 маслосборники 20 и при помощи шестеренчатых насосов 21 перекачивается в ёмкости для сбора масла 22.

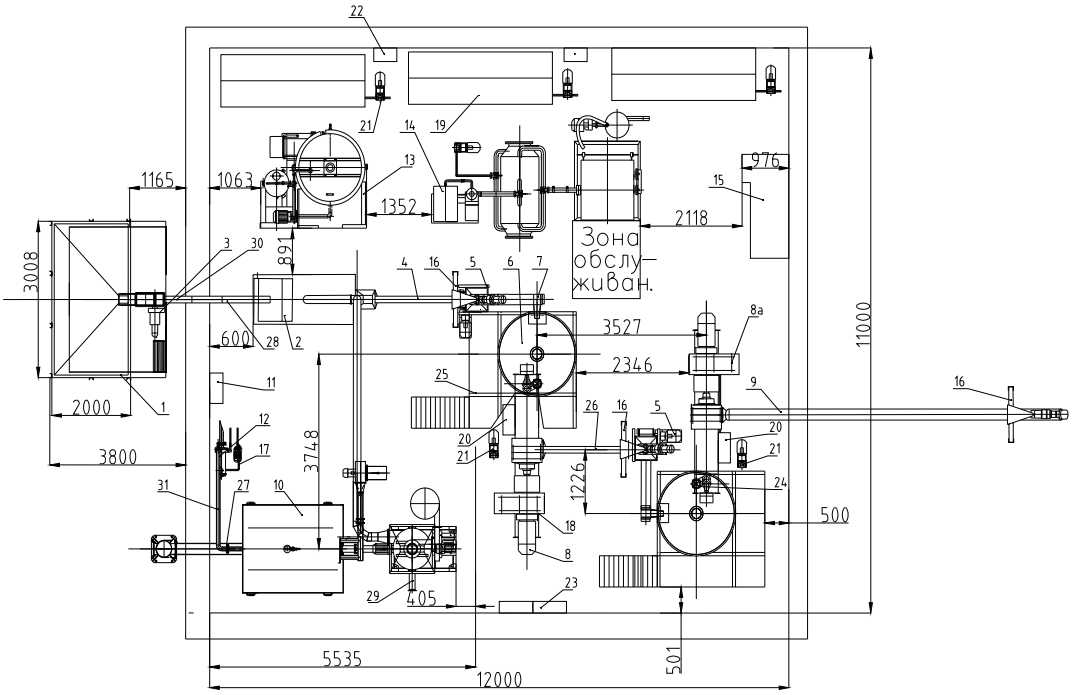

Рис.8. Схема типового минимаслозавода для производства растительного масла из семян подсолнечника с использованием в качестве теплоносителя термомасла «Ариан»

Получаемый после отжима масла жмых шнековым транспортёром 26 подаётся на агрегат размольно-вальцевый 5, где измельчается и при помощи элеватора-нории 7 поступает в трёхчанные жаровни 6. В жаровне происходит нагрев и доведение влажности жмыха до 15%; подготовленный таким образом жмых подвергается отжиму в прессе окончательного отжима 8, отжатое масло поступает в маслосборник 20 и оттуда насосом 21 перекачивается в ёмкости 22. Жмых из-под пресса 8 шнековым транспортёром 9 подаётся на место складирования и охлаждения.

Таким образом, технологическая схема получения растительного масла методом «горячего прессования» имеет вид, показанный на рис. 9.

Техническая характеристика комплектного минимаслозавода производительностью 20 т/сутки (по семенам) приведена в таблице 4.

Таблица 4

Техническая характеристика комплектного минимаслозавода производительностью 20 т/сутки (по семенам)

Наименование показателя	Единица измерения	Значение величины
1. Производительность (по семенам подсолнечника	т/сутки	20
2. Остаточная масличность жмыха	%	до 7
3. Установленная мощность	кВт	168,3
4. Занимаемая площадь	$м^2$	288
Масса, не более	кг	44800

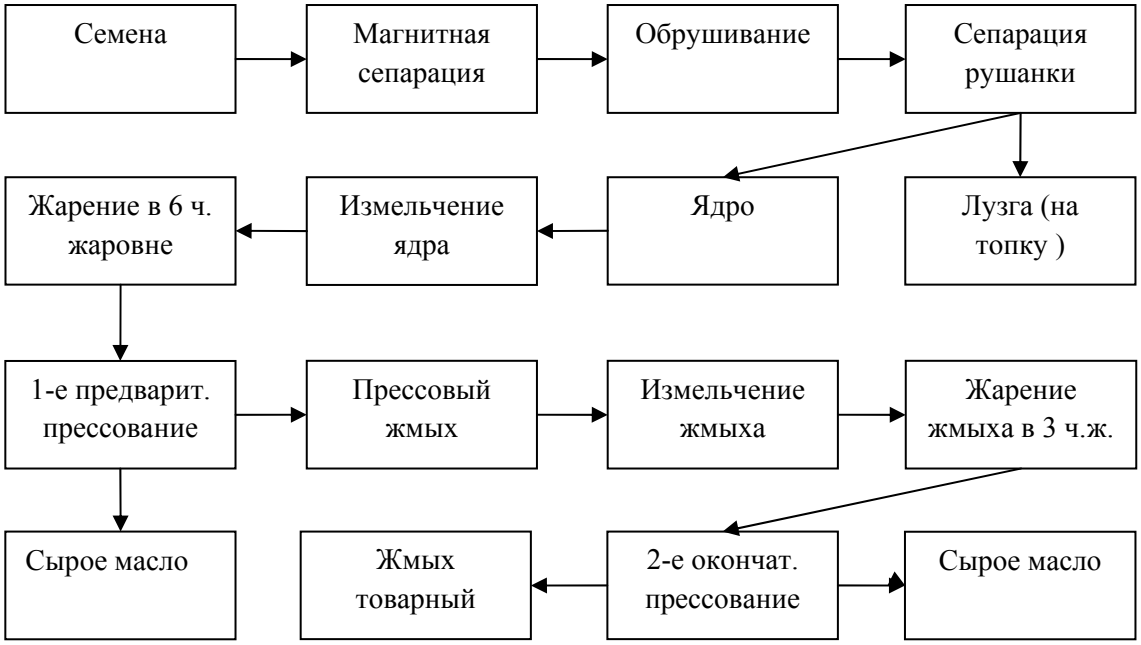

Рис. 9. Технологическая схема получения масла методом «горячего» прессования

Выводы и рекомендации

Таким образом, минимаслозаводы для производства растительного масла методом «горячего» прессования (10-20 т/сутки по семенам) в настоящее время являются экономически выгодными с точки зрения энергозатрат.

Кроме того, имея возможность регулировать температуру нагрева жаровен (через термомасло), можно на них производить и масло «холодного» прессования, наиболее пригодное для применения в пищевых целях, а также как сырьё для дальнейшего производства из него биологического топлива – биодизеля.

Излишек лузги, получаемый после её использования для нагрева термомасла (как твёрдое биотопливо), можно переработать в топливные гранулы (пеллеты) или брикеты, что позволит уменьшить её объёмы и увеличить сроки хранения.

Литература

1.http//:www.almash.md.
2.Каталог изделий АО «Алиментармаш», г. Кишинёв, 2006г.
3.Прохорова Л.Т., Марков В.Н. О «пользе» технологии переработки семян подсолнечника без отделения лузги. Масложировая промышленность, №2, 2005 г.,с.16-17.
4.Лисицин А.Н., Марков В.Н. Современный технологический процесс для получения качественных пищевых масел и белковых продуктов для кормовых целей. Материалы научно-практического семинара «Масложировая отрасль – предприятиям птицеперерабатывающей и комбикормовой промышленности», 16 декабря 2004 г., Санкт-Петербург, с.17-22.

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