НЕСТАНДАРТНЫЕ РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ШЕСТИФАЗНЫХ АСИММЕТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С СИНХРОННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В. И. Олещук, Р. В. Прудяк, А. С. Сизов
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. Метод синхронной векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) модернизирован и адаптирован применительно к использованию в шестифазных преобразовательных системах асимметричного типа. Показано, что использование указанного метода обеспечивает непрерывную синхронизацию формы фазного выходного напряжения в шестифазных системах на всем диапазоне регулирования как при стандартных, так и при нестандартных режимах функционирования.
Ключевые слова: асимметричный шестифазный электропривод, векторная модуляция, синхронизация кривой фазного выходного напряжения.

REGIME NON-STANDARTE DE FUNCȚIONARE A SISTEMELOR DE CONVERTIZARE ŞASE-FAZĂ CU MODULARE SINCRONIZATĂ

V. Olesciuk, R. Prudeak, A. Sizov
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. Metoda de modulare sincronizată vectorială a fost modernizată si adaptată pentru utilizarea în sistemele de convertizare cu şase faze de tip asimetrice. Este demonstrat că utilizarea acestei metode oferă sincronizarea continuă curvele de tensiune de fază la întreag diapazonul de control la fel ca în standard, şi non-standart moduri de operare.
Cuvinte-cheie: acționări electrice şase-faze asimetrice, modularea vectorială, sincronizare a curbei de tensiune de ieşire de faze.

NON-STANDARD CONTROL MODES OF ASYMMETRICAL SIX-PHASE POWER CONVERSION SYSTEMS WITH SYNCHRONIZED PWM

V. Oleschuk, R. Prudyak, A. Sizov
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. Novel method of synchronized space-vector pulsewidth modulation (PWM) has been developed and disseminated for control of asymmetrical six-phase systems. It has been shown, that application of the proposed method provides continuous synchronization of the output voltage of six-phase converters during the whole control range for both standard and non-standard control modes of power conversion systems.
Keywords: six-phase motor drive, space-vector modulation, synchronization of the phase output voltage waveforms.

Введение

Многофазные преобразователи и электроприводы переменного тока являются на протяжении последних лет объектом усиливающегося интереса исследователей из-за ряда их преимуществ по сравнению с обычными (стандартными) трехфазными регулируемыми системами. В частности, многофазные регулируемые приводы переменного тока характеризуются уменьшенными пульсациями вращающего момента, сниженными энергопотерями в роторе электродвигателей, а также повышенной надежностью на системном уровне [1],[2]. В настоящее время среди различных модификаций многофазных систем наибольший практический интерес находят шестифазные преобразовательные системы [1].

В частности, шестифазный регулируемый электропривод, базирующийся на шестифазных инверторах напряжения, является одной из перспективных топологий многофазных приводов для использования в тяговом приводе судов, локомотивов, электромобилей, и т.д. Методы и способы векторного управления и модуляции для

шестифазных систем интенсивно развитаются в последнее время. В частности, шестифазные инверторы характеризуются дополнительными степенями свободы для управления по сравнению с обычными трехфазными системами. В то же время известно, что все варианты стандартной векторной ШИМ, модифицированной для использования в шестифазных инверторах, базируются на асинхронном принципе, что приводит к появлению субгармоник основной частоты в спектре выходного напряжения преобразователей, которые являются чрезвычайно нежелательными в электроприводах повышенной мощности, работающих при пониженных частотах переключений силовых ключей [3],[4].

Нестандартные режимы функционирования шестифазных асимметричных систем с синхронной модуляцией

Шестифазные асинхронные двигатели и шестифазные системы электропривода, регулируемые при помощи шестифазных инверторов напряжения, являются в последнее время объектом усиливающегося интереса из-за ряда их преимуществ по сравнению с обычными трехфазными электроприводами переменного тока [1],[2].

Тяговые электроприводы повышенной мощности являются одними из наиболее перспективных областей использования шестифазных систем преобразования параметров электрической энергии [2]. В частности, на рис. 1 представлена базовая топология электропривода электромобиля на базе шестифазного асинхронного электродвигателя, регулируемого при помощи двух трехфазных инверторов напряжения, связанных соответственно с двумя автономными источниками электропитания постоянного тока: с аккумуляторной батареей, выходное напряжение которой равно V_{dc1}, и с системой постоянного тока на базе топливных элементов с выходным напряжением V_{dc2} [2]. Асимметричный шестифазный асинхронный электродвигатель имеет в этом случае два набора трехфазных обмоток, пространственно смещенных друг относительно друга на 30 электрических градусов с изолированными нейтральными точками (рис. 2) [2].

Известно, что для преобразовательных систем повышенной мощности, характеризующихся относительно низкой частотой переключения силовых ключей, в том числе для большинства электроприводов транспортных средств, для устранения нежелательных субгармоник в спектрах выходных напряжения и тока преобразователей необходимо осуществлять непрерывную синхронизацию кривых выходного напряжения преобразователей [3],[4]. В связи с этим представляется целесообразной дальнейшая диссеминация метода синхронной векторной модуляции, разработанного первоначально для трехфазных преобразовательных систем [5], применительно к управлению шестифазными асимметричными системами с преимущественно нестандартными условиями функционирования.

В частности, для формирования симметричных выходных сигналов в шестифазной системе целесообразно осуществлять синхронизацию выходных напряжений каждого из трехфазных инверторов, входящих в состав шестифазной системы. На рис. 3 - 4 представлены последовательности состояний ключей, а также соответствующие полярные и линейное напряжения трехфазного инвертора на интервале 0^0-90^0 для непрерывной (рис. 3) и прерывистой (рис. 4) версий векторной ШИМ, наиболее часто использующихся в системах регулируемого электропривода [5].

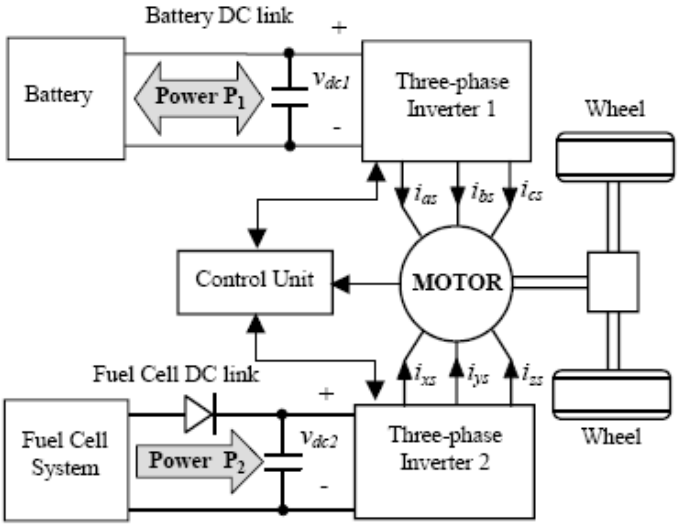

Рис. 1. Шестифазная система электропривода электромобиля на основе асимметричного шестифазного электродвигателя и двух автономных источников электропитания [2]

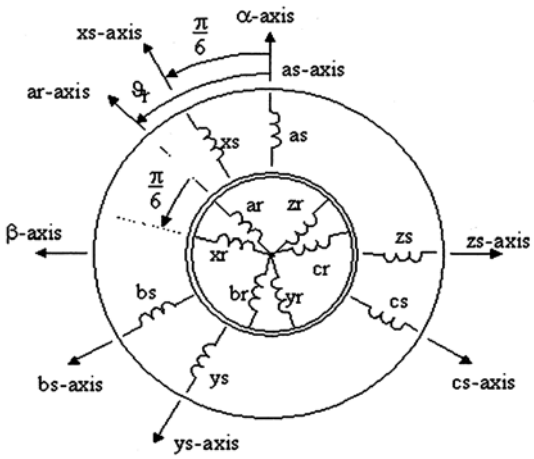

Рис. 2. Асимметричный асинхронный шестифазный электродвигатель [2]

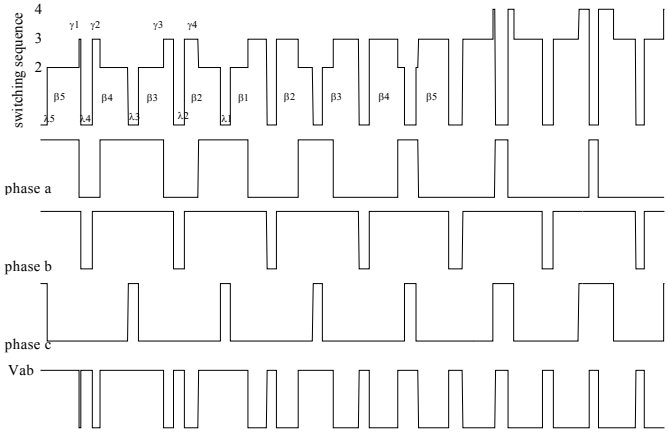

Рис. 3. Последовательность переключения ключей, полярные напряжения фаз ***a – c*** и линейное напряжение V_{ab} на четверти периода выходной частоты трехфазного инвертора с непрерывной синхронной ШИМ

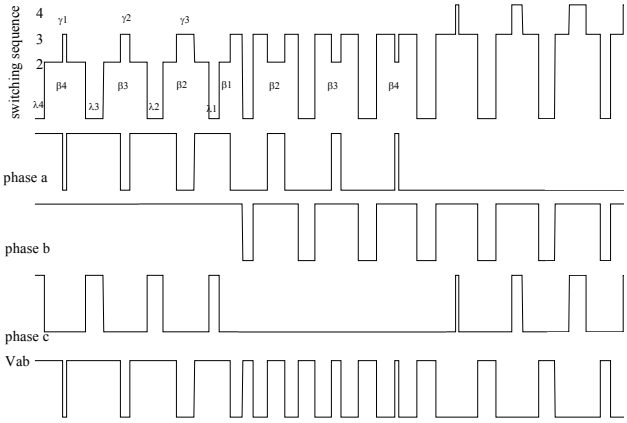

Рис. 4. Последовательность переключения ключей, полярные напряжения фаз ***a – c*** и линейное напряжение V_{ab} на четверти периода выходной частоты трехфазного инвертора с прерывистой синхронной ШИМ

В частности, на рис. 3-4 продолжительность сигналов βj характеризует общую длительность включенного состояния ключей в течение коммутационного интервала с длительностью τ, управляющие сигналы γ_k формируются при этом на границах (рис. 3) или в центрах (рис. 4) соответствующих β-сигналов. Длительности пауз λ_k характеризует продолжительность нулевых состояний вентилей силовой схемы.

Специальные сигналы λ' (λ_5 на рис. 3), вместе с соседними β'' (β_5 на рис. 3) формируются в тактовых точках (0^0, 60^0, 120^0...) периода выходной кривой инверторов. Продолжительности указанных сигналов плавно уменьшаются до близких к нулю значений на граничных частотах F_i, обеспечивая непрерывное синхронное регулирование выходного напряжения при плавном безударном изменении числа импульсов в полуволне выходной кривой. На рис. 5, на котором приведены последовательности состояния ключей и граничный участок периода линейного выходного напряжения V_{ab} инвертора с непрерывной синхронной ШИМ, указанный процесс управления (между двумя граничными частотами, при повышении выходной частоты инвертора) иллюстрируется более детально.

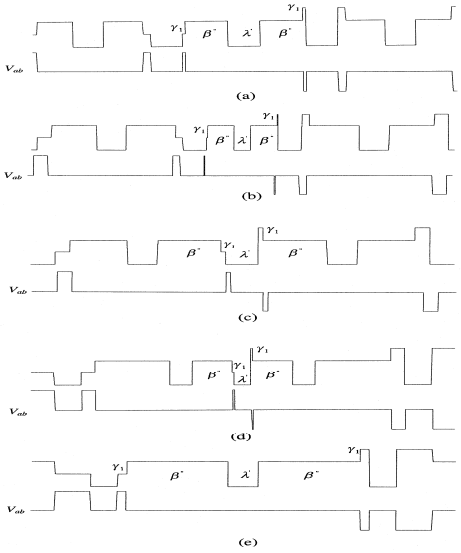

Рис. 5. Последовательность переключения ключей и линейное выходное напряжение на границах полуволны выходного напряжения инвертора с непрерывной ШИМ

Важным параметром метода синхронной ШИМ является продолжительность β_1-сигнала, формируемого в центрах 60-градусных тактовых интервалов, см.. рис. 3 и 4). В частности, для стандартного скалярного *V/F=const* режима управления данная продолжительность определяется как $\beta_1 = 1.1m\tau$, где m – индекс (коэффициент) модуляции [5]. При этом в системе обеспечивается линейное регулирование первой гармоники выходного напряжения инвертора вплоть до зоны сверхмодуляции.

Для режимов управления системой электропривода, отличных от стандартного режима, опорные функциональные соотношения должны быть скорректированы соответствующим образом. В частности, в табл. 1 представлены базовые параметры управления для трех основных режимов регулирования системы электропривода, включая стандартный скалярный режим линейного регулирования *V/F=const*, а также два нестандартных режима управления $V^2/F=const$ и $V^{3/2}/F=const$. Последние два режима характеризуются нелинейными зависимостями между выходными напряжением и частотой, и могут быть использованы для регулирования систем асинхронного электропривода с некоторыми специальными типами нагрузок [6]. Табл. 1 включает также соответствующие относительные значения двух пороговых частот сверхмодуляции F_{ov1} и F_{ov2} [5], которые являются важными параметрами общего алгоритма управления системой в зоне сверхмодуляции для шестифазных систем с равными напряжениями двух источников постоянного тока $V_{dc1} = V_{dc2}$.

На рис. 6 представлены зависимости выходного напряжения от выходной частоты (при максимальной выходной частоте $F_m=50\ Hz$) для трехфазного инвертора с тремя режимами управления, представленными в табл. 3. Возможна также реализация различных промежуточных режимов управления, характеризуемых другими функциональными зависимостями для определения продолжительности β_1-сигналов. В качестве примера пунктиром на рис. 6 показана нелинейная зависимость изменения величины выходного напряжения от частоты по закону $V^{4/3}/F=const$ (в этом случае $\beta_1 = 1.1\sqrt[4]{m^3}\tau$).

Таблица 1. Базовые параметры режима управления

Режим управления	β_1	F_{ov1}	F_{ov2}
V/F=const	$1.1m\tau$	$0.907F_m$	$0.952F_m$
$V^2/F=const$	$1.1\sqrt{m}\tau$	$0.823F_m$	$0.907F_m$
$V^{3/2}/F=const$	$1.1\sqrt[3]{m^2}\tau$.	$0.866F_m$	$0.931F_m$

Управление несимметричными шестифазными преобразовательными системами базируется на 30-градусном фазовом сдвиге управляющих и выходных сигналов двух инверторных групп [1]. В соответствии с теорией векторной декомпозиции, основное шестимерное векторное пространство (*as, bs, cs, xs, ys, zs*) асимметричной шестифазной системы двумя изолированными нейтральными точками может быть преобразовано в два ортогональных двухмерных пространства (*sa, sb*) и (*m1, m2*) [7]. Базовые составляющие (компоненты) напряжения V_{sa}, V_{sb}, V_{m1} и V_{m2} в этих подпространствах, а также фазовые напряжения системы V_{as} и V_{xs} определяются при этом как [2]:

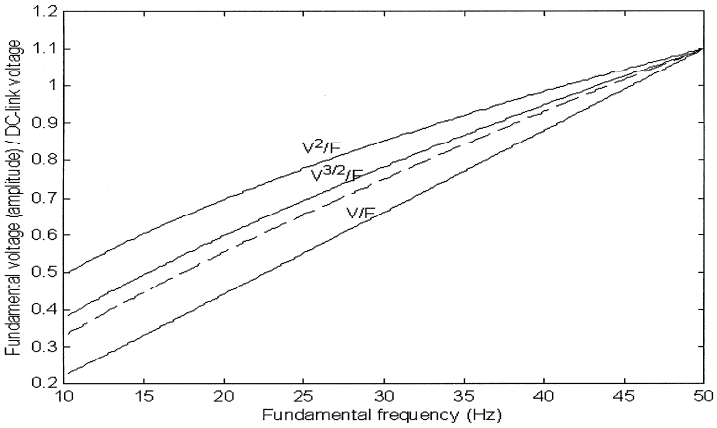

Рис. 6. Зависимость выходного напряжения от выходной частоты инвертора для линейного и нелинейных режимов управления

$$V_{sa}=0.333(V_a–0.5V_b-0.5V_c+0.866V_x –0.866V_y) \quad (1)$$

$$V_{sb}=0.333(0.866V_b -0.866V_c +0.5V_x +0.5V_y –V_z) \quad (2)$$

$$V_{m1}=0.333(V_a –0.5V_b -0.5V_c -0.866V_x +0.866V_y) \quad (3)$$

$$V_{m2} =0.333(-0.866V_b+0.866V_c +0.5V_x + 0.5V_y– V_z) \quad (4)$$

$$V_{as}=V_{sa} +V_{m1}=V_a -0.333(V_a + V_b + V_c) \quad (5)$$

$$V_{xs}=V_{sb}+V_{m2}=V_x - 0.333(V_x + V_y + V_z), \quad (6)$$

где V_a, V_b, V_c, V_x, V_y, V_z – соответствующие полярные напряжения шестифазной системы.

В этом случае компоненты V_{sa} и V_{sb}, производящие полезную вращающуюся МДС гармонику напряжения k-го порядка ($k = 6m \pm 1$, $m=1,2,3..$), являются полезными компонентами. В тоже время компоненты V_{m1} и V_{m2}, генерирующие гармоники порядка $k = 6m \pm 1$ ($m=1,2,3..$), вызывающие потери в системе, является нежелательными компонентами напряжения [7].

На рис. 7 и 8 представлены основные формы выходного напряжения шестифазного электропривода электромобиля с двумя источниками постоянного тока с различными напряжениями ($V_{dc1} = 0.5V_{dc2}$) при нестандартном режиме управления по закону $V^2/F=const$ на периоде выходной частоты. Для обеспечения баланса мощностей между источниками постоянного тока в данном случае выполняется соответствующая зависимость между индексами модуляции двух инверторов: $m_1V^2_{dc1}=m_2V^2_{dc2}$. Кривые на рис. 7 показывают базовые напряжения для системы с непрерывной синхронной ШИМ, а кривые на рис. 8 представляют базовые напряжения для системы с прерывистой синхронной ШИМ с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей. Средняя частота переключений вентилей и основная выходная частота системы равны соответственно *1 kHz* и *38 Hz*.

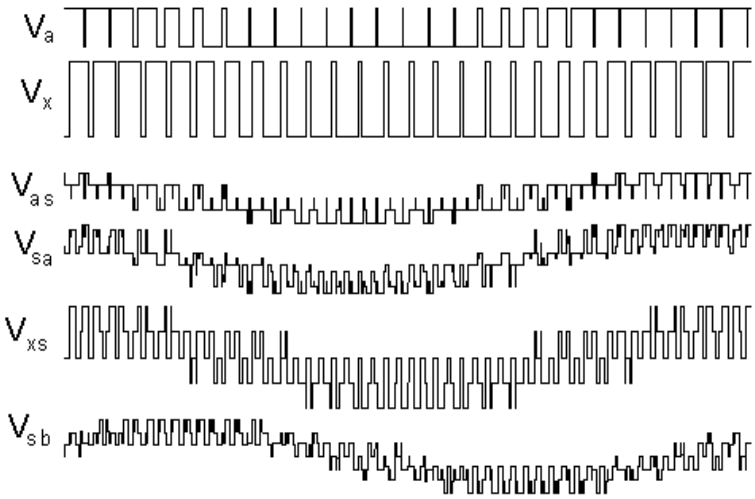

Рис. 7. Полярные V_a и V_x, и фазные V_{as} и V_{xs} напряжения, а также полезные составляющие V_{sa} и V_{sb} напряжения в шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ ($F=38Hz$, $V_{dc1}=0.5V_{dc2}$)

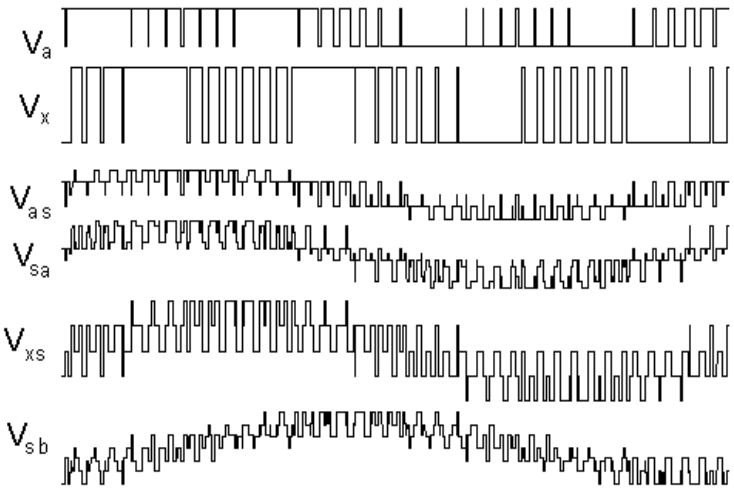

Рис. 8. Полярные V_a и V_x, фазные V_{as} и V_{xs}, а также полезные составляющие V_{sa} и V_{sb} напряжения в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=38Hz$, $V_{dc1}=0.5V_{dc2}$)

На рис. 9 – 14 представлены спектральные характеристики напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} асимметричной шестифазной системы с непрерывной (рис. 9, 11, 13) и прерывистой (рис. 10, 12, 14) разновидностями синхронной модуляцией, функционирующей при стандартном $V/F=const$ режиме управления (рис. 9–10), а также при нелинейном $V^{3/2}/F=const$ режиме управления (рис. 11–12), и при нелинейном $V^2/F=const$ режиме управления (рис. 13–14). При этом, в частности, в системе с нестандартным режимом управления по закону $V^{3/2}/F=const$, для достижения баланса мощностей между двумя источниками электропитания должна быть обеспечена соответствующая зависимость между индексами модуляции двух инверторов: $m_1V^{3/2}_{dc1}=m_2V^{3/2}_{dc2}$.

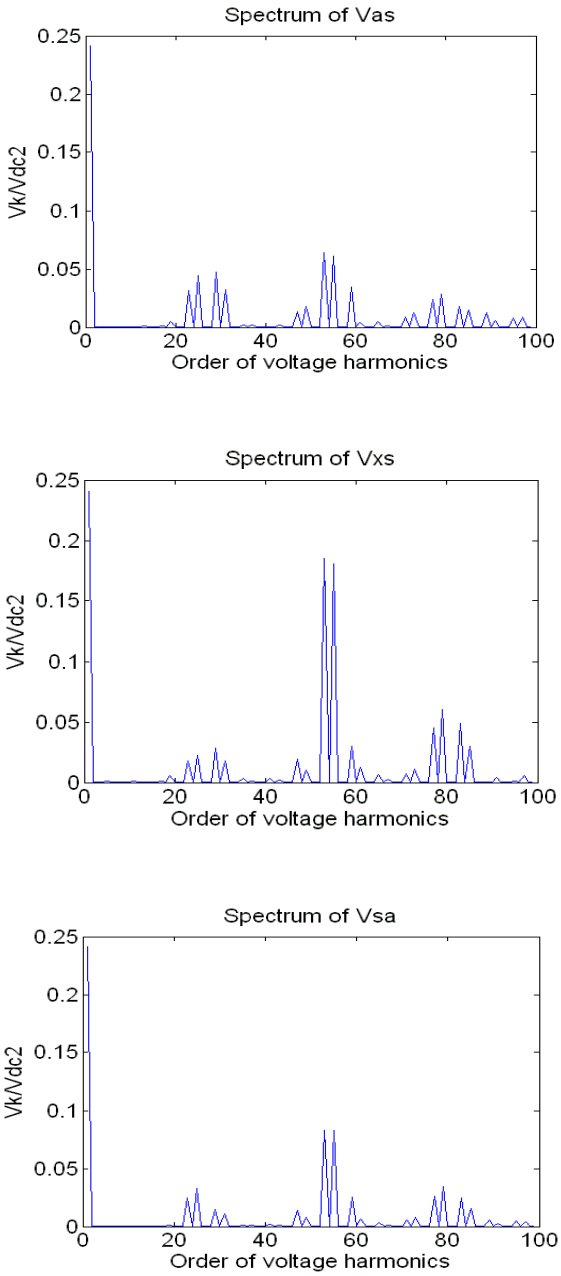

Рис. 9. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} в асимметричной шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ при стандартном режиме управления (*V/F=const)*

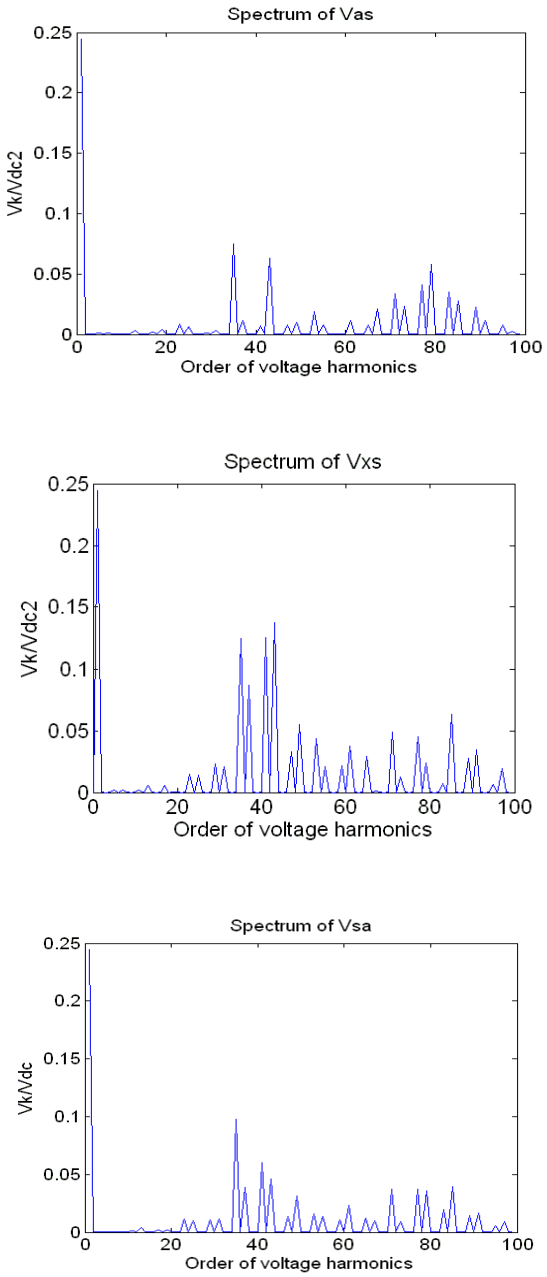

Рис. 10. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} в асимметричной шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ при стандартном режиме управления (*V/F=const)*

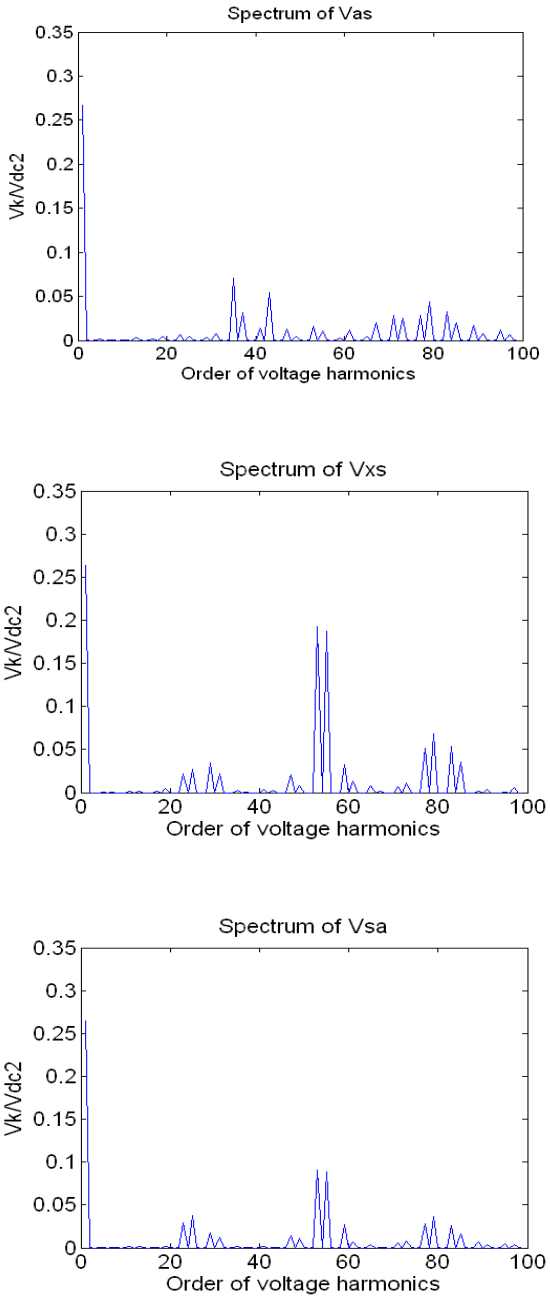

Рис. 11. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} в асимметричной шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ при нелинейном режиме управления ($V^{3/2}/F=const$)

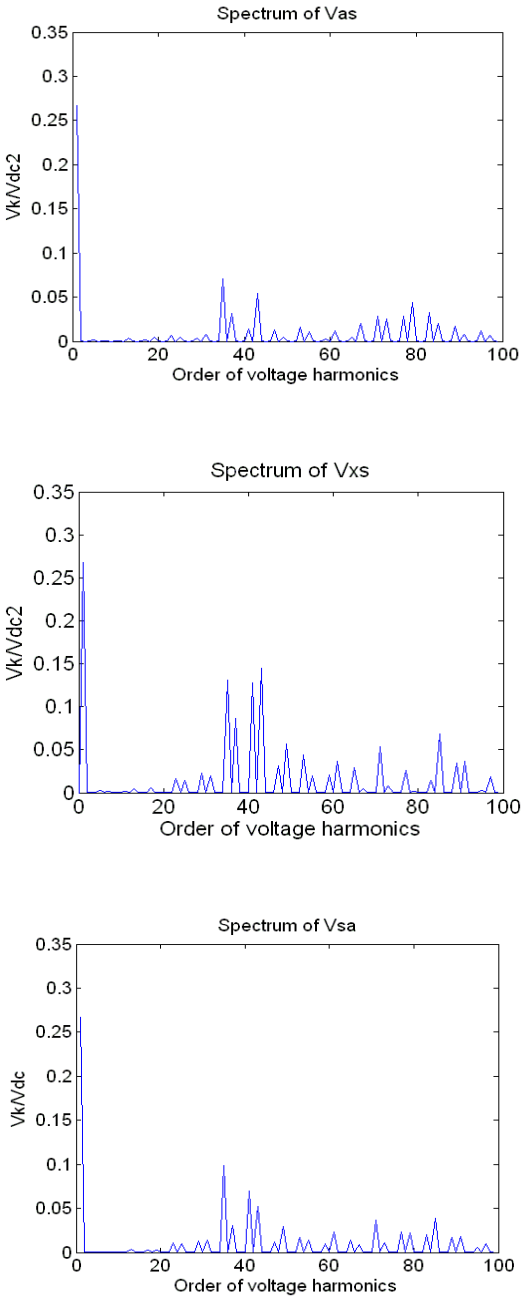

Рис. 12. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} в асимметричной шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ при нелинейном режиме управления ($V^{3/2}/F=const$)

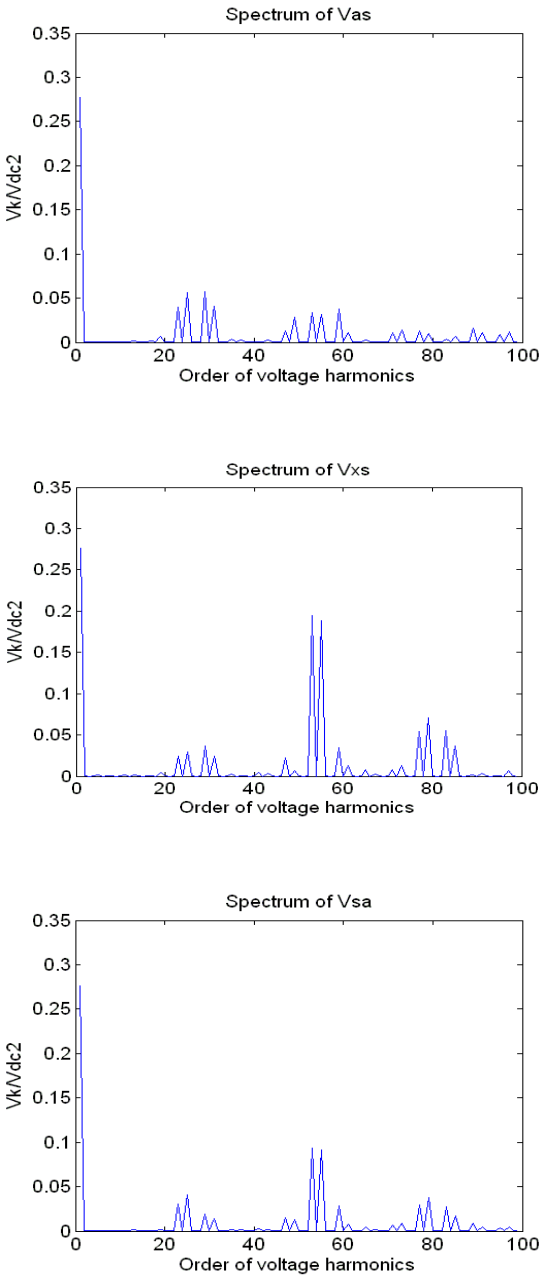

Рис. 13. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} в асимметричной шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ при нелинейном режиме управления ($V^2/F=const$)

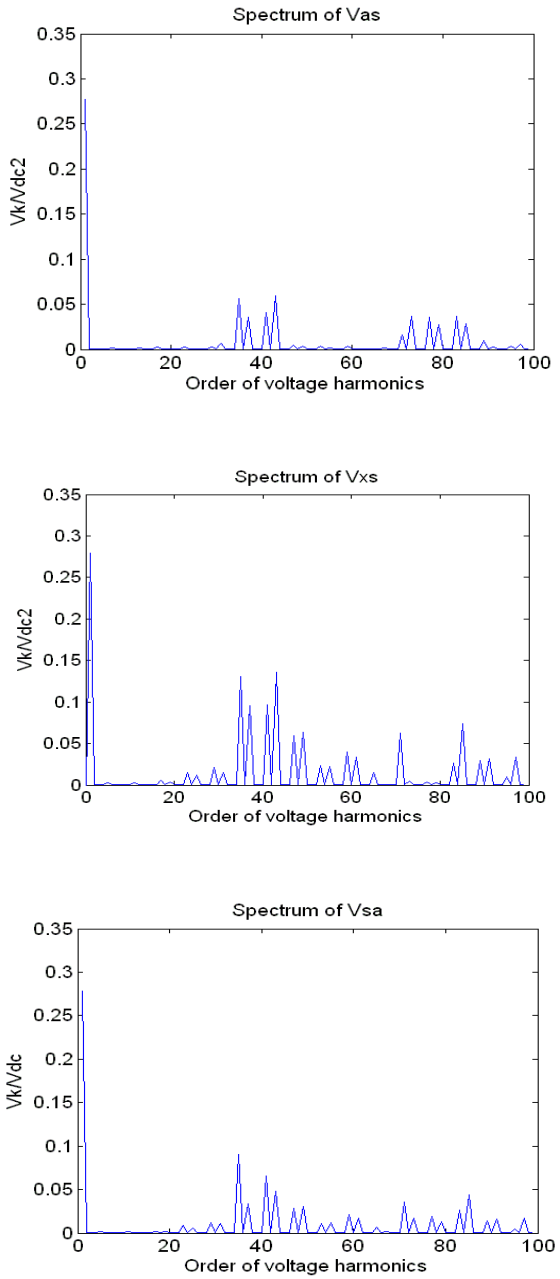

Рис. 14. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} в асимметричной шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ при нелинейном режиме управления ($V^2/F=const$)

Анализ временных диаграмм, приведенных на рис. 7–8, показывает, что фазовые напряжения V_{as} и V_{xs}, а также их полезные компоненты V_{sa} и V_{sb} в асимметричной шестифазной системе как с непрерывной, так и с прерывной синхронной ШИМ, обладают симметрией на всем диапазоне управления. Соответствующие спектры напряжений (рис. 9—14) не содержат четных гармоник и субгармоник (выходной частоты) при любом (линейном или нелинейном) режиме управления, а также при любом (целом или дробном) соотношении между частотой переключения вентилей и выходной частотой системы. В частности, для всех проанализированных выше разновидностей синхронной ШИМ для шестифазной системы это отношение частот (*1kHz/38Hz=26.3*) равно дробной величине.

Предложенный метод непрерывной синхронизации напряжений может быть также использован в шестифазных системам с несбалансированным распределением мощностей между двумя источниками постоянного тока. В частности, на рис. 15-16 приведены базовые формы напряжений в асимметричной шестифазной системе с двумя источниками постоянного тока с различными напряжениями ($V_{dc1}=0.5V_{dc2}$), регулирование которой осуществляется без баланса мощностей двух источников электропитания. Кривые на рис. 15 показывают базовые напряжения для системы с непрерывной синхронной ШИМ, а кривые на рис. 16 представляют базовые напряжения для системы с прерывистой синхронной ШИМ с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей. Частота коммутации вентилей и выходная частота каждого инверторного блока равны *1kHz* и *38Hz* (индексы модуляции двух инверторных блоков в данном случае равны между собой: $m_1=m_2=0.76$). На рис. 17-18 представлены спектральные характеристики базовых напряжений, соответствующих упомянутому режиму управления, подтверждающие факт отсутствия в спектрах выходных кривых четных гармоник и субгармоник выходной частоты.

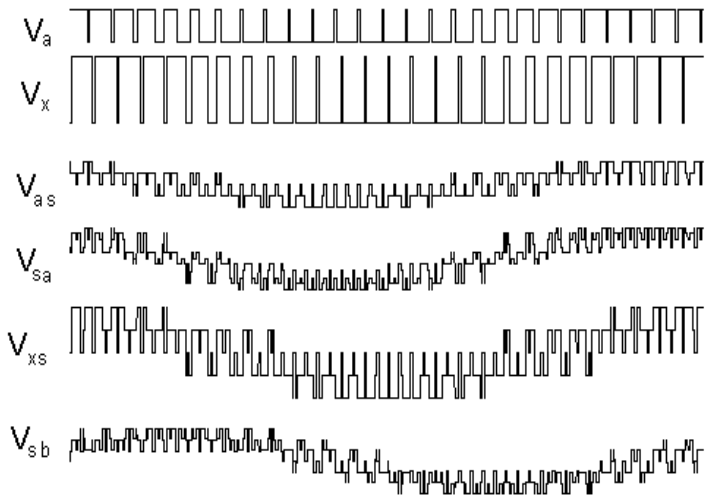

Рис. 15. Полярные V_a и V_x, фазные V_{as} и V_{xs}, а также полезные составляющие V_{sa} и V_{sb} фазного напряжения в несбалансированной шестифазной системе с непрерывной синхронной ШИМ ($F=38Hz$, $V_{dc1}=0.5V_{dc2}$, $m_1=m_2=0.76$)

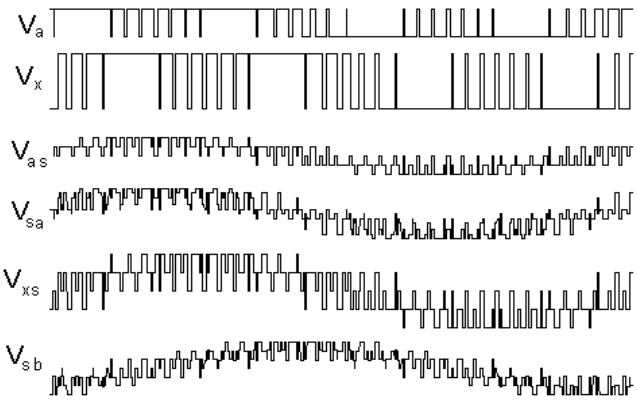

Рис. 16. Полярные V_a и V_x, фазные V_{as} и V_{xs}, а также полезные составляющие V_{sa} и V_{sb} фазного напряжения в несбалансированной шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=38Hz$, $V_{dc1}=0.5V_{dc2}$, $m_1=m_2=0.76$)

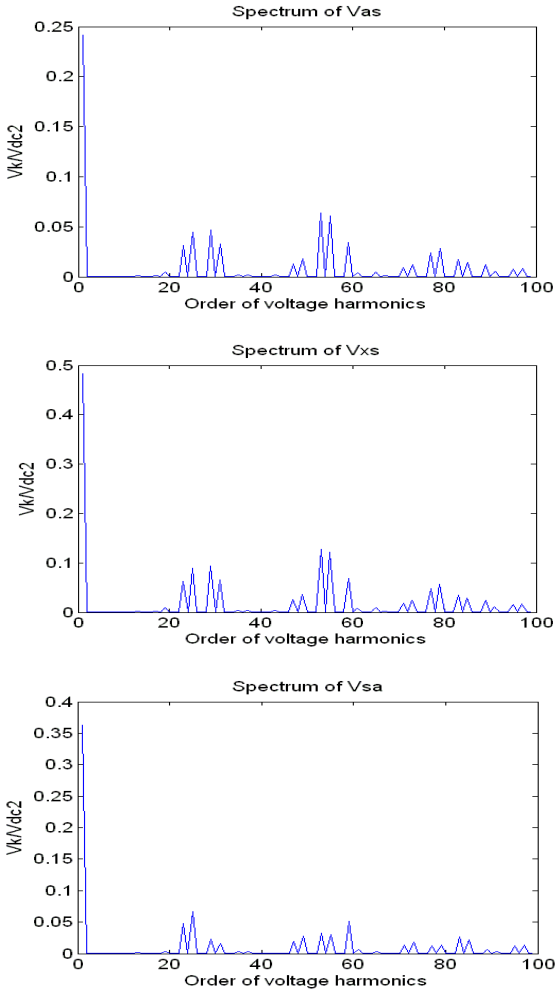

Рис. 17. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} системы с непрерывной синхронной ШИМ при несбалансированных мощностях источников питания ($F=38Hz$, $V_{dc1}=0.5Vdc2$, $m1=m_2=0.76$)

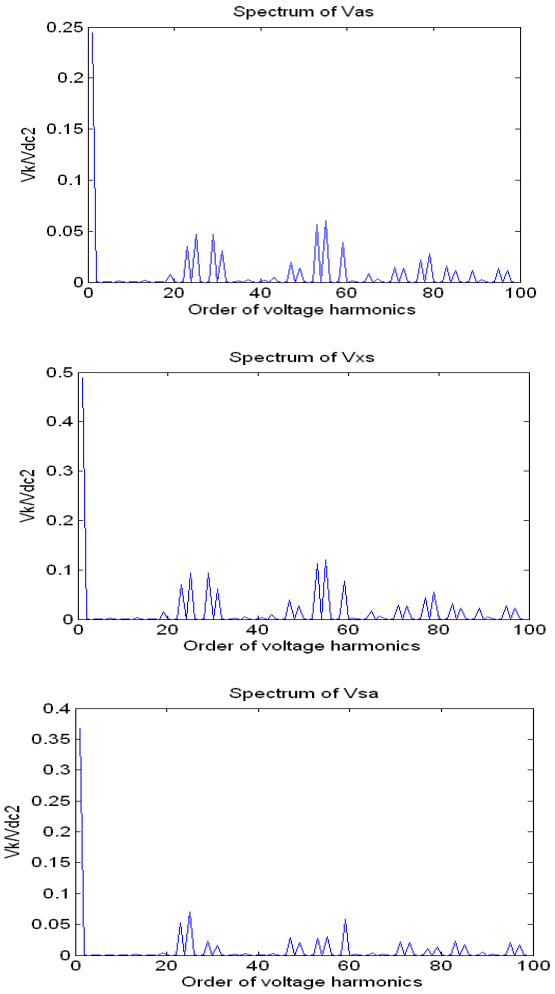

Рис. 18. Спектры напряжений V_{as}, V_{xs} и V_{sa} системы с прерывистой синхронной ШИМ при несбалансированных мощностях источников питания ($F=38Hz$, $V_{dc1}=0.5Vdc2$, $m1=m_2=0.76$)

Диаграммы, приведенные на рис. 19 и рис. 20, представляют результаты расчетов усредненной величины взвешенного коэффициента искажения (*WTHD*) фазного напряжения V_{as} и его основной полезной составляющей V_{sa} ($WTHD = (1/V_1)\sqrt{\sum_{k=2}^{1000}(V_k/k)^2}$) для асимметричной шестифазной системы с двумя автономными источниками электропитания с разными напряжениями ($V_{dc1}=0.5V_{dc2}$), со сбалансированным распределением мощностей между источниками питания. Данные, приведенные на рис. 19, соответствуют системе со стандартным *V/F=const* режимом управления. Средняя частота переключений вентилей каждой инверторной группы равна *1 kHz*. Коэффициенты модуляции первой и второй инверторных групп при этом соотносятся как $m_2=0.5m_1$.

Представленные на рис. 20 результаты вычислений соответствуют шестифазной системе с нестандартным режимом управления $V^2/F=const$, характеризующимся сильной нелинейной зависимостью между выходными напряжением и частотой. Коэффициенты модуляции в этом случае находятся в следующей зависимости: $m_2=0.25m_1$.

Анализ представленных на рис. 19-20 зависимостей показывает, что в зоне низких выходных частот асимметричной шестифазной преобразовательной системы алгоритмы непрерывной ШИМ обеспечивают лучшие интегральные характеристики спектрального состава выходного напряжения для систем как со стандартными, так и с нестандартными режимами регулирования. В области же средних и повышенных выходных частот использование алгоритмов прерывистой ШИМ представляется более предпочтительным в большинстве случаев.

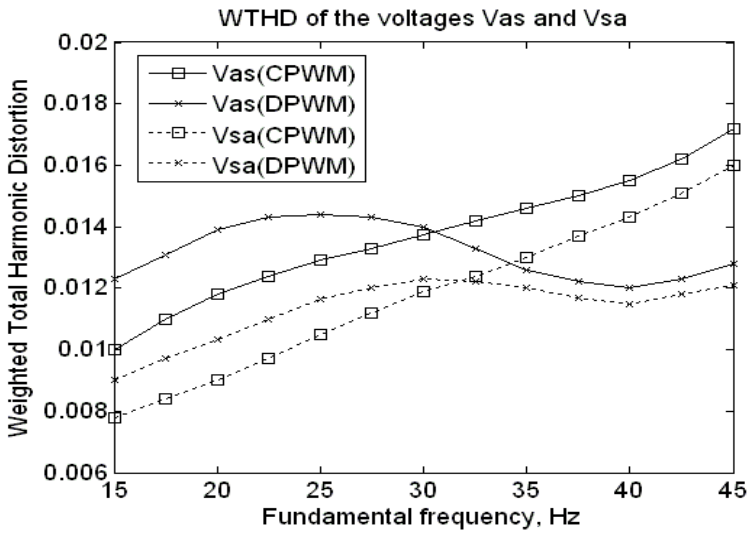

Рис. 19. Зависимость усредненного взвешенного коэффициента искажения напряжения шестифазной системы от выходной частоты при стандартном режиме управления *V/F=const* ($V_{dc1}=0.5V_{dc2}$)

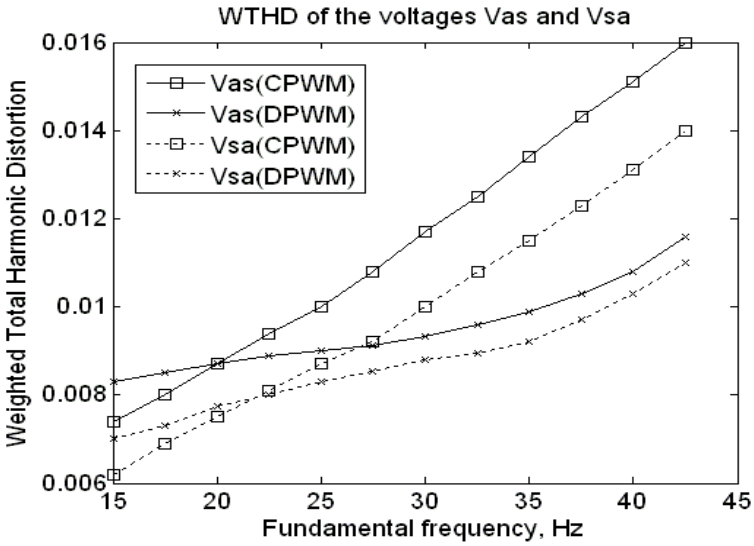

Рис. 20. Зависимость усредненного взвешенного коэффициента искажения напряжения шестифазной системы от выходной частоты при нелинейном режиме управления $V^2/F=const$ ($V_{dc1}=0.5V_{dc2}$)

В заключение следует еще раз отметить, что в асимметрисной шестифазной преобразовательной системе с синхронной ШИМ как фазные напряжения, так и полезные компоненты фазных напряжении обладают симметрией как при стандартных, так и при нестандартных режимах управления, в том числе в режимах управления как со сбалансрованными, так и с несбалансированными мощностями двух автономных источников электропитания. При этом в спектрах как фазного, так и линейного напряжений синхронизированных шестифазных систем отсутствуют четные гармоники и субгармоники на всем диапазоне регулирования при любых выходных частотах и любых частотах переключений вентилей, что является особенно важным для преобразовательных систем повышенной мощности.

Выводы

Специальная коррекция (в зависимости от режима управления) продолжительностей центральных на тактовых интервалах активных сигналов управления позволяет обеспечить полномасштабное распространение методологии синхронной векторной модуляции для управления асимметричными шестифазными преобразователями с нестандартными (нелинейными) зависимостями между выходными напряжением и частотой;

В зоне пониженных выходных частот асимметричных шестифазных преобразователей с синхронной ШИМ целесообразно использование алгоритмов непрерывной модуляции для систем как со стандартными, так и с нестандартными режимами управления. В области же средних и повышенных выходных частот использование прерывистых схем синхронной ШИМ является более предпочнительным с позиции обеспечения лучшего спектрального состава выходного напряжения шестифазных преобразователей.

Результаты выполненного исследования подтверждают тот факт, что кривые фазного выходного напряжения шестифазных преобразовательных систем с синхронной векторной ШИМ обладают симметрией на всем диапазоне регулирования, и их спектры не содержат четных гармоник и субгармоник (выходной частоты), что особенно важно для систем средней и большой мощности, способствуя снижению потерь в системах и повышению эффективности их функционирования.

Литература

[1] R. Bojoi, F. Farina, F. Profumo and A. Tenconi, "Dual-three phase induction machine drives control – a survey," CD-ROM Proc. of the 2005 IEEE Int'l Power Elect. Conf. (IPEC'2005), 10 p.
[2] R. Bojoi, A. Tenconi, F. Farina and F. Profumo, "Dual-source fed multiphase induction motor drive for fuel cell vehicles: topology and control," Proc. of the 2005 IEEE Power Electr. Spec. Conf. (PESC'2005), pp. 2676-2683.
[3] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion," Proc. of IEEE, vol. 82, no. 8, 1994, pp.1194-1213.
[4] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, Power Electronics, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2003.
[5] V. Oleschuk and F. Blaabjerg, "Direct synchronized PWM techniques with linear control functions for adjustable speed drives," Proc. of the 2002 IEEE Appl. Power Electr. Conf. (APEC'2002), pp. 76-82.
[6] B.K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, 2002.
[7] Y. Zhao, and T.A. Lipo, "Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector decomposition," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 31, no. 5, 1995, pp. 1100-1109.

Валентин Игоревич Олещук (oleschukv@hotmail.com), доктор хабилитат технических наук, является главным научным сотрудником Института энергетики Академии наук Молдовы, областью его научных интересов являются стратегии управления и модуляции силовыми полупроводниковыми преобразователями различного функционального назначения.

Роман Валерьевич Прудяк (rprudeak@gmail.com) является инженером Института энергетики Академии наук Молдовы, сфера его профессиональных интересов лежит в области разработки и исследования систем управления и регулирования электрическими и электромеханическими системами.

Александр Сергеевич Сизов (alexandrsizov@yahoo.com) является научным сотрудником Института энергетики Академии наук Молдовы, областью его научных интересов является моделирование процессов в силовых электронных преобразовательных системах.

CARACTERISTICILE REFUZURILOR DIN REȚELELE ELECTRICE DE DISTRIBUȚIE

Popescu V (Universitatea Agrară de Stat din Moldova)
vspopescu @mail.ru

Rezumat. La etapa de față în rețelele de distribuție a energiei electrice au loc un număr semnificativ de refuzuri, condiționate de diferiți factori aleatori de influență. Asigurarea continuității alimentării consumatorilor cu energie electrică este o problemă destul de actuală pentru sistemul electroenergetic republican. Pentru sporirea fiabilității rețelelor de distribuție este absolut necesar de cunoscut factorii de cauză a refuzurilor echipamentelor instalate şi caracteristicile acestora, în vederea unei planificări justificate, din punct de vedere tehnic, a activităților serviciilor de exploatare. Această lucrare este dedicată aprecierii comportamentului factorilor de influență asupra procesului de distribuție a energiei electrice şi elaborării mecanismului de asigurare a continuității acestui proces.

Cuvinte-cheie: fiabilitatea rețelelor electrice; indicatori de fiabilitate; factori aleatori de influență; caracteristicile refuzurilor din rețelele de distribuție.

CARACTERISTICS OF FAULTS IN ELECTRIC DISTRIBUTION FACILITIES

V.Popescu
Agrarian University of Moldova
vspopescu@mail.ru

Abstract. There is a significant number of faults in the electric power distribution facilities, conditioned by various random factors. The level of reliability of electric supply is determined by the graph of electrical networks and the state of there components. To increase the reliability of distribution networks is absolutely necessary to know the factors that cause the faults of the installed equipment and their characteristics. It is presented method for analisys of reliability of distribution and transmission facilities.

Keywords: reliability of electrical networks; reliability indicators; the influence of outward and inward factors; caracteristics of faults in distribution facilities.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТКАЗОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Попеску В.С.
Государственный Аграрный Университет Молдовы
vspopescu@mail.ru

Аннотация. Надежность это одно из главных характеристик распределительных сетей и их составных элементов. Уровень надежности распределительных и питающих сетей определяется графом электрических сетей и состоянием составных элементов. Изменение структуры генерирующих узлов и рост их установленной мощности приводят к тому, что разные влияющие факторы влияют по-разному на устойчивость электроснабжения и могут привести и к полному отказу оборудования сетей. Изменение режима сети влияет и на условия работы установленного электрооборудования и на их эксплуатационную надежность. В работе представлен метод при помощи которого предлагается анализировать уровень надежность распределительных и питающих сетей.

Ключевые слова: надежность электрических сетей; показатели надежности; вероятные факторы; характеристик отказов распределительных сетей.

Introducere

Rețelele de distribuție a energiei electrice reprezintă nişte sisteme complexe, care se află într-o dezvoltare continuă [2,4]. Aceasta se explică prin faptul că, datorită cerințelor socio-economice contemporane, apar un număr tot mai mare al consumatori noi de energie electrică şi aceasta conduce spre apariția a mai multor noduri de sarcină, iar schemele structurale ale rețelelor de distribuție devin din ce în ce mai complicate. Acest lucru este binevenit în dezvoltarea social-economică a oricărui stat, însă, odată cu el apar noi cerințe şi probleme referitoare la asigurarea fiabilității rețelelor de distribuție. Sporirea în continuu a numărului de elemente componente ale schemelor structurale face ca să sporească riscul de

apariţie a defectelor şi întreruperilor în alimentare cu energie electrică a consumatorilor, care provoacă daune semnificative. Asigurarea nivelului de fiabilitate dă posibilitatea de a aduce speranţa matematică a întreruperilor şi a daunelor la o valoare acceptabilă, atât pentru consumatorii de energie electrică cât şi pentru reţelele de distribuţie. Această problemă poate fi soluţionată prin determinarea comportărilor factorilor de influinţă, care cauzează apariţia întreruperilor aleatorii şi condiţionează pierderi economice.

La etapa actuală în reţelele electrice de distribuţie, au loc un număr semnificativ de refuzuri care determină nivelul de fiabilitate în alimentarea cu energie electrică a tuturor consumatorilor, inclusiv şi acelora din sectorul agrar [1,3]. Stabilirea factorilor de cauză a acestor întreruperi şi determinarea caracteristicilor lor, permite de a elabora mecanismul de asigurare a continuităţi alimentării cu energie calitativă a consumatorilor.

Numărul semnificativ de refuzuri a elementelor componente aduce complicaţii destul de serioase la determinarea soluţiilor în vederea asigurării fiabilităţii reţelelor electrice, de aceea pentru rezolvarea problemelor respective este necesar de analizat toate fenomenele ce însoţesc procesul de distribuţie a energiei electrice [5-7]. În prezent caracteristicile statistice ale refuzurilor, cauzele apariţiei şi impactul lor asupra fiabilităţii alimentării consumatorilor cu energie electrică nu sunt studiate la nivelul stipulat de documentele în vigoare privind indicatorii de fiabilitate. Continuitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor poate fi asigurată numai în bază de cunoaştere profundă a fenomenelor ce însoţesc acest proces, ceea ce permite o planificare justificată, din punct de vedere tehnic şi economic, a măsurilor şi activităţilor serviciilor de exploatare a reţelelor de distribuţie, în vederea asigurării indicatorilor normaţi de fiabilitate.

Dezvăluirea problemei

Cercetările asupra fiabilităţii reţelelor de distribuţie au fost efectuate în baza reţelelor din sistemul electroenergetic republican. Pentru a determina caracteristicile refuzurilor în funcţionare a echipamentelor conectate în reţelele electrice au fost analizate şi studiate reţelele de distribuţie din diferite zone geografice ale Republicii Moldova. În baza datelor experimentale iniţiale cu privire la deconectările din reţelele electrice, s-a propus schema de clasificare a întreruperilor, în conformitate cu care au fost selectate şi procesate toate refuzurile aleatorii condiţionate de diferiţi factori de influenţă.

În figura 1 se prezintă schema elaborată pentru clasificarea şi procesarea întreruperilor, care permite de a caracteriza refuzurile specifice în dependenţă de fiecare factor de influenţă (pentru fiecare sistem în funcţie de sezon).

Pentru apreciere caracteristicilor refuzurilor din reţelele electrice de distribuţie suportul metodologic şi teoretico-ştiinţific a fost asigurat de: teoria grafelor şi a matricelor; teoria probabilităţii; metodele de analiză statistică şi procesare a datelor experimentale privind refuzurile în sistemele de distribuţie; teoria ecuaţiilor liniare şi neliniare; modelarea matematică; tehnica de calcul cu soft-urile „Microsoft Excel“, „StatGraphics“, „Curve Expert“, „EasyFit 5.5 Professional“.

Procesarea informaţiei caracteristice privind întreruperile în reţelele examinate a fost efectuată în baza unui procedeu standard de analiză şi calcul, s-a propus conceptul unic de abordare metodologică generalizată, pentru aprecierea indicilor de fiabilitate, prin utilizarea noţiunii de unitate specifică de lungime (100 km de reţea), care permite de a omogeniza şi compara refuzurile, pentru toate reţelele electrice, indiferent de lungimea sumară a lor.

Utilizând schema de clasificare şi conceptul elaborat privind procesarea întreruperilor, au fost evidenţiaţi 12 factori de cauză şi a fost determinată frecvenţa de apariţie a refuzurilor cauzate de fiecare factor aleatoriu, la 100 km de linie, pentru fiecare sistem în funcţie de sezon. În tabelul 1 se prezintă rezultatele procesării refuzurilor aleatorii care au avut loc sezonier în sistemele cercetate la 100 km de linie (exemplu pentru anul 2008).

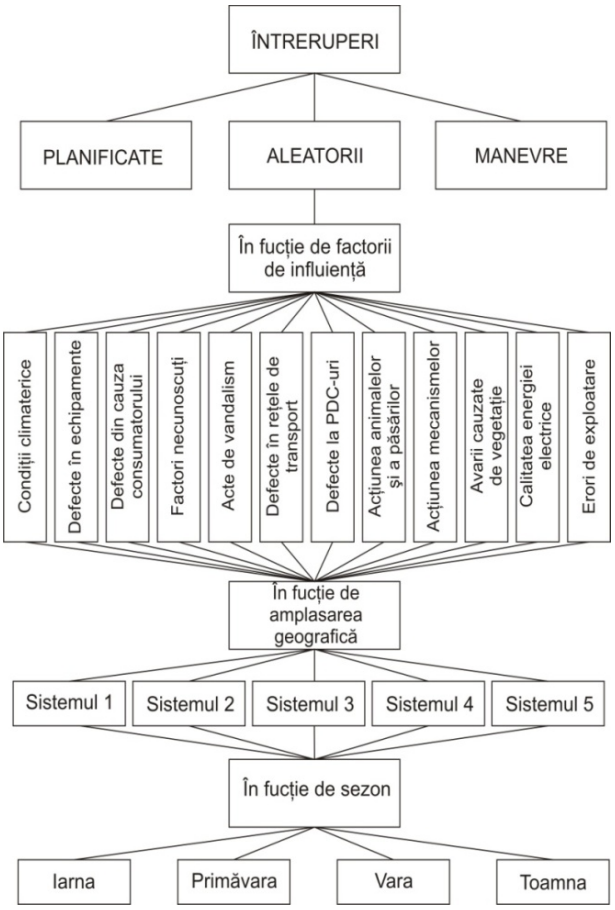

Figura 1. Schema de clasificare a întreruperilor

Tabelul 1. Rezultatele procesării refuzurilor condiționate de factorii aleatori de influență

Factorii		Numărul sezonier al întreruperilor aleatorii specifice									
		Iarna		Primăvara		Vara		Toamna		Anual	
Nr	**Descrierea**	**Total**	**%**	**Total**	**%**	**Total**	**%**	**Total**	**%**	**Total**	**%**
1	**Condiții climaterice**	3,16	14,37	4,07	29,08	3,47	16,54	2,56	21,37	**13,3**	**19,2**
2	**Defecte în echipamente**	6,49	29,48	4,67	33,39	6,95	33,12	3,63	30,25	**21,7**	**31,5**
3	**Defecte din cauza consumatorului**	1,46	6,62	0,59	4,21	0,99	4,70	0,26	2,19	**3,3**	**4,8**
4	**Factori necunoscuți**	7,61	34,58	3,75	26,79	7,07	33,66	3,74	31,14	**22,2**	**32,1**
5	**Acte de vandalism**	0,55	2,52	0,15	1,07	0,30	1,42	0,21	1,78	**1,2**	**1,8**
6	**Defecte în rețelele de transport**	0,12	0,55	0,08	0,56	0,13	0,64	0,09	0,71	**0,4**	**0,6**
7	**Defecte la PDC-uri**	2,12	9,65	0,27	1,93	1,05	5,01	0,50	4,14	**3,9**	**5,7**
8	**Acțiunea animalelor şi a păsărilor**	0,13	0,61	0,14	1,01	0,25	1,18	0,15	1,24	**0,7**	**1,0**
9	**Acțiunea mecanismelor**	0,11	0,52	0,12	0,86	0,19	0,91	0,13	1,12	**0,6**	**0,8**
10	**Avarii cauzate de vegetație**	0,63	2,87	0,43	3,10	0,36	1,73	0,35	2,90	**1,8**	**2,6**
11	**Calitatea energie electrice**	0,05	0,23	0,02	0,15	0,04	0,20	0,06	0,47	**0,2**	**0,2**
12	**Erori de exploatare**	0,04	0,16	0,01	0,10	0,02	0,10	0,03	0,24	**0,1**	**0,1**
	TOTAL	**22**	**100**	**14**	**100**	**21**	**100**	**12**	**100**	**69**	**100**

Caracteristicile refuzurilor au fost examinate în baza următorilor parametrii: frecvența de apariție, durata şi numărul consumatorilor de energie afectați. Toate acestea au dat posibilitatea de a simplifica calculul şi a stabili repartițiile întreruperilor pentru toți factorii aleatori de influență, în funcție de frecvența de apariție pe sistem şi sezon, care permit determinarea structurilor complexe şi de a trasa măsurile de sporire a fiabilității sistemelor de distribuție.

În tabelul 2 se prezintă parametrii repartițiilor stabilite a întreruperilor aleatorii, care apar sezonier la o unitate specifică (100 km de rețea) în rețelele de distribuție (numărul mediu de întreruperi, dispersia D, abaterea medie pătratică σ, coeficientul de variație, numărul minim şi maxim de întreruperi, valorile marginale ale intervalului de încredere, coeficienții de asimetrie şi exces).

Ca rezultat al procesării datelor experimentale, s-a constatat că întreruperile aleatorii din punct de vedere a apariției lor pe sistem şi sezon, se caracterizează cu distribuția Normală-Gaussiană, pentru toți cei 12 factori de influență. Acest fapt permite de a examina rezultatele privind procesarea refuzurilor ca un ansamblu de date compatibile, care aparțin aceleiaşi comunități.

Din punct de vedere a duratelor întreruperilor cauzate cei 12 factori de influență examinați au comportări diferite. S-a constatat că 9 din ei (acte de vandalism, acțiunea animalelor si păsărilor, acțiunea diferitor mecanisme, avarii cauzate de vegetație, calitatea energiei electrice, defecte din cauza consumatorilor, defecte în rețele de transport, defecte la PDC, factori neidentificați) se caracterizează cu legea de distribuție de tip Weibull, 2 factori (defecte în echipamente, condiții climaterice) au o distribuție de tip Lognormal (3-parametri) şi un factor (erori de exploatare) are o distribuție Exponentială.

Tabelul 2. Parametrii repartițiilor refuzurilor cauzate de factorii aleatori în funcție de sezon

N.	Factorii	Num. Med. de *într.*	D	σ	Coef. de var.	Num. min. de *într.*	Num. max. de *într.*	Dia-pa-zon, *într.*	Lim. de jos, *într.*	Lim. de sus, *într.*	Coef. de asim.	Coef. de exces	Repartiția teoretică apropiată
1	Acte de vandalism	0,36	0,01	0,11	0,30	0,15	0,55	0,40	0,31	0,41	-0,37	-0,18	Normală
2	Acțiunea animalelor si păsărilor	0,20	0,01	0,12	0,57	0,06	0,42	0,36	0,15	0,26	0,81	-1,12	Normală
3	Acțiunea diferitor mecanisme	0,15	0,00	0,07	0,45	0,06	0,28	0,22	0,12	0,18	0,79	-0,63	Normală
4	Avarii cauzate de vegetație	0,33	0,03	0,17	0,51	0,04	0,68	0,64	0,25	0,41	0,86	0,11	Normală
5	Calitatea energiei electrice	0,03	0,00	0,02	0,59	0,01	0,06	0,05	0,02	0,03	1,00	-0,80	Normală
6	Condiții climaterice	4,08	2,42	1,56	0,38	1,19	6,73	5,54	3,35	4,81	-0,27	-0,80	Normală
7	Defecte din cauza con-sumatorilor	0,84	0,14	0,37	0,44	0,26	1,61	1,35	0,66	1,01	1,03	-0,09	Normală
8	Defecte în	4,67	2,52	1,59	0,34	2,19	9,00	6,81	3,92	5,41	1,92	1,49	Normală

	echipamente												
9	Defecte în rețele de transport	0,19	0,01	0,08	0,44	0,08	0,40	0,32	0,15	0,23	1,32	0,35	Normală
10	Defecte la PDC	0,72	0,20	0,45	0,62	0,23	2,12	1,89	0,51	0,93	1,09	1,64	Normală
11	Erori de exploatare	0,02	0,00	0,01	0,55	0,01	0,04	0,03	0,02	0,03	0,83	-1,24	Normală
12	Factori neidentificați	4,49	3,54	1,88	0,42	2,05	9,64	7,59	3,61	5,37	1,36	1,66	Normală

S-a constatat că, după numărul de consumatori afectați, 10 factori se descriu cu legea de distribuție de tip Weibull (acte de vandalism, acțiunea animalelor si păsărilor, acțiunea diferitor mecanisme, avarii cauzate de vegetație, calitatea energiei electrice, defecte din cauza consumatorilor, defecte în rețele de transport, defecte la PDC, defecte în echipamente, erori de exploatare), unul din ei (condițiile climaterice) se descrie cu modelul de tip Lognormal (3-Parametri) şi unul (factori neidentificați) cu modelul Log-Logistic (3-Parametri).

În tabelul 3 se prezintă tipurile de legi teoretice ce determină comportamentul factorilor de influență după parametrii examinați.

În tabelul 4 sunt prezentate modele matematice elaborate şi parametrii lor, ce determină legile de distribuție experimentale şi cele teoretice ale întreruperilor aleatorii în funcție de durată, iar în tabelul 5 sunt prezentate modele matematice elaborate, care determină legile de distribuție a refuzurilor cauzate de factorii de influență, în funcție de numărul consumatorilor afectați.

Tabelul 3. Legile teoretice ce determină comportamentul factorilor aleatori după parametrii examinați

N.	**Factorii**	**Tipul legilor teoretice de distribuție ale refuzurilor**			
		Frecvența de apariție pe sistem	**Frecvența de apariție pe sezon**	**Durata refuzurilor**	**Consumatorii afectați**
1	Acte de vandalism	Normală	Normală	Weibull	Weibull
2	Acțiunea animalelor si păsărilor	Normală	Normală	Weibull	Weibull
3	Acțiunea mecanismelor	Normală	Normală	Weibull	Weibull
4	Avarii cauzate de vegetație	Normală	Normală	Weibull	Weibull
5	Calitatea energiei	Normală	Normală	Weibull	Weibull
6	Condiții climaterice	Normală	Normală	Lognormal 3-parametri	Lognormal 3-Param.
7	Defecte din cauza consumatorilor	Normală	Normală	Weibull	Weibull
8	Defecte în echipamente	Normală	Normală	Lognormal 3-parametri	Weibull
9	Defecte în RT	Normală	Normală	Weibull	Weibull
10	Defecte la PDC	Normală	Normală	Weibull	Weibull

11	Erori de exploatare	Normală	Normală	Exponentială	Weibull
12	Factori neidentificați	Normală	Normală	Weibull	Log-Logistic 3-Param.

Tabelul 4. Modelele matematice ce determină legile de distribuție a refuzurilor după durată

N.	**Factorii**	**Modelul matematic**	**Parametrii modelului matematic**			
			a	**b**	**c**	**d**
1	Acte de vandalism	$y = a - be^{-cx^d}$	539,34	536,02	3,54	-2,07
2	Acțiunea animalelor si păsărilor	$y = a - be^{-cx^d}$	1611,64	1681,86	0,23	-0,56
3	Acțiunea mecanismelor	$y = a - be^{-cx^d}$	275,12	271,17	4,46	-2,42
4	Avarii cauzate de vegetație	$y = a - be^{-cx^d}$	507,71	503,03	5,28	-2,29
5	Calitatea energiei electrice	$y = a - be^{-cx^d}$	221,52	219,37	4,13	-2,18
6	Condiții climaterice	$y = e^{a+\frac{b}{x}+c\ln(x)}$	11,57	-3,40	-2,28	-
7	Defecte din cauza consumatorilor	$y = a - be^{-cx^d}$	1206,12	1196,70	3,24	-2,11
8	Defecte în echipamente	$y = e^{a+\frac{b}{x}+c\ln(x)}$	11,74	-3,97	-2,19	-
9	Defecte în rețele de transport	$y = a - be^{-cx^d}$	295,68	292,83	4,87	-2,28
10	Defecte la PDC	$y = a - be^{-cx^d}$	1167,29	1168,84	2,23	-1,80
11	Erori de exploatare	$y = ae^{\frac{b}{x}}$	1,58	4,48	0,00	0,00
12	Factori neidentificați	$y = a - be^{-cx^d}$	3663,49	3609,07	46,88	-2,94

Tabelul 5. Modelele matematice ce determină legile de distribuție a refuzurilor în funcție de numărul consumatorilor afectați

N.	**Factorii**	**Modelul**	**Parametrii modelului matematic**

		matematic	a	b	c	d
1	Acte de vandalism	$y = a - be^{-cx^d}$	536,83	532,20	543529,85	-2,22
2	Acțiunea animalelor si păsărilor	$y = a - be^{-cx^d}$	312,19	308,95	1701520,8	-2,39
3	Acțiunea mecanismelor	$y = a - be^{-cx^d}$	265,37	262,20	106432,41	-2,20
4	Avarii cauzate de vegetație	$y = a - be^{-cx^d}$	536,87	534,68	31362,10	-2,10
5	Calitatea energiei	$y = a - be^{-cx^d}$	223,60	221,12	125087,27	-2,35
6	Condiții climaterice	$y = e^{a+\frac{b}{x}+c\ln(x)}$	23,52	-463,72	-2,40	-
7	Defecte din cauza consumatorilor	$y = a - be^{-cx^d}$	1274,46	1272,51	1597,60	-1,91
8	Defecte în echipamente	$y = a - be^{-cx^d}$	6701,21	6748,98	2285,59	-1,59
9	Defecte în RT	$y = a - be^{-cx^d}$	292,31	289,20	675132,55	-2,34
10	Defecte la PDC	$y = a - be^{-cx^d}$	1103,55	1099,74	54475,74	-1,96
11	Erori de exploatare	$y = a - be^{-cx^d}$	104,71	104,92	467,17	-1,54
12	Factori neidentificați	$y = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x}{b}\right)^c\right]}$	3804,47	464,45	3,36	-

Reieşind din caracteristicile efctuate asupra refuzurilor din rețelele electrice s-au determinat criteriile şi valorile parametrilor necesari, care permit de a caracteriza influența factorilor aleatori asupra fiabilității rețelelor de distribuție şi de a prognoza cu credibilitatea de 95% următorii indici: numărul aşteptat de refuzuri pe sistem; numărul aşteptat de refuzuri pe sezon; duratele refuzurilor; numărul de consumatori care pot fi afectați. Acest fapt permite de a elabora mecanismul de asigurare a fiabilității rețelelor de distribuție şi a continuității alimentării consumatorilor cu energie calitativă, pentru toate categoriile de fiabilitate.

Concluzii

Din analiza rezultatelor obținute s-a constatat că refuzurile din rețelele electrice de distribuție cauzate de diferiți factori aleatorii de influență, din punct de vedere a apariției lor pentru fiecare filială şi pentru fiecare sezon, se caracterizează cu o repartiție uniformă.

În funcție de numărul consumatorilor afectați, refuzurile cauzate de 10 factori de influență se caracterizează cu distribuția teoretică Weibull (acte de vandalism, acțiunea animalelor si păsărilor, acțiunea diferitor mecanisme, avarii cauzate de vegetație, calitatea energiei electrice, defecte din cauza consumatorilor, defecte în rețele de transport, defecte la PDC, defecte în echipamente, erori de exploatare), pentru un factor (condițiile climaterice) persistă distribuția Lognormal (3-Parametri), iar factori neidentificați se caracterizează cu modelul de tip Log-Logistic (3-Parametri).

În dependență de duratele întreruperilor cauzate, 9 factori de influență (acte de vandalism, acțiunea animalelor şi a păsărilor, acțiunea diferitor mecanisme, avarii cauzate de vegetație, calitatea energiei electrice, defecte din cauza consumatorilor, defecte în rețele de transport, defecte la PDC, factori neidentificați) au o distribuție a refuzurilor ce corespunde funcției de tip Weibull, 2 factori (defecte în echipamente, condiții climaterice) se caracterizează cu distribuția de tip Lognormal (3-parametri) şi un factor (erori de exploatare) are o distribuție Exponentială.

Bibliografie

[1] Popescu, V**.** Analiza fiabilităţii sistemelor electrice de distribuţie. Problemele energeticii regionale, AŞM, Chişinău, 2012 nr.1 (17) p. 57-63.
[2] POPESCU V. The influence of short-circuit currents on the fiability of the distributive electric networks . *Analele universităţii din Oradea***.** Universitatea din Oradea, România*,* 2009, Fascicula de Energetică, Nr. 15, p. 119-120.
[3] Felea I., Dziţac Simona, Fiabilitatea Echipamentelor şi Sistemelor Energetice. Editura Universităţii din Oradea, 2006.
[4] POPESCU V. The influence of asymmetrical regimes on functioning reability of electro-
[5] energetics systems. *Analele universităţii din Oradea***.** Universitatea din Oradea, România*,* 2011, Fascicula de Energetică, Nr. 17, p. 79-92.
[6] Erhan F. Bazele teoretice ale electrotehnicii. UASM, Chişinău 2009, 675p.
[7] Popescu, V., Studiul proceselor tranzitorii însoţite de arcul voltaic şi influenţa lor asupra fiabilităţii sistemelor de distribuţie. Analele Universităţii din Oradea, România, 2007, Fascicula de Energetică, Nr. 13, p. 60-63.
[8] Popescu V., Erhan T. Optimizarea nivelului de fiabilitate a sistemelor de distribuţie şi alimentare cu energie electrică a consumatorilor. Materialele conferinţei ştiinţifico-practice consacrată aniversării a 90 ani de la naşterea Academicianului Iurii N. Petrov, UASM, Chişinău, 2011.

Despre autor

Popescu Victor Serghei, lector superior universitar al catedrei „ Electrificarea şi automatizarea mediului rural”, Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Interesele ştiinţifice se află în planul determinării fiabilităţii sistemelor de distribuţie, auditul energetic al consumatorilor din sectorul agrar şi al întreprinderilor de prelucrare primară a producţiei agricole. Autor şi coautor a 27 de lucrări ştiinţifice şi metodico-didactice şi o serie de articole ştiinţifice publicate în reviste recenzate, raporturi la Conferшnţe Ştiinţifice Internaţionale. E-mail: vspopescu @mail.ru

Попеску Виктор Сергеевич, старший преподаватель кафедры „Электрификация и автоматизация сельского хозяйства”, Государственного Аграрного Университета Молдовы. Научные интересы - надежность электроснабжения потребителей и энергоаудит у сельскохозяйственных потребителей и в перерабатывающей промышленности, определение энергоемкости при производстве и первичной переработки сельскохозяйственной продукции. Автор и соавтор 27 научных и методических работ, научных статей, опубликованных в рецензируемых журналах и докладов на различных Международных научных конференциях. E-mail: vspopescu @mail.ru.

ВЛИЯНИЕ МЕЖСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ 110КВ НА УРОВЕНЬ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ МОЛДОВЫ

Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Тыршу М.С., Голуб И.В.
Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. В работе приведены результаты исследований по моделированию режимов энергосистемы, с учетом влияния межсистемных связей 110кВ с Украиной на уровень потерь активной мощности в энергосистеме Молдовы.
Ключевые слова: межсистемные связи, потокораспределение, потери активной мощности, компенсирующие устройства.

EFECTUL INTERCONEXIUNILOR DE 110 KW ASUPRA NIVELULUI PIERDERILOR DE PUTERE ACTIVĂ DIN SISTEMUL ELECTROENERGETIC AL MOLDOVEI

L.Calinin, D. Zaițev, M.Tîrşu, I.Golub
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat. În lucrare sunt prezentate rezultatele cercetărilor cu privire la modelarea regimurilor sistemului energetic cu influența interconexiunilor 110 kV cu Ucraina asupra nivelului pierderilor de putere activă în sistemul electroenergetic din Republica Moldova.
Cuvinte-cheie: interconexiuni, distribuția fluxurilor, pierderi de putere activă, surse de putere reactivă.

THE IMPACT OF TRANSMISSIONS 110kV ON THE LEVEL OF POWER LOSSES IN MOLDAVIAN POWER SYSTEM

L.Calinin, D. Zaitsev, M.Tirshu, I.Golub
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The paper present the simulation results of system operation in conditions of energy exchange with Ukraine considering the level of power losses in Moldova.
Keywords: interconnections, flow distribution, power losses, compensating devices.

Введение

Объектом исследования являются энергетические системы Республики Молдова и Украины. База данных, используемая в этой работе, включает в себя информацию по режимам энергосистем стран черноморского бассейна: России, Румынии, Грузии, Украины, Болгарии, Армении, Молдовы, Турции, а также эквиваленты сети примыкающих стран: Латвии, Эстонии, Литвы, Белоруссии, Польши Словакии, Венгрии, Македонии, Сербии, Азербайджана.

Общая характеристика вариантов для сравнения

Сравнение вариантов проведено относительно исходного режима, расчитанного при следующих условиях:

1. За основу взят режим зимнего максимума на перспективу 2015-20 года.
2. Энергосистема республики работает синхронно с украинской энергосистемой.
3. Связи 110кВ с румынской энергосистемой отключены.
4. Включен СВ на ПС Рыбница330кВ.
5. Включены АТ400/330кВ на МГРЭС.

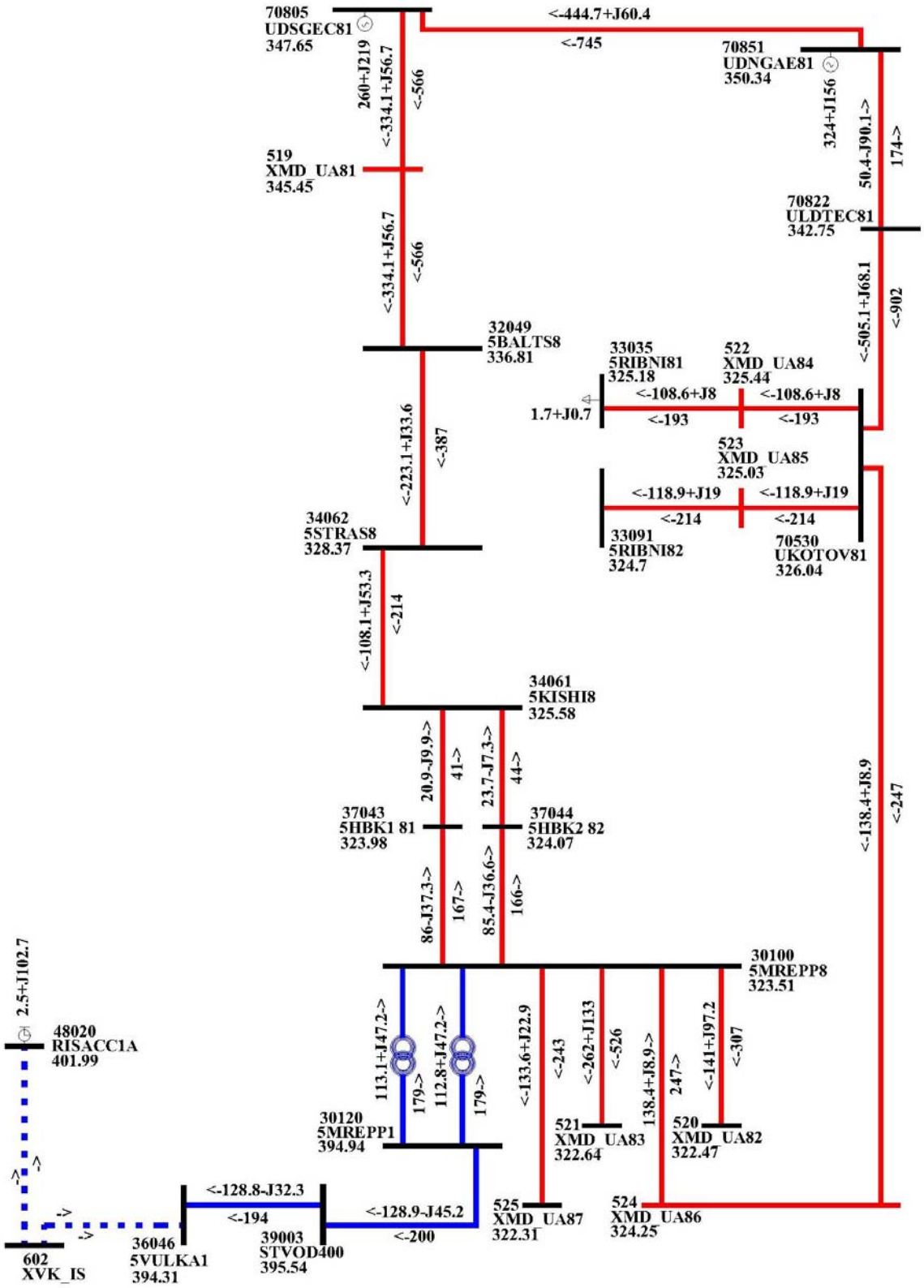

Рис.1. Потокораспределение в транспортной сети Молдовы
(вариант одноцепного транзита)

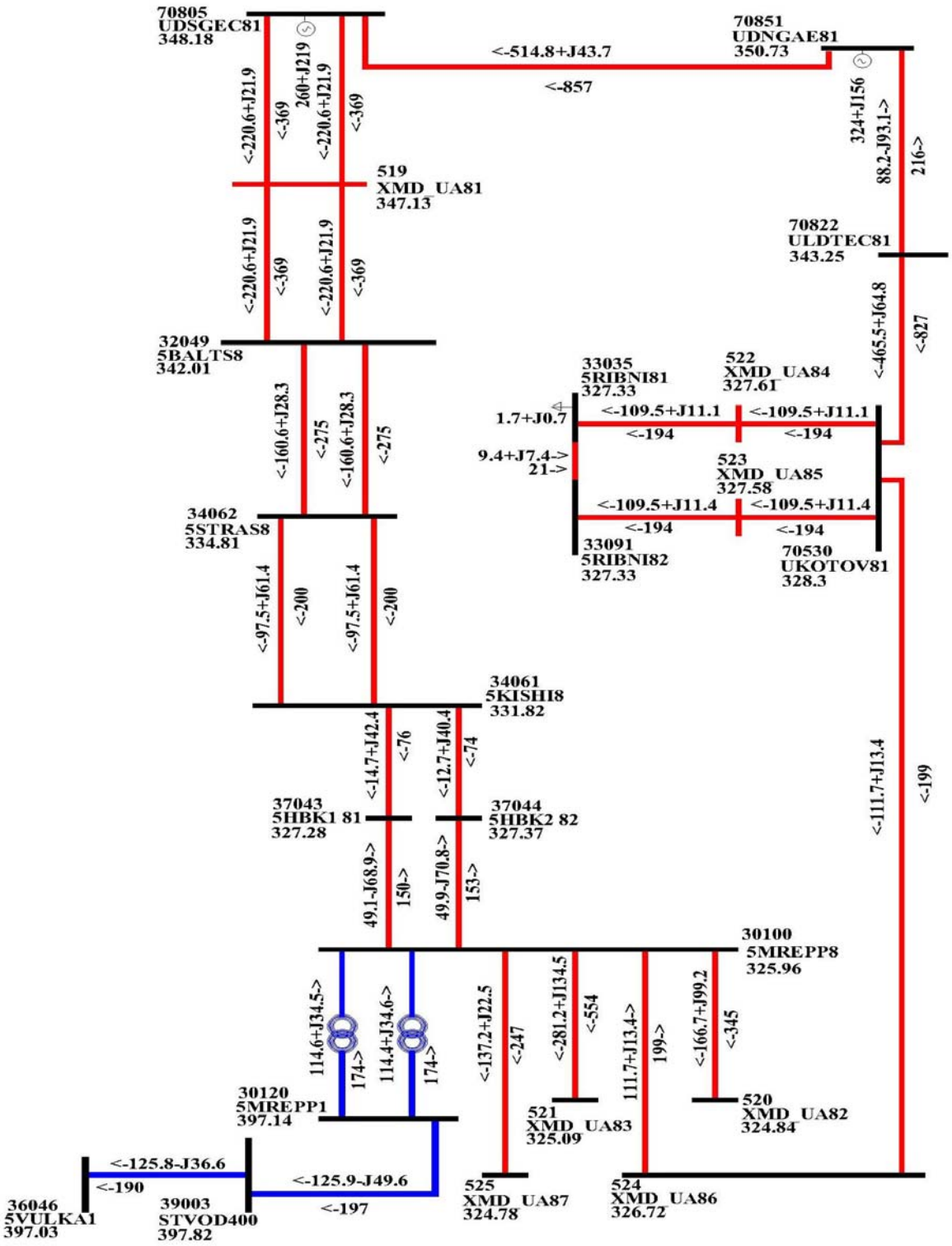

Рис.2. Потокораспределение в транспортной сети Молдовы
(вариант двухцепного транзита)

6. Топология сети соответствует существующему в настоящее время состоянию (вариант одноцепного транзита рис.1).

7. Топология сети соответствует наиболее оптимальному, с точки зрения потерь активной мощности, варианту развития системообразующей сети Молдовы (усиление

вторыми цепями участка от ПС Кишиневская до ПС Дн.ГЭС (вариант двухцепного транзита рис.2) [1].

Основные параметры исходного режима нанесены на схему сети и приведены соответственно на рис.1 и 2.

Данные по таким параметрам режима, как объем генерации и нагрузки, величины межсистемных перетоков, уровни потерь мощности в смежных энергосистемах приведены в таблице 1.

Табл. 1. Основные параметры режима

Одноцепный транзит									
Nр-н	**Район**	**Рген**	**Qген**	**Рнаг**	**Qнаг**	**ΔР**	**ΔQ**	**Рвн**	**Qвн**
3	Молдова	1126,8	386,9	1151,4	434,4	35,3	-184,0	-60,0	136,5
4	Румыния	10266,8	2304,6	9416,5	3449,2	280,8	-868,4	569,5	-276,2
7	Украина	32417,8	12318,4	30502,3	10046,1	907,8	3970,4	1007,7	-1698,2
1	Остальная сеть	78198,2	30634,6	77768,9	32591,1	1946,5	-3794,3	-1517,2	1837,8
	ОЭС	**122009,6**	**45644,5**	**118839,1**	**46520,8**	**3170,5**	**-876,3**	**0,0**	**0,0**
Двухцепный транзит									
3	Молдова	1126,8	386,9	1151,4	434,4	35,3	-184,0	-60,0	136,5
4	Румыния	10266,8	2304,6	9416,5	3449,2	280,8	-868,4	569,5	-276,2
7	Украина	32417,8	12241,4	30502,3	10046,1	902,5	3919,2	1013,0	-1724,0
1	Остальная сеть	78191,7	30651,0	77768,9	32591,1	1948,0	-3777,7	-1525,1	1837,6
	ОЭС	**122003,1**	**45492,7**	**118839,1**	**46520,8**	**3164,5**	**-1028,3**	**-0,4**	**0,2**

Табл. 2. Составляющие потерь активной мощности

	Одноцепный транзит				**Двухцепный транзит**			
Uн	**ΔРнагр**	**ΔРлэп**	**ΔРтр**	**ΔРхх**	**ΔРнагр**	**ΔРлэп**	**ΔРтр**	**ΔРхх**
Молдова	31,86	28,23	3,63	3,47	29,61	26,06	3,55	3,55
400	0,6	0,37	0,23	0,75	0,57	0,35	0,21	0,76
330	8,99	8,06	0,93	2,3	8,72	7,76	0,96	2,36
110	19,83	19,79	0,04	0,43	17,98	17,94	0,04	0,44

Величина потерь активной мощности для Молдавской энергосистемы составляет 35.34МВт, а для Украинской 907.83мВт. Согласно информации, представленной в таблице 2 по энергосистеме республики, основные потери приходятся на сети 110кВ.

Анализ влияния межсистемных связей 110кВ с Украиной

Для выявления воздействия межсистемных связей 110кВ с Украиной на режим и уровень потерь в молдавской энергосистеме была проведена серия расчетов, позволяющая выявить влияние каждой связи в отдельности, а также совокупно всех межсистемных связей. Результаты проведенных исследований, приведены в таблице 3, где присутствует информация по потерям активной мощности в энергосистемах Молдовы и Украины в случаях одноцепного и духцепного транзита 330кВ Север-Юг при различных вариантах отключения связей 110кВ с Украиной.

Как видно из анализа информации, представленной в таблице 3, отключение некоторых линий связи 110кВ между Молдовой и Украиной ощутимо влияет на уровень потерь активной мощности в обеих энергосистемах. Отключение таких высоковольтных линий дает отклонение потерь на величину более 1мВт. Эти линии выделены в таблице маркером. При этом снижение потерь активной мощности в молдавской энергосистеме, как правило, приводит к одновременному существенному увеличению этого показателя для украинской энергосистемы. При отключении всех связей по 110кВ прослеживается та же тенденция. Так потери в республиканской энергосистеме снижаются на 8.29÷7.9мВт или 23.5÷24%, в то время как потери в энергосистеме Украины существенно возрастают до величины 81.8÷86.3мВт или (9.0÷9.5%), что весьма существенно.

Табл. 3. Потери активной мощности при различных вариантах отключений

Вариант	**Молдова**				**Украина**			
Тип транзита	**1-цепный транзит**		**2-цепный транзит**		**1-цепный транзит**		**2-цепный транзит**	
Составляющие потерь	ΔP_{Σ}	$\Delta P_{Б}-\Delta P_{\Sigma}$	ΔP_{Σ}	$\Delta P_{Б}-\Delta P_{\Sigma}$	ΔP_{Σ}	$\Delta P_{Б}-\Delta P_{\Sigma}$	ΔP_{Σ}	$\Delta P_{Б}-\Delta P_{\Sigma}$
Базовый вариант	35.34		33.17		907.8		902.5	
откл. Васильевка-Кр. окны	35.02	-0.32(0.9%)	32.86	-0.31(0.9%)	906.9	-0.9(0.0%)	901.6	-0.9(0.0%)
откл. Немия-Атаки	35.44	+0.1(0.3%)	33.26	+0.11(0.3%)	907.5	-0.3(0.0%)	902.2	-0.3(0.0%)
откл. Окница-Шахты	35.25	-0.09(0.2%)	33.14	-0.03(0.1%)	908.2	+0.4(0.0%)	902.7	+0.2(0.0%)
откл. Дн.ГЭС-БСЗ	34.16	-1.18(3.3%)	32.32	-0.85(2.6%)	909.9	+2.1(0.2%)	904.0	+1.5(0.1%)
откл. Нелиповцы-Ларга	35.32	-0.02(0.0%)	33.11	-0.06(0.2%)	907.9	+0.1(0.0%)	902.6	+0.1(0.0%)
откл. МГРЭС-Староказачье	34.13	-1.21(3.4%)	31.95	-1.22(3.7%)	911.1	+3.3(0.4%)	905.7	+3.2(0.4%)
откл. МГРЭС-Беляевка	35.22	-0.12(0.3%)	33.07	-0.3(0.3%)	907.7	-0.1(0.0%)	902.3	-0.2(0.0%)
откл. МГРЭС-Раздельная	35.67	+0.33(0.9%)	33.54	+0.37(1.1%)	907.7	-0.1(0.0%)	902.3	-0.2(0.0%)
откл. МГРЭС-Болград2	32.24	-3.1(8.7%)	30.05	-3.12(9.4%)	925.9	+18.1(2.0%)	919.9	+17.4(1.9%)
откл. МГРЭС-Болград1	41.19	+5.85(16.5%)	38.87	+5.8(17.5%)	910.0	+2.2(0.2%)	904.4	+2.1(0.2%)
Все отключено	**27.05**	**-8.29(23.5%)**	**25.21**	**-7.96(24.%)**	**994.1**	**+86.3(9.5%)**	**984.3**	**+81.8(9.0%)**

Режимы системообразующей сети при отключении всех связей 110кВ с Украиной показаны на рис.3,4 для одноцепного и двухцепного варианта соответственно.

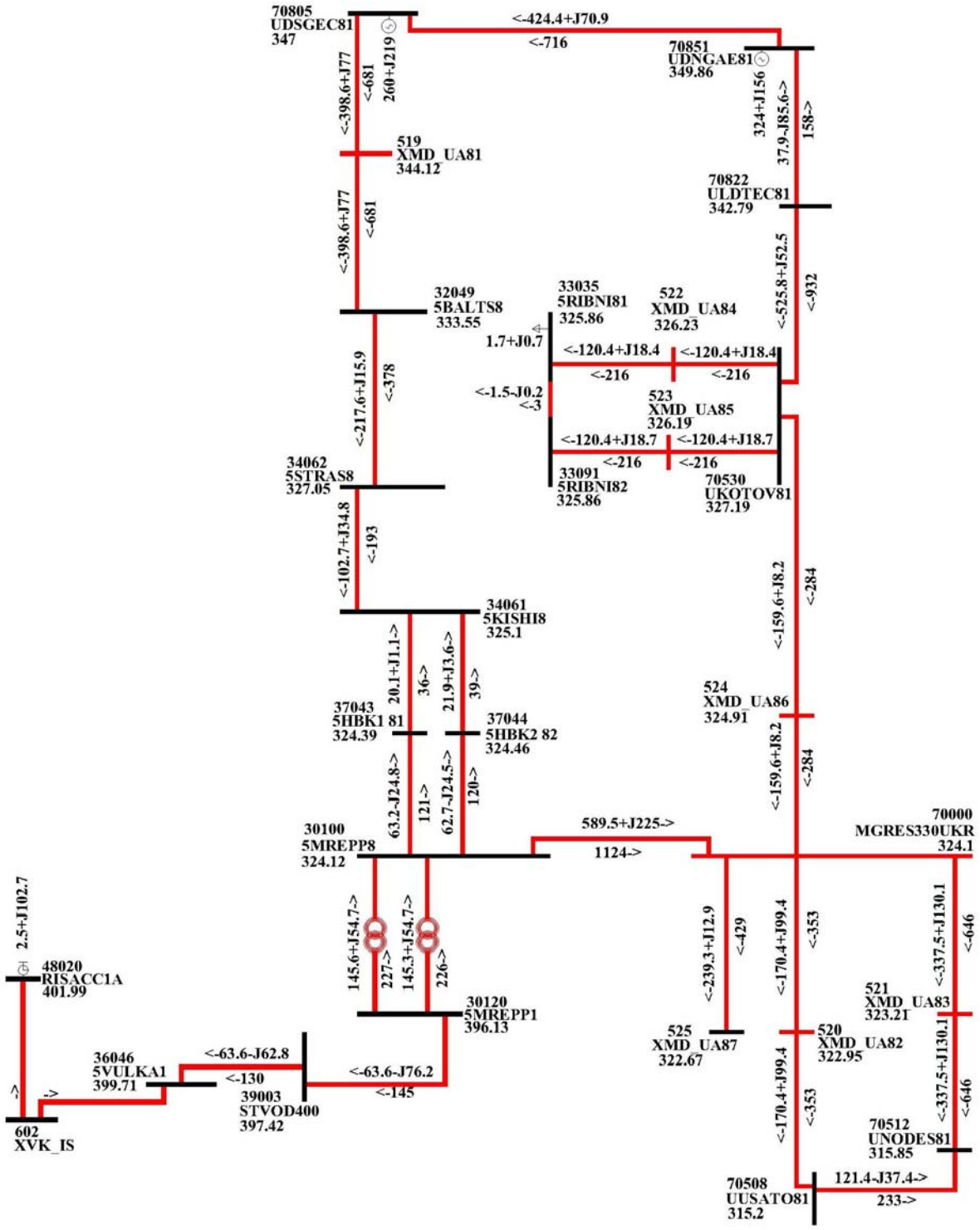

Рис.3. Потокораспределение в транспортной сети Молдовы при отключении всех связей 110кВ с Украиной (вариант одноцепного транзита)

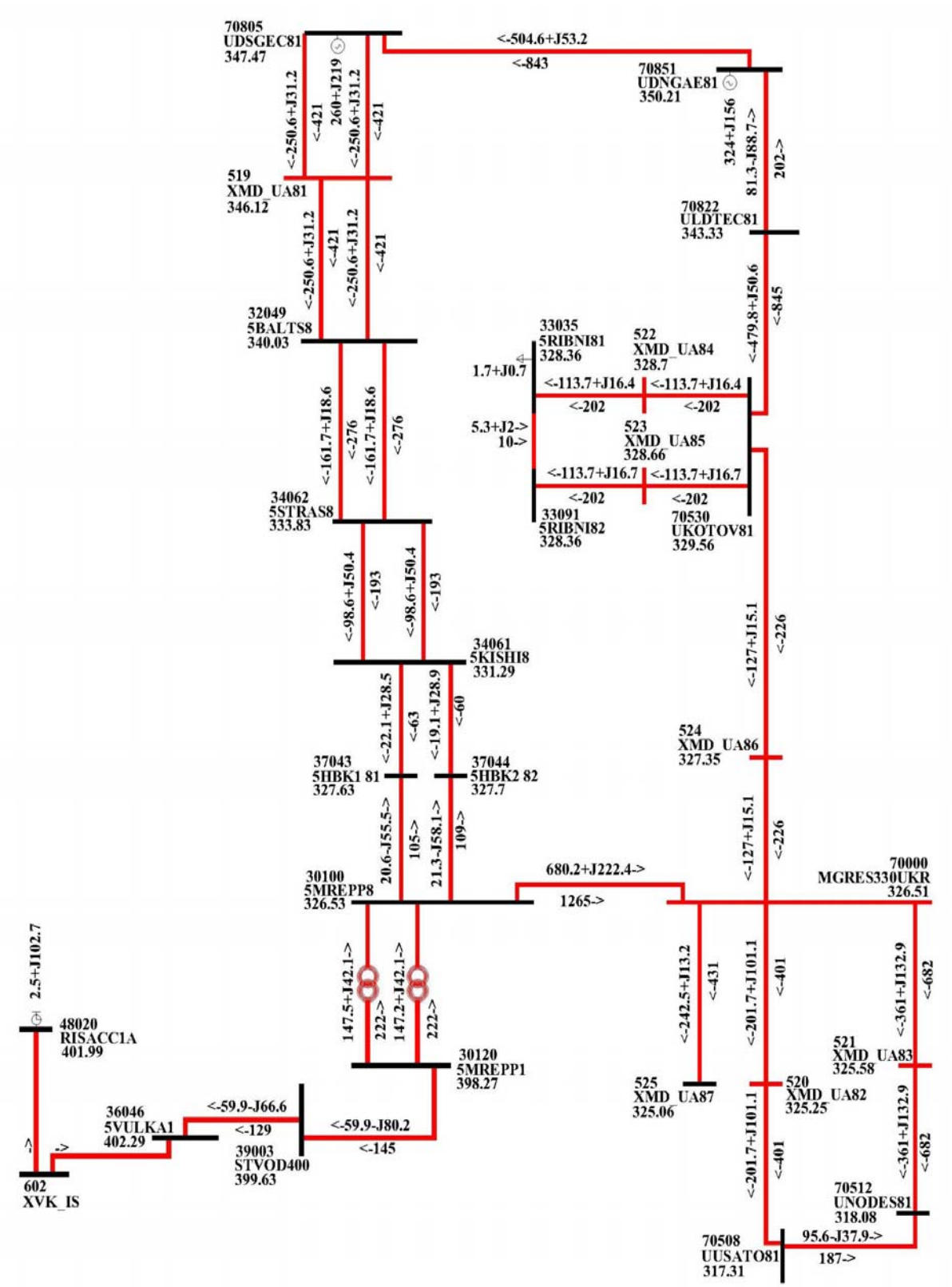

Рис.4. Потокораспределение в транспортной сети Молдовы при отключении всех связей 110кВ с Украиной (вариант двухцепного транзита)

Основные параметры этих режимов приведены в таблице 4, а информация по составляющим потерь в таблице 5.

Табл. 4. Основные характеристики режима

Np-н	Район	Рген	Qген	Рнаг	Qнаг	ΔP	ΔQ	Рвн	Qвн
Одноцепный транзит									
3	**Молдова**	1126,8	373,6	1151,4	434,4	27,0	-193,8	-51,7	133,0
4	**Румыния**	10266,8	2304,6	9416,5	3449,2	280,8	-868,4	569,5	-276,2
7	**Украина**	32417,8	12554,1	30502,3	10046,1	994,1	4197,0	921,3	-1689,0
1	**Остальная сеть**	78260,8	30457,1	77768,9	32591,1	1931,1	-3966,1	-1439,1	1832,2
	ОЭС	**122072,2**	**45689,4**	**118839,1**	**46520,8**	**3233,1**	**-831,4**	**0,0**	**0,0**
Двухцепный транзит									
3	**Молдова**	1126,8	281,1	1151,4	434,4	25,2	-316,0	-49,9	162,7
4	**Румыния**	10266,8	2304,6	9416,5	3449,2	280,8	-868,4	569,5	-276,2
7	**Украина**	32417,8	12459,2	30502,3	10046,1	984,3	4132,0	931,1	-1718,9
1	**Остальная сеть**	78251,0	30477,4	77768,9	32591,1	1932,9	-3945,9	-1450,8	1832,2
	ОЭС	**122062,4**	**45522,3**	**118839,1**	**46520,8**	**3223,3**	**-998,3**	**0,0**	**-0,2**

Табл. 5. Информация по составляющим потерь

	Одноцепный транзит				Двухцепный транзит			
Uн	**ΔPнагр**	**ΔPлэп**	**ΔPтр**	**ΔPхх**	**ΔPнагр**	**ΔPлэп**	**ΔPтр**	**ΔPхх**
Молдова	23,58	20,08	3,5	3,47	21,65	18,27	3,38	3,55
400	0,28	0,12	0,16	0,76	0,26	0,11	0,15	0,77
330	10,64	9,78	0,86	2,29	9,61	8,77	0,84	2,35
110	10,22	10,18	0,04	0,42	9,43	9,39	0,04	0,43

Из информации, представленной в таблице 5 видно, что максимальный эффект снижения потерь создается в сетях 110кВ. Весьма незначительно снижаются потери в сети 400кВ из-за снижения перетока на участке МГРЭС-Вулканешты. В сети 330кВ напротив потери несколько растут, поскольку на них ложится основная нагрузка при отключении ВЛ110кВ.

Заключение

Как показали результаты расчетных экспериментов, степень воздействия межсистемных связей 110кВ на уровень потерь весьма значительна. Видно, что отключение высоковольтных линий, особенно в южной части республики, приводит к существенному (ниже норматива) снижению напряжения в сети 110кВ с украинской стороны. В этом случае, для обеспечения нормального режима и поддержания необходимого уровня напряжения в сети 110кВ, на ПС Измаил и Староказачье были смоделированы источники реактивной мощности. Уровень напряжения на молдавской стороне при разрыве связей по линиям 110кВ с Украиной, остается в пределах нормы.

Учитывая все вышеперечисленное, а также существенное снижение уровня потерь активной мощности в молдавской энергосистеме при ликвидации транзита по 110кВ с

Украиной, теоретически можно говорить об изменении режима работы межсистемных связей 110кВ.

Литература

[1] Варианты развития транспортной сети Молдовы при параллельной работе с энергосистемой Украины. Л.П. Калинин, Д.А. Зайцев, М.С.Тыршу, И.В. Голуб "PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE " Revista electronica № 1(18) (2012)

МЕТАЛЛО-ПОЛИМЕРНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ С МНОГОКАНАЛЬНЫМ АБСОРБЕРОМ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Дорошенко[1)], В.П. Данько[2)], Турбовец Ю.Т [1)]
[1)] Одесская государственная академия холода,
[2)] Донецкий национальный университет экономии и торговли
им. Михаила Туган-Барановского

Аннотация. Разработана новая модификация метало - полимерного жидкостного солнечного коллектора для солнечного теплоснабжения и для создания на его основе многофункциональных энергетических систем, в частности, солнечных холодильных систем. Проведен сравнительный эксперимент нескольких модификаций полимерных коллекторов с привлечением данных ряда зарубежных исследователей и доказана высокая эффективность новой разработки.
Ключевые слова: солнечный коллектор, полимерные материалы, эффективность.

COLECTOARELE SOLARE DE TIP METAL-POLIMER CU ABSORBER MULTICANAL PENTRU SISTEMELE ENERGETICE MULTIFUNCTIONALE

A.V. Doroşenco[1)], V.P. Danico[2)], Iu.T. Turboveţ [1)]
[1)] Academia Naţională de refrigerare din Odesa,
[2)] Universitatea Naţională de economie şi de comerţ Mihail Tugan-Baranovschi

Rezumat. Este elaborată o nouă modificare a colectorului solar de tip lichid-metal-polimer pentru încălzirea solară şi crearea pe baza acestuia sistemelor energetice multefuncţionale, în special, sistemelor solare de refrigerare. A fost efectuat un experiment comparativ al unor modificări ale colectoarelor din polimeri care implică o serie de date ale cercetătorilor străini şi a fost confirmată eficienţa majorată a elaborarii.
Cuvinte-cheie: panouri solare, materiale plastice, eficien□ă.

METAL-POLYMER SOLAR COLLECTORS WITH MULTICHANNEL ABSORBER FOR MULTIFUNCTIONAL MULTIPURPOSE ENERGY SYSTEMS

A. Doroshenko[1)], V. Danko[2)], Y. Turbovets [1)]
[1)] Odessa State Academy of Refrigeration
[2)] Donetsk National University of Economy and Trade named after Mykhaylo Tugan-Baranovsky

Abstract. New modification of liquid-metal-polymer solar collector for solar heating and for creation of multifunctional energy systems on its basis, particularly solar refrigeration systems was developed. A comparative study of several modifications of polymer collectors involving data of a set of foreign researchers was made and high efficiency of the new elaboration was proven.
Keywords: solar collectors, polymer materials, efficiency.

Вопрос о возможности использования полимерных материалов в конструкции солнечных коллекторов (СК) изучается рядом мировых исследовательских центров и фирм-производителей. Существует большое количество полимеров, которые потенциально могут быть использованы в конструкции плоского СК: – полипропилен, полиметилметакрилат, поликарбонат, полисульфон, полиэстерсульфон, полиамид, аморфный полиамид, волокнистые пластики, поливинилхлорид, полиметилпропилен, акрил и др.. Долгосрочное использование СК в открытой среде выдвигает ряд жестких требований к конструкционным материалам. Был выполнен анализ и выбор материалов для создания СК из полимерных материалов. Переход к полимерным материалам в конструкции коллектора обеспечивает снижение веса СК; снижение стоимости СК и гелиосистемы, снижение вредных экологических последствий в полном цикле «жизни» нового типа СК и системы в целом.

Теоретический и экспериментальный анализ полимерного СК с теплоприемником, выполненным из многоканальной сотовой полимерной структуры выполнен в работе [1]. Конструктивное оформление СК представлено на рис. 1А. На практике, при анализе работы СК вводится понятие эффективности коллектора F', представляющей собой отношение термического сопротивления переносу теплоты от поглощающей пластины СК к окружающему воздуху к сопротивлению переносу теплоты от жидкости к окружающему воздуху. Величину F' для рассматриваемой конструкции многоканального СК можно рассчитать по формуле:

$$F' = \frac{1}{\dfrac{b \cdot U}{\pi \cdot D \cdot \alpha_{æ}} + \dfrac{b}{D + (b - D) \cdot F}}, \qquad (1)$$

где b – расстояние между центрами соседних каналов теплоприемника, м; D – внутренний эквивалентный диаметр канала, м; $\alpha_ж$ – коэффициент теплоотдачи от стенки канала к жидкости, Вт/(м^2·К), (обычно в расчетах принимают величину $\alpha_ж \approx$ 300 для естественной, и $\approx$ 1500 для вынужденной конвекции); F – эффективность ребра прямоугольного профиля (так как в многоканальной плите теплоприемника отсутствуют рёбра, то принимаем F = 1). Коэффициент полезного действия СК можно рассчитать по формуле:

$$\eta = \tau \cdot \varepsilon_1 \cdot F' - U \cdot F' \cdot \left[0.5 \cdot \left(t_{æ\,1} + t_{æ\,2}\right) - t_0\right] \Big/ J \qquad (2)$$

где $t_{ж1}$ – температура жидкости на входе в СК, °С; $t_{ж2}$ – температура жидкости на выходе из СК, °С. Если величины U и F' = const, зависимость $\eta_{СК}$ от $\left[0{,}5\times\left(t_{æ\,1}+t_{æ\,2}\right)-t_0\right]\Big/J$ представляет собой прямую линию. Величина $\left[0{,}5\cdot\left(t_{æ\,1}+t_{æ\,2}\right)-t_0\right]\Big/J$ называется приведенной температурой $T_{ПР}$. Характеристики сравниваемых СК приведены в стандартном виде зависимости $\eta_{СК}$ от приведенной температуры, где:

$$\eta_{СК} = f(T_{ПР}),\ \acute{\eta}_{СК} = Q/IF_{СК}\ ;\ T_{ПР} = [0.5(t_{f1} + t_{f2}) - t_0]/J \qquad (3)$$

В работе норвежских ученых [2] исследованы солнечные системы, основанные на новом типе СК из конструкционных пластмасс (рис. 1Б). Верхний слой коллектора толщиной 6 мм (прозрачное покрытие) представляет собой двойной лист из поликарбоната в единой многоканальной структуре СК. Коллектор имеет теплоизоляцию нижней части из слоя минеральной ваты. В совместной работе английских (Univercity of Cambridge) и южноафриканских (Stellenbosch Univercity) исследователей [3] изучались теоретически и экспериментально характеристики полимерного коллектора (рис. 1В), созданного по особой технологии на основе полимерных микрокаппилярных структур «plastic microcapillary films» MCF. Этот материал называется микрокапиллярной пленкой и состоит из полученного выдавливанием гибкой пластиковой пленки с параллельным массивом полых капилляров, расположенных вдоль длины пленки. Процесс производства MCF позволяет получать средний диаметр капилляра, лежащий в пределах 30-500 мкм., и отношение площади поперечного сечения капилляров к полной площади поперечного сечения пленки («пористость») в пределах от 11% до 60%.

Интересна композиция СК, в которой предусмотрено два воздушных зазора, призванных подавлять конвективные и радиационные потоки теряемой основными элементами энергии: традиционный, между верхней поверхностью теплоприемника и нижней пластиной прозрачного покрытия, и дополнительный, между нижней поверхностью теплоприемника и верхней границей теплоизоляции дня СК. Вопрос о таком устройстве СК требует дополнительного изучения, поскольку уровень потерь указанными механизмами естественно снижается в направлении «дна» СК, а дополнительный воздушный зазор приведет к увеличению толщины коллектора, росту его веса (за счет увеличения размеров корпусной части) и стоимости.

На рис.1Г приведена классическая схема потоков энергии (солнечной радиации) приходящей к поверхности теплоприемника СК, поглощаемой основными элементами СК (прозорачным покрытием, абсорбером, теплоизоляцией) и теряемой каждым из этих элементов и отдельными частями каждого элемента конструкции. Вопрос об использовании полимерных микрокаппилярных структур («plastic microcapillary films» MCF) в качестве абсорбера (теплоприемника) СК также требует дополнительного изучения, поскольку при таких малых размерах «каналов» абсорбера (теплоприемника) можно ожидать существенный рост гидравлического сопротивления. Отметим здесь общую тенденцию последних лет к уменьшению размеров каналов тепломассообменной аппаратуры, имеющую место в современных разработках.

Основная масса выпускаемых в мире плоских СК, как показал проведенный обзор, производится из цветных металлов, в качестве прозрачного в них покрытия используется стекло, тяжелый и хрупкий материал. Использование ударопрочных стекол значительно удорожает производство СК. Основные задачи в этой части нашей работы: создать метало-полимерный тип СК/М-П, на основе полимерных материалов из плит сотовой структуры, используемых в качестве прозрачной изоляции ПП; оптимизировать основные геометрические параметры полимерного СК с целью минимизации потерь тепла и сокращения габаритов и веса.

Существует большое количество полимеров, которые потенциально могут быть использованы в конструкции плоского СК: полипропилен, полиметилметакрилат, поликарбонат, полисульфон, полиэстерсульфон, полиамид, аморфный полиамид, различные волокнистые пластики, поливинилхлорид, полиметилпропилен, акрил и др. Долгосрочное использование СК в открытой среде выдвигает ряд жестких требований к выбору материала. При выборе полимерных материалов необходимо руководствоваться следующими требованиями: минимальная оптическая прозрачность материала должна быть не ниже 75%; рабочие температуры (тепловая устойчивость материалов) должны лежать в диапазоне от –15 до +150˚С; материал должен обладать стабильностью к ультрафиолетовому излучению (УФИ). Анализ ПМ показывает, что лишь немногие из них пригодны для такого специфического применения. Полипропиленовые и полистироловые пластмассы непригодны из-за плохих оптических свойств, полисульфон и полиэстерсульфон стабильны к УФИ, но имеют нежелательный желтый цвет и слишком низкую оптическую прозрачность для такого применения. Аморфный полиамид можно сделать довольно прозрачным, но он чувствителен к гидролизу и нестабилен к УФИ. Акрил обладает отличной стойкостью к УФИ, но хрупок и используется только при температурах ниже 90˚С.

В качестве полимера, пригодного к использованию в конструкции металло-полимерного СК для формирования прозрачного покрытия ПП в настоящей работе был выбран поликарбонат, как и в ранее выполненном в ОГАХ исследовании [4]. Плита сотового поликарбоната представляет собой два параллельных листа с поперечными перегородками в цельной единой структуре как показано на рис. 2. Температурный диапазон эксплуатации для поликарбоната: от – 40 до +120˚С, что позволяет

использовать его в «открытых» системах. Максимальное термическое расширение (при $\Delta T = 80^{\circ}C$) составляет 2,5 мм/м. Светопропускная способность полимеров имеет большое значение при их выборе для использования в качестве прозрачного покрытия СК. Панели поликарбоната имеют светопропускание 70 – 82%, в зависимости от их толщины. При длительном воздействии солнечного излучения принципиально важное значение имеет устойчивость материала к УФИ. Современные поликарбонатные панели производятся со специальным покрытием, предотвращающим попадание УФИ внутрь структуры панели. Ультрафиолетовые лучи (диапазон менее 390 нанометров), которые являются наиболее разрушительными, практически не проходят через эти панели. Пропускание лучей в крайней части инфракрасной зоны спектра (более 5000 нанометров), минимально, вследствие чего тепло, излучаемое теплоприемником СК, остается внутри коллектора. По сравнению с другими типами ПП той же толщины тепловые потери через сотовые панели из ПК значительно ниже и тепловая изоляция намного лучше, что определяет экономию топлива и энергии. Сотовые панели из поликарбоната отличаются высокими механическими характеристиками, такими, как твердость и стойкость к ударным воздействиям при длительном содержании на открытом воздухе. Поликарбонат устойчив ко многим химическим веществам, включая минеральные кислоты высокой концентрации, ко многим органическим кислотам, нейтральным и кислым растворам солей, многим жирам, парафинам, насыщенным алифатам и циклоалифатам, кроме метилового спирта. Поликарбонат разрушается водным или спиртовым раствором щелочей, аммиаком или его растворами и аминами. Степень чувствительности к воздействию химических соединений зависит от таких факторов, как концентрация, температура, продолжительность контакта с поверхностью панели, давления, а также напряжений в панели. Это делает поликарбонат приемлемым для создания солнечного коллектора СК-П и особенно коллектора-регенератора СК-Р, где имеет место прямой контакт материала и абсорбента.

Решение узла «прозрачная изоляция - воздушный зазор». В качестве материала для анализа и выбора ПП нами были использованы результаты, полученные В. Костенюком в 2010 году [4]. Работа была посвящена изучению влияния типа и геометрии прозрачного покрытия ПП. Были теоретически и экспериментально рассмотрены следующие варианты СК/П с прозрачным покрытием из полимерных материалов: листовой поликарбонат ПК в одиночном покрытии с воздушным зазором между абсорбером и ПИ (варианты №№5-6); схема СК/П по формуле: «теплоизоляция-абсорбер-воздушный зазор-прозрачная изоляция»; листовой поликарбонат ПК с двойным воздушным зазором между абсорбером и ПИ1, ПИ1 и ПИ2 (варианты №№ 7-8); поликарбонатные многоканальные плиты СПК с одним воздушным зазором и различной толщиной теплоизоляции (варианты СК/П №№ 1-4).

К сожалению, в работе [4] не варьировалась толщина ПП (10мм во всех опытах) и высота воздушного зазора (11 мм). Важнейший для нас вывод по работе [4] касался шага в расположении прозрачных перегородок ПП. При малых значениях этого шага многочисленные перегородки в структуре прозрачного покрытия негативно сказываются на пропускательной способности ПП. Поэтому была принята формула: $l_{пп} \approx 2\text{-}4\ h_{пп}$, при $l_{пп} = 6\text{-}10$ мм.

В работе [3] изучалась возможность оптимальной организации воздушного зазора, в целях подавления естественной конвекции, с помощью специальных вставок сотовой структуры различной геометрии. Общая высота воздушного зазора в опытах была примерно постоянной, составляя ≈ 60мм., при этом сама сотовая вставка из поликарбонатной многоканальной структуры, с каналами квадратной формы со стороной , с каналами квадратной формы со стороной ≈ 10мм. располагалась на

некотором расстоянии от нижней поверхности прозрачного покрытия (от 3 до 6 мм.) и на некотором расстоянии от верхней поверхности абсорбера (от 3 до 12 мм.). Всего было исследовано десять таких комбинаций. Общий вывод состоит в достоинствах такого оформления воздушного зазора и подавления конвективных потерь. Остается открытым вопрос о влиянии многочисленных вертикальных сотовых вставок на пропускательную способность верхней части коллектора (ПП и воздушного зазора).

Решение узла теплоприемника (абсорбера). Важнейшей характеристикой плоского солнечного коллектора является равномерность распределения теплоносителя по каналам теплоприемника.

Неравномерность распределения, как следствие непосредственной близости расположения гидравлических коллекторов (подводящего и отводящего теплоноситель к «трубному регистру» СК) к каналам теплоприемника, оказывается весьма существенной, что имеет следствием и значительную температурную неравномерность. Это может приводить к формированию кризисных ситуаций с теплоносителем, например к формированию паровых пробок в каналах в каналах с минимальным (резко сниженным) расходом теплоносителя. Это явление значительно усиливается при переходе к сплошной многоканальной структуре каналов в многоканальной плите теплоприемника и становится особенно опасным при использовании, в качестве материала для формирования теплоприемника, полимеров, что ставит под сомнение возможность их использования. Этот важнейший вопрос требует специального изучения. Нами, для создания теплоприемника, была использована многоканальная тонкостенная плита из алюминия с размерами каналов, указанными на рис. 2.

Экспериментальные исследования металло-полимерных солнечных коллекторов СК/М-П. Принцип конструктивного оформления металло-полимерных СК/М-П и соответствующие геометрические характеристики его основных элементов приведены на рис. 2. Были разработаны и изготовлены два варианта СК/М-П, с одиночным и двойным прозрачным покрытием, соответственно. Размеры многоканальных плит ПП и высота воздушных зазоров были идентичны и приняты нами по результатам исследования [4]. Экспериментальный стенд был оснащен приборами для фиксации уровня солнечной активности, ветровой нагрузки, температуры и относительной влажности наружного воздуха и комплектом термопар, обеспечивающим замеры температур в баке-теплоаккумуляторе, а также на входе и выходе из СК.

Полученные результаты приведены на рис. 3. Они приведены в виде зависимости эффективности процесса трансформации солнечной энергии в тепловую энергию жидкого теплоносителя от приведенной температуры. В качестве фона для сравнения были использованы результаты исследований В. Костенюка [4] и работ последних лет, посвященных изучению возможностей использования полимеров в конструкции СК. Это данные по работе Martinopoulos G. at al., [1] и данные по работе Sandnes B., Rekstad J. A [2]. Были дополнительно использованы результаты работы Ghoneim A.A. [3].

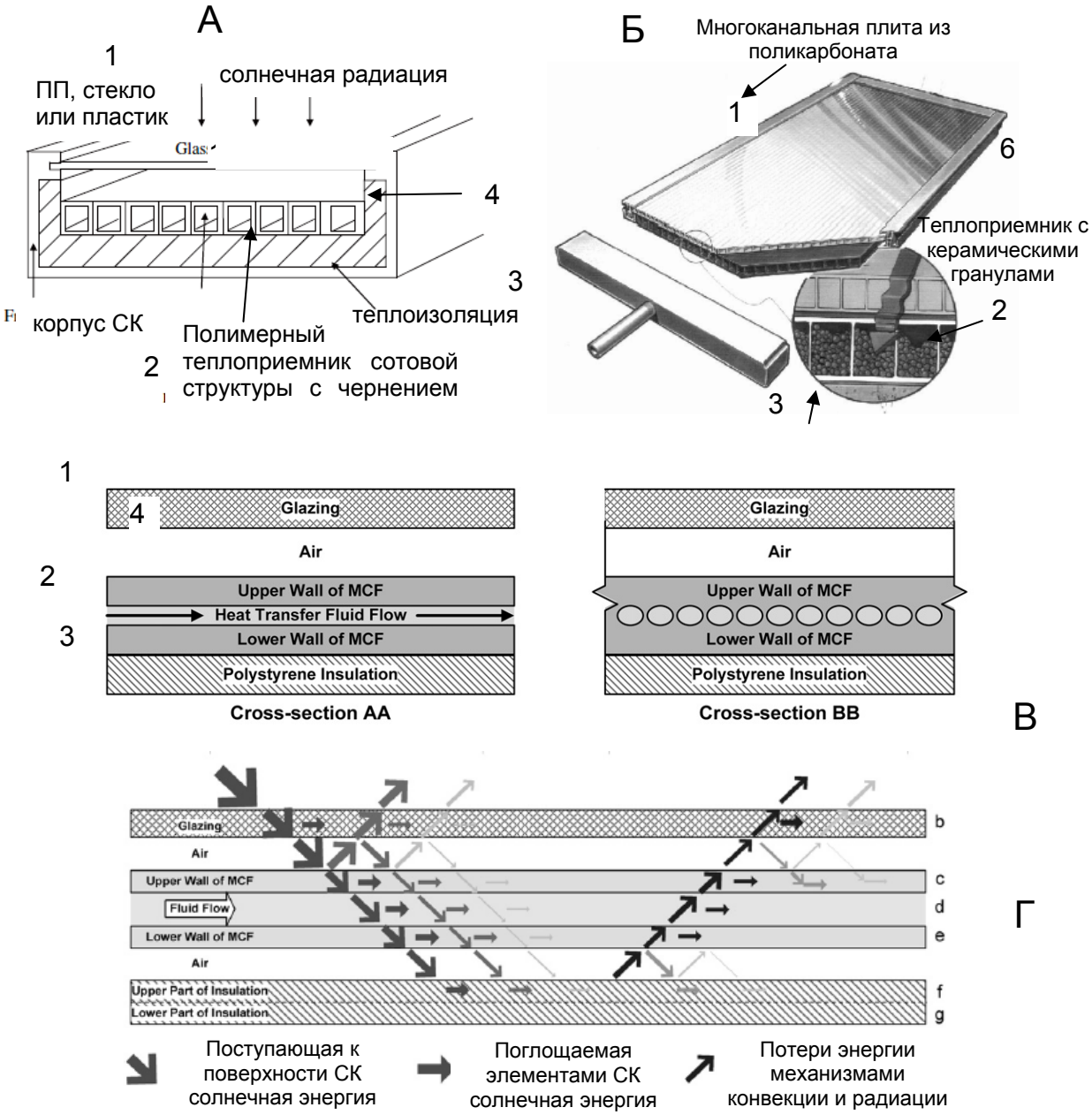

Рисунок 1. Основные варианты разрабатываемых плоских солнечных коллекторов на основе полимерных материалов.

А. Схема полимерного коллектора по работе [1].

Б. Конструкция полимерного коллектора по работе норвежских ученых Nielsen J.E. и Bezzel E [2].

В. Схема полимерного коллектора на основе полимерных микрокаппилярных структур по работе [3].

Обозначения: 1 – прозрачное покрытие; 2 – теплоприемник; 3 – теплоизоляция; 4 – воздушный зазор.

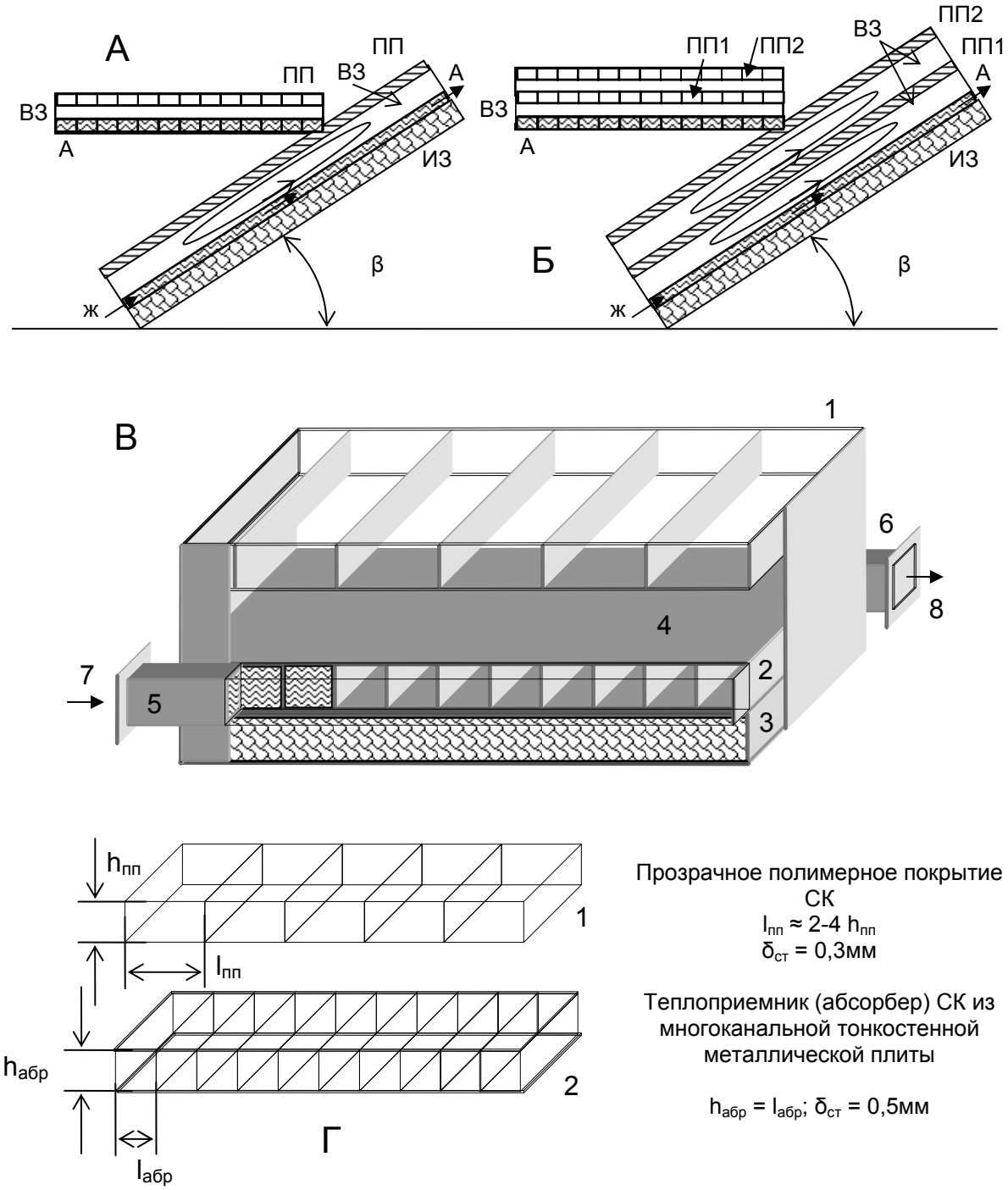

Рисунок 2. Разработанный тип плоского жидкостного металло-полимерного солнечного коллектора СК/М-П из многоканальных плит.

А, Б, В – схемные решения и компоновка СК с одиночным и двойным прозрачным покрытием, соответственно; Г – основные элементы солнечного коллектора СК/М-П.

Обозначения: 1 – прозрачное покрытие; 2 – элементы (секции) теплоприемника (абсорбера); 3 – теплоизоляция; 4 – воздушный зазор между теплоприемником (абсорбером) и прозрачным покрытием; 5, 6 – гидравлический коллектор; 7, 8 – жидкий теплоноситель

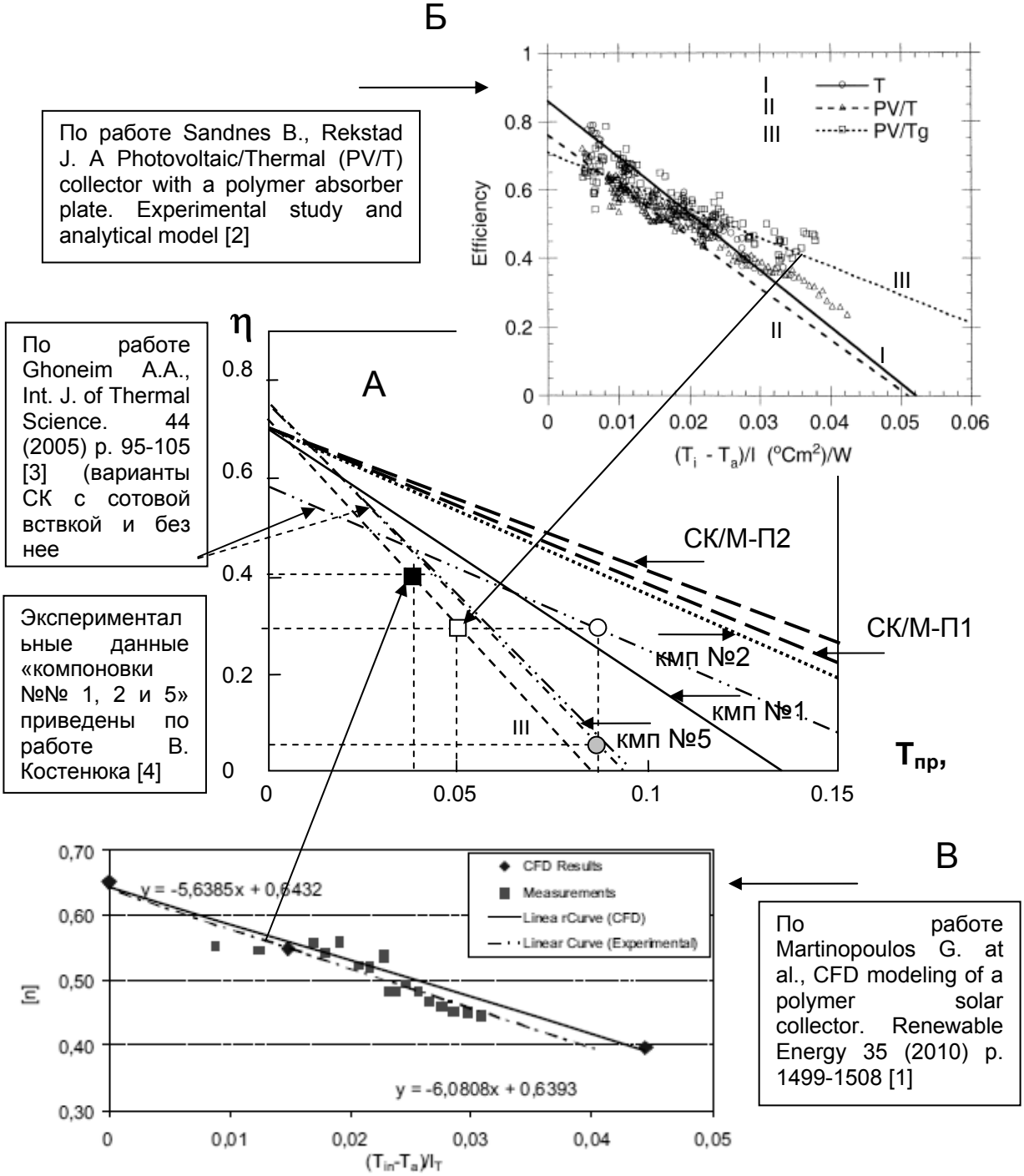

Рисунок 3. Сравнительная эффективность полимерных солнечных коллекторов (по работам В. Костенюка [4], Sandnes B., Rekstad J. [2], Martinopoulos G. at al. [1] и Ghoneim A.A. [3]. Экспериментальные данные по металло-полимерным модификациям СК/М-П приведены по данным автора [4]

Выводы

1. В целом, имеющиеся немногочисленные к настоящему времени экспериментальные данные по эффективности плоских СК с использованием в их конструкции полимеров, находятся в хорошем соответствии;
2. Использование вставок сотовой структуры в воздушный зазор, в целях подавления естественной конвекции, в целом аналогично применению многоканальных полимерных плит сотовой структуры в качестве прозрачного покрытия коллектора по работе [4]; общий вывод состоит в достоинствах такого оформления узла «прозрачное покрытие - воздушный зазор» в целях подавления конвективных потерь; остается открытым вопрос о влиянии многочисленных вертикальных стенок такой сотовой вставки на пропускательную способность верхней части коллектора (ПП и воздушного зазора);
3. Важнейшей характеристикой плоского солнечного коллектора является равномерность распределения теплоносителя по каналам теплоприемника; неравномерность распределения теплоносителя может иметь следствием и значительную температурную неравномерность, что может приводить к формированию кризисных ситуаций, например к формированию паровых пробок в каналах в каналах с минимальным расходом теплоносителя; это явление значительно усиливается при переходе к сплошной многоканальной структуре каналов и становится особенно опасным при использовании, в качестве материала для формирования теплоприемника, полимеров, что ставит под сомнение возможность их использования для формирования абсорбера СК, без дополнительного изучения вопроса.
4. Переход на металло-полимерный вариант СК/М-П ожидаемо улучшил характеристики преобразования солнечной энергии, сравнительно с лучшим вариантов СК/П по работе [4] (компановка №2 по табл. 2.5 с максимальной толщиной теплоизоляции); этот выигрыш невелик, но в настоящее время оправдан отмеченным выше возможным влиянием неравномерности на устойчивость и надежность системы в целом;
5. Использование двойного прозрачного покрытия в конструкции СК/М-П повышает эффективность коллектора, но приводит к увеличению его толщины, веса и стоимости.

Литература

[1] Martinopoulos G. at al., CFD modeling of a polymer solar collector. Renewable Energy 35 (2010) p. 1499-1508.
[2] Sandnes B., Rekstad J. A Photovoltaic/Thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. Solar Energy. 72, №1 (2002) p. 63-73
[3] Ghoneim A.A., Performance optimization of solar collector equipped with different arrangements of square-celled honeycomb. Int. J. of Thermal Science. 44 (2005) p. 95-105.
[4] Костенюк В.В. Тепловые испытания полимерных солнечных коллекторов / В.В. Костенюк, А.В. Дорошенко // Холодильна техніка та технологія. - 2010. - №4. - С. 54-59.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦИОННО-ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Шит М.Л., Иойшер А.М., Шит Б.М.
Институт Энергетики АН Молдовы

Аннотация. Разработаны схемы пастеризационно-охладительных установок для молочных продуктов с тепловыми насосами на диоксиде углерода. Схемы отличаются от известных схем возможностью использования дополнительного полезного тепла, например, для нагрева воды при выполнении основного технологического процесса.
Ключевые слова: тепловой насос, пастеризационно-охладительная установка, молоко, термодинамический цикл, диоксид углерода.

POMPA DE CĂLDURĂ PE DIOXID DE CARBON ÎN CICLUL TRANSCRITIC PENTRU O INSTALAȚIE DE PASTEURIZARE □I RĂCIRE A PRODUSELOR LACTATE

Şit M.L., Ioişer A.M., Şit B.M.
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. Sunt elaborate schemele instalațiilor de pasteurizare □i răcire a produselor lactate cu utilizarea pompelor de căldură pe dioxid de carbon ca agent frigorific. Schemele se deosebesc de la cele cunoscute prin asigurarea posibilității utilizării surplusului de căldură pentru prepararea apei calde concomitent cu asigurarea calită□ii procesului tehnologic.
Cuvinte-cheie: dioxid de carbon, pompa de căldură, instalație de pasteurizare, ciclu termodinamic.

CARBON DIOXIDE HEAT PUMP IN TRANSCRITICAL CYCLE FOR INSTALLATION FOR PASTEURIZATION AND COOLING OF DAIRY FOODS

Sit M.L., Ioisher A.M., Sit B.M.
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. There are elaborated schemes of installations for pasteurization and cooling of dairy foods with heat pumps introduced in there schemes. Schemes distinguish oneself by the possibility of using of additional useful heat for getting hot water for technological purposes.
Keywords: heat pump, installation for pasteurization and cooling, dairy foods, thermodynamic cycle, carbon dioxide.

1. Введение

Энергетическая безопасность и борьба с изменениями климата является целями социально-экономического развития государства. Повышение энергоэффективности в молочной промышленности является целью работы, как разработчиков оборудования, так и эксплуатационного персонала. Для снижения потребления как электрической, так и тепловой энергии при пастеризации и охлаждении молочных продуктов предлагается интегрировать теплонасосные установки (ТНУ) в схемы пастеризационно-охладительных установок (ПОУ) [1-9]. Однако, надо признать, что работы в этом направлении еще не достигли уровня достаточного для внедрения в промышленность, хотя внимание к ним обращено, начиная с 1980 г. (см. библиографию к [2-8]). В данной работе рассматривается ряд схем ПОУ, использующих ТНУ на экологически чистом хладагенте - диоксиде углерода с ТНУ. В работе [9] рассматривалась применимость теплонасосных установок для пастеризации молока для производства сыра и производится сопоставление этих установок с классическими пастеризационно-охладительными установками. В этой же работе приводится анализ применения ТНУ в молочной промышленности до 2004 г. В установке, описанной в этой работе, молоко

нагревали от 16...33 ^{o}C до 72 ^{o}C и охлаждали до 32 ^{o}C. Максимальное значение COP установки было равным 3,1. Установка представляла собой классическую схему ТНУ с одним испарителем, одним конденсатором и рекуперативным теплообменником. В работах [4,5] рассмотрена схема с использованием в контуре ТНУ рекуперативного теплообменника. В этой схеме рассматривался режим охлаждения молока до 3 ^{o}C при температуре молока на входе 15 ^{o}C, с температурой рабочего тела на входе в конденсатор ТНУ 70 ^{o}C и с дополнительным нагревателем молока после конденсатора (в нагревателе использовался внешний по отношению к ТНУ теплоноситель) с температурой до 72 ^{o}C. В работе [9] рассматривалась каскадная ТНУ, в которой холод, вырабатываемый в нижней ступени, расходовался на охлаждение молока и холодоснабжение хранилища готовой продукции, а горячая вода с температурой 90°C использовалась для пастеризации молока, горячего водоснабжения и отопления. Эта схема не предусматривала использование модульных пастеризационно-охладительных установок.

В [6] приведена схема, где ТНУ используется для получения ледяной воды на испарителе и горячей воды 85 ^{o}C на конденсаторе с последующей подачей воды на пастеризационно-охладительную установку. Недостатком такой схемы является ограничение по температуре входного молока (10°C), а также низкий COP из-за высокой разности температур между испарителем и конденсатором. Кроме того, расположение испарителя в баке для ледяной воды требует использования дополнительного насоса для обеспечения ее циркуляции, что увеличивает электрическую мощность, потребляемую установкой. Схема охлаждения молока в [6] имеет эффективность более низкую, чем схема с прямым охлаждением молока в испарителе. Нами рассматривается режим пастеризации и охлаждения молока с температурами на входе и выходе 4 ^{o}C и с температурой пастеризации 78 ^{o}C, который дополняет схемы ПОУ с ТНУ [2-9].

Рассмотрены три схемы ТНУ:

- с использованием эжектора для условий стран с холодным климатом, когда температура воды из трубопровода холодного водоснабжения не выше 10 ^{o}C (эта же схема может быть использована при пастеризации молока для производства из него сыра);
- схема ПОУ с ТНУ для климатических условий, при которых температура водопроводной воды изменяется от 4 ^{o}C до 24 ^{o}C (в этой схеме использовано два испарителя, включенных параллельно);
- и схема ТНУ с использованием детандера (или турбины, работающей на цикле ORC) и вихревой трубы и с одним испарителем.

Особенностью первых двух схем является не только получение экономического эффекта за счет разницы в цене на природный газ и электрическую энергию, но и получение дополнительно горячей воды для технологических или санитарных целей. Особенностью третьей схемы является возможность получения, кроме дополнительной тепловой, еще и дополнительной электрической энергии при тех же затратах энергии на привод компрессора, что и в первых двух вариантах схем установок. Однако третья схема более сложная и дорогостоящая.

2. **Варианты схем пастеризационно-охладительных установок с тепловым насосом и их температурный режим**

Типовая схема пастеризационно-охладительной установки приведена на рис.1. Здесь: 1 - секция пастеризации, 2,3 - секции рекуперации, 4 - секции охлаждения. На схеме условно показана одна секция; часто в установках используют две последовательные секции - одна охлаждается водой при температуре 8°C, а - вторая ледяной водой (или

рассолом) при температуре 1-2 °С. Производительность установки - 10000 л/час. $T1 = 277K; T4 = 349K; T3 = 331K; T6 = 295K; T7 = 277K$. Кратность расхода воды с температурой 8 °С, охлаждающей молоко от 22 °С до 10 °С, $k_V = 4$, а кратность расхода ледяной воды с температурой 1 °С, охлаждающей молоко от 10 °С до 4°С, $k_{LV} = 3$.

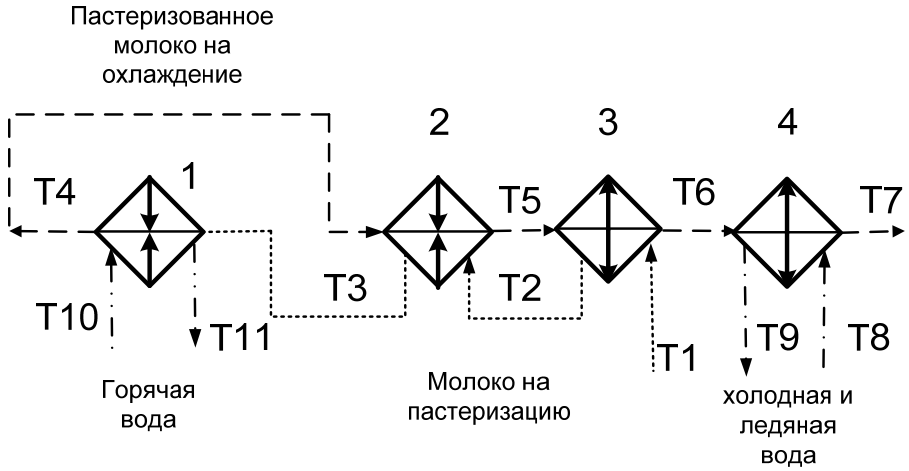

Рис. 1. Принципиальная схема установки для пастеризации и охлаждения молока.

В существующих установках в секции пастеризации молоко нагревается от 63 °С до 74-86 °С при выработке питьевого молока (или до 86-88 °С при пастеризации кефира). Охлаждение молока производится от 22 °С до 4 °С в секциях охлаждения. Молоко насосом подается в секции регенерации, где нагревается за счет теплообмена с горячим молоком, идущим от секции пастеризации до температуры 61- 63°С а оттуда в секцию пастеризации, где за счет теплообмена с горячей водой нагревается до температуры 78°С. В выдерживателе молоко находится в течение 25-300 с и далее пастеризованное молоко проходит секции регенерации, для отдачи тепла встречному потоку молока, поступающему в аппарат, и его температура снижается до 20...25 °С. Далее это молоко проходит последовательно секции охлаждения от холодильной установки. Холодное молоко поступает для хранения в танки. Выдерживатель в установке служит для усиления пастеризационного эффекта.

Установка с двумя испарителями (рис.2) состоит из компрессора 1, газоохладителя 2, рекуперативного теплообменника рабочего тела 3, теплообменника дополнительного подогрева рабочего тела 4, регулирующих клапанов 5, 6, 7 испарителей 8 и 9, эжектора 10, рекуперативного теплообменника на линии подачи холодного молока 11 и теплообменника подогрева воды для технологических нужд 12. Регулирующий клапан 13 служит для температурного регулирования режима работы теплообменника поз.4. Выдерживатель молока после пастеризации на схеме явно не показан и размещен между аппаратами 2 и 11. «Точечные» линии на рис. 1 обозначают трубопроводы горячей воды для технологических или санитарных нужд. Штрих - пунктирными линиями показаны трубопроводы подачи молока, линии черного цвета – трубопроводы хладагента. Числа черного цвета в кружках обозначают температуры сред, числа с подчерком - нумерация аппаратов в соответствии со схемой, числа черного цвета – точки соответствия схемы ТНУ и схемы термодинамического цикла.

Схема работает следующим образом. Молоко поступает через рекуперативный теплообменник 11 на газоохладитель 2, где нагревается до 78°С. Далее молоко после теплообменника 11 поступает на теплообменник 4, где охлаждается рабочим телом, подогревая его, и поступает далее на теплообменник 12 и испарители 8 и 9, где охлаждается до 4 °С.

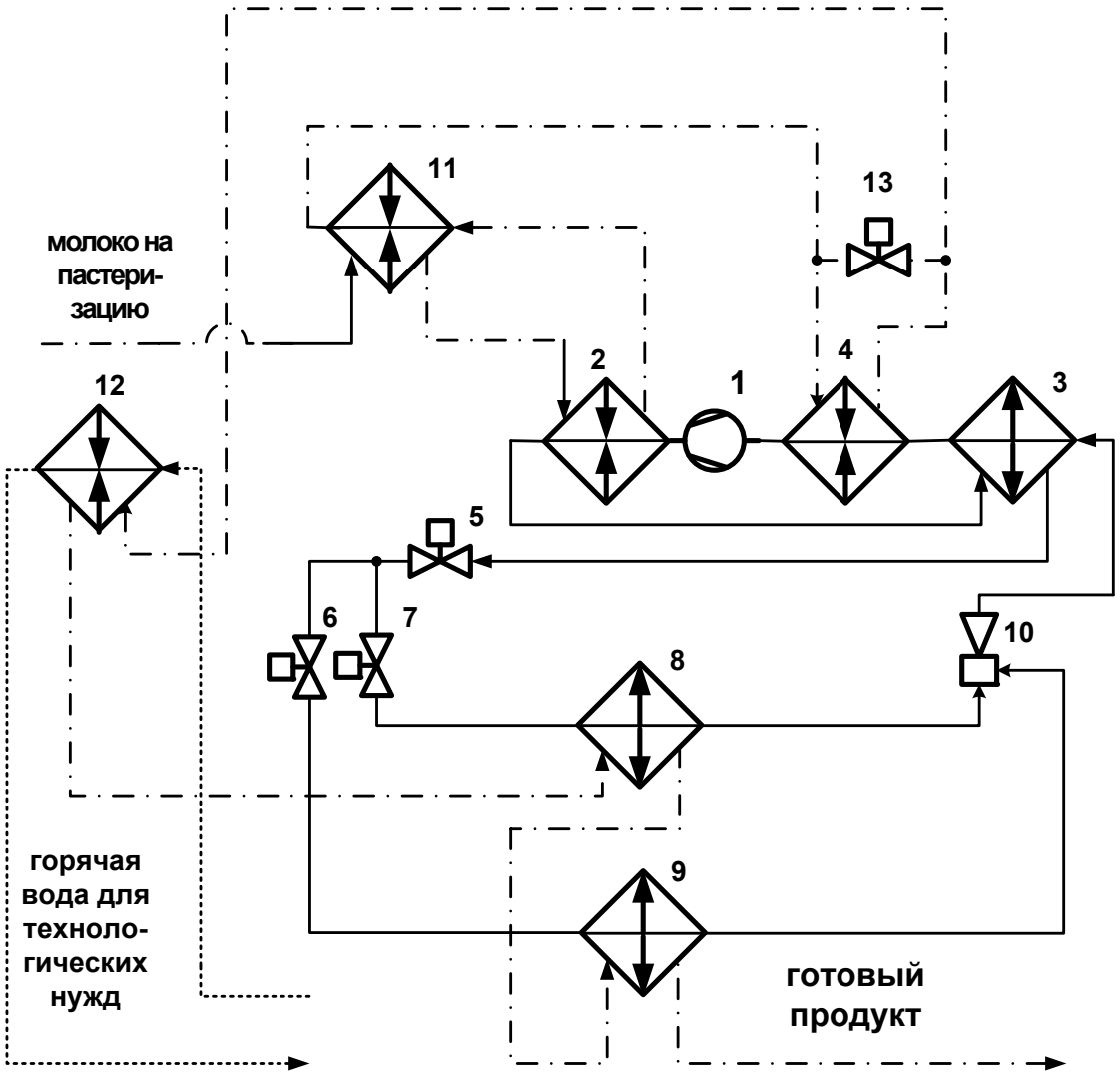

Рис. 2. Принципиальная схема пастеризационно-охладительной установки с двумя испарителями в контуре теплового насоса

После теплообменника 11 можно получить (при расходе молока 2,78 л/с) до 360 кВт тепловой мощности для нагрева водопроводной воды. Теплообменник 12 должен быть выполнен с переменной поверхностью теплообмена. Регулирование расходов и давлений на испарителях показано в виде одного регулирующего вентиля (конструктивно узел регулирования расходов должны быть выполнен в виде двух регуляторов - одного регулятора расхода и второго - регулятора давления [10]).

В схеме установки по рис. 2 производится дополнительный подогрев хладагента перед компрессором (с целью повышения COP). Для рассматриваемого варианта исходных данных COP=4,65. Нами рассматривался вариант схемы с двухступенчатым компрессором и охлаждением промежуточного теплообменника (между двумя ступенями компрессора) водой, с последующим подогревом этой воды в дополнительном теплообменнике, связанном с рекуперативным теплообменником молока 12. В этом случае можно получить значение COP=5,24, но так как нам пока не известны двухступенчатые компрессоры на диоксиде углерода, выпускаемые промышленностью, то этот вариант подробно не рассматривается. Схема установки с двумя испарителями позволяет работать в более широком диапазоне температур воды, чем схема с одним испарителем, хотя и является более сложной. Как отмечается в [18]

среднегодовой расход воды на 1т выработанного молока составляет 4,5…5,5 тонн. При работе установки по рис.2 на 1 т. молока вырабатывается около 0,6 т. горячей воды. Эту воду можно использовать после ее подогрева до 80°С для мойки оборудования, емкостей, ванн, молочных цистерн и фляг. Термодинамический цикл работы установки в соответствии со схемой на рис.2 в Н, р – диаграмме представлен на рис.3, а параметры узловых точек этого термодинамического цикла сведены в табл. 1.

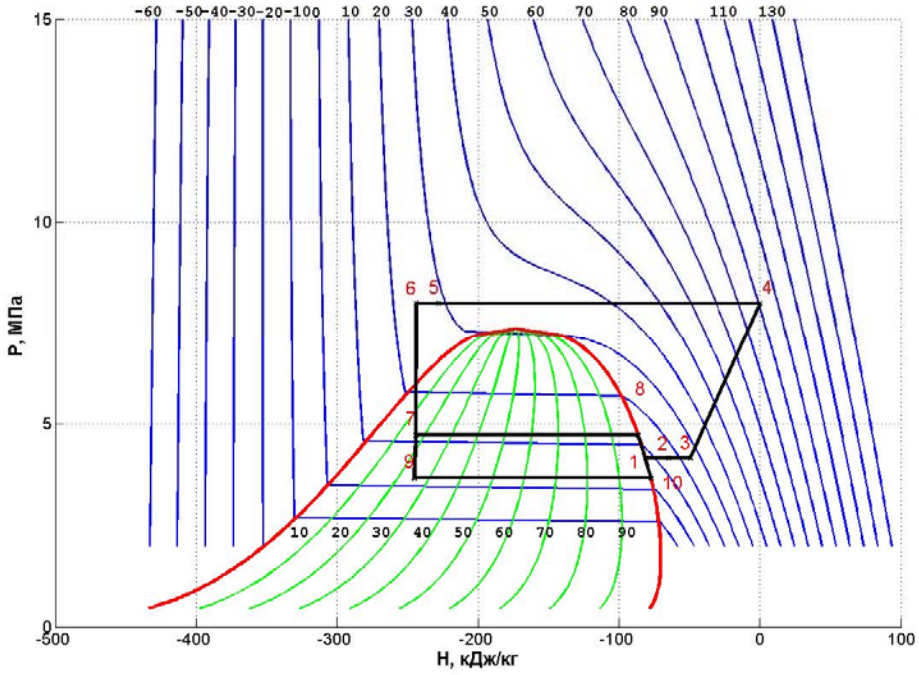

Рис. 3. Термодинамический цикл работы установки по схеме на рис.2.

Таблица 1. Параметры узловых точек термодинамического цикла, на рис.3.

№ п/п	$T, ^oC$	$P, МПа$	$G, \%$	$H, кДж/кг$	$S, кДж/кг$
1	7,0	4,17	100,0	-80.846	-0.934
2	15,0	4,17	100,0	-65.108	-0,879
3	25,0	4,17	100,0	-49,149	-0,824
4	90,64	8,0	0	0.133	-0,769
5	29,0	8,0	0,0	-228,080	-1,484
6	25,0	8,0	0,0	-244,108	-1,538
7	12,0	4,72	16,60	-244,291	-1,522
8	12,0	4,72	100,0	-86,032	-0,967
9	2,0	3,67	25,25	-245,315	-1,516
10	2,0	3,67	100,0	-77,179	-0,905

Рассмотрим вариант схемы ТНУ с одним испарителем и эжектором, включенным между газоохладителем и испарителем, см. например, [10], который может быть применен в пастеризационно-охладительных установках (рис.4). В такой установке двухфазный поток поступает в эжектор в состоянии 7 и расширяется до состояния 8. Потоки с состояниями 7 и 14 смешиваются при постоянном давлении до состояния 9. Смесь выходит из диффузора эжектора в состоянии 1. Процесс перехода из состояния 9 в состояние 10 (перед диффузором) считается изоэнтропическим с КПД $\eta_d = 0,8$.

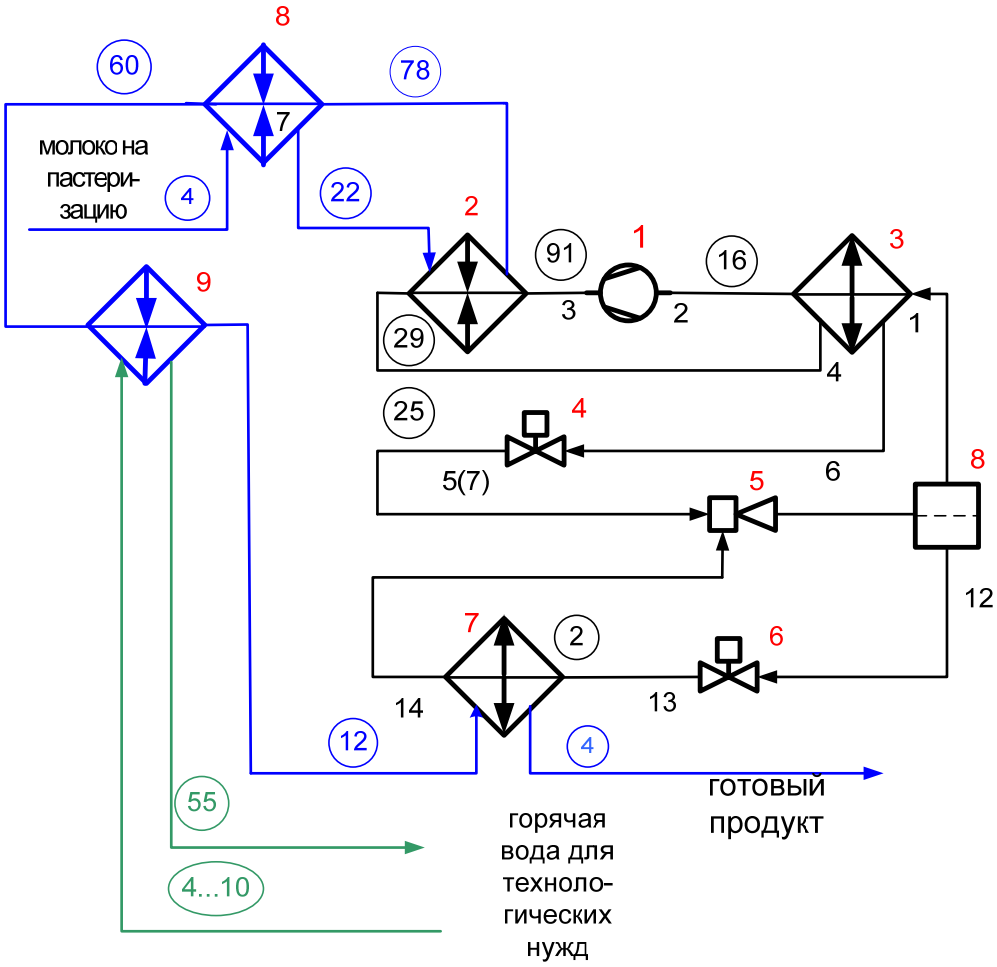

Рис. 4. Принципиальная схема установки для пастеризации - охлаждения молока с тепловым насосом, использующим эжектор.

Поток после эжектора поступает в отделитель жидкости, где он разделяется на насыщенную жидкость и насыщенный пар (состояния 12 и 14). Насыщенная жидкость поступает на регулирующий клапан 6 и расширяется до состояния 13. Насыщенный пар хладагента поступает в рекуперативный теплообменник. Схема эжектора представлена на рис. 5.

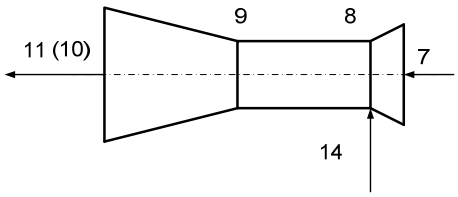

Рис. 5. Схема эжектора (числа соответствуют номерам точек цикла установки на рис.4).

Схема на рис.4 может быть применена при условии, что температура водопроводной воды находится в диапазоне 4...24°С при необходимости охлаждения молока до 15...32°С. Это связано с допустимой разностью температур молока на входе в испаритель и температурой хладагента в испарителе. Значение COP этой схемы определяется температурой газа на входе в компрессор, изоэнтропическим КПД

компрессора и давлением в газоохладителе. Часть теплоты молока передается в теплообменнике 9, в котором молоко охлаждается от 60°С до 12°С, а вода подогревается для технологических целей. При этом дополнительно экономится тепловая энергия по сравнению с вариантом установки без теплового насоса. Термодинамический цикл работы установки в соответствии со схемой на рис.4 в Н, р – диаграмме представлен на рис.6,

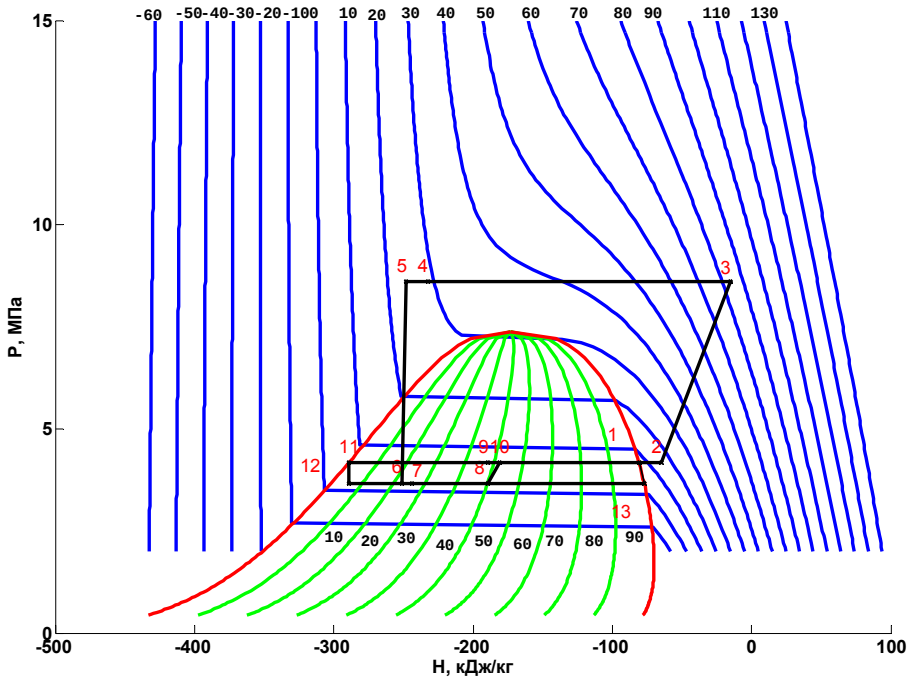

Рис. 6. Термодинамический цикл работы установки по схеме на рис.4.

Хладагент после компрессора 1 поступает в газоохладитель 2, далее на рекуперативный теплообменник 3, регулирующий клапан 4 и эжектор 5. Двухфазная смесь после эжектора 5 поступает на отделитель жидкости 8, а на нагрузочный вход эжектора 5 поступает газ от испарителя 7, режим которого определяется регулирующим клапаном 6. Молоко поступает через рекуперативный теплообменник 8 на газоохладитель 2, и далее на теплообменник 9 для подогрева воды для технологических целей и далее на испаритель. Теплообменник 9 играет роль стабилизатора температуры молока, поступающего на испаритель, и компенсирует возмущения по температуре водопроводной воды, расходу молока, температуре молока после газоохладителя.

В таблице 2 приведены параметры, характеризующие термодинамический цикл ТНУ, схема которого представлена на рис.4.

Третьим вариантом схемы является схема с подогревом воды с помощью вихревой трубы (рис.7) и генерацией дополнительной электрической энергии с помощью детандера или турбины на органическом цикле Ренкина (ORC). Этот вариант, хотя и является более сложным и дорогостоящим, обладает рядом существенных преимуществ. Здесь поз.9 - трехпоточная вихревая труба, поз.10,11, - теплообменники для подогрева воды для санитарных и других нужд предприятия. Установка работает следующим образом. Компрессор 1 подает газ на газоохладитель 3. Газоохладитель 3 связан с первичным контуром рекуперативного теплообменника 2, который через регулирующий клапан 4 и вторичную цепь теплообменника 5 связан с детандером 6,

который нагружен через теплообменник охлаждения газа (он одновременно выполняет функцию нагрева воды для технологических целей) на вихревую трубу 9.

Таблица 2. Параметры узловых точек термодинамического цикла на рис.6

№ п/п	$T, ^oC$	$P, МПа$	$G, \%$	$H, кДж/кг$	$S, кДж/кг$
1	7	4,17	100,0	-80,846	-0,934
2	15	4,17	100,0	-65,108	-0,879
3	83,84	8,60	0,0	-15,20	-0,822
4	29,0	8,60	0,0	-232,365	-1,501
5	24, 55	8,60	0,0	-247,960	- 1,553
6	2,0	3,67	22,60	-251,276	-1,538
7	2,0	3,67	25,80	-244,078	-1,512
8	2,0	3,67	50,0	-189,645	-1,314
9	7,0	4,17	48,0	-189,241	-1,321
10	7,0	4,17	52,0	-180,989	-1,292
11	7,0	4,17	0,0	-289,371	-1,679
12	2,0	3,67	5,7	-289,289	-1,676
13	2,0	3,67	100,0	-77,179	-0,905

Вихревая труба 9 через регулирующий клапан 14 связана с испарителем 10. Горячий поток из вихревой трубы поступает в теплообменник 11, который служит для нагрева воды для технологических нужд завода. С выхода холодного потока вихревой трубы поступает приблизительно 70% общего расхода хладагента. Теплообменник 12 служит для подогрева газа, поступающего на вход компрессора с использованием теплоты молока, выходящего из рекуперативного теплообменника 2.

Если предположить, что путем конструктивных решений удастся охладить газожидкостную смесь на выходе из вихревой трубы на 9,6^{o}C (с 22,6^{o}C до 12°C), и на выходе горячего газа из вихревой трубы можно получить температуру до 60°C, то в рассматриваемом случае станет возможным (при том, что на испаритель будет подано 35% от массового расхода компрессора) получить до 100 кВт дополнительной тепловой мощности для получения воды для технологических целей.

Таблица 3. Параметры узловых точек термодинамического цикла установки с детандером и вихревой трубой

№ п/п	$T, ^oC$	$P, МПа$	$G, \%$	$H, кДж/кг$	$S, кДж/кг$
1	19,00	4,5	100,0	-64,950	-0,888
2	90,48	9,50	100,0	-13,269	-0,830
3	28,00	9,50	100,0	-240,085	-1,531
4	21,50	9,50	0,0	-259,342	-1,595
5	21,30	9,40	0,0	-259,685	-1,596
6	70,00	9,40	0,0	-48,142	-0,928
7	39,12	6,10	0,0	-58,456	-0,906
8	22,60	6,08	13,0	-224,40	-1,461
9	2,0	3,67	31,91	-230,281	-1,461
10	2,0	3,67	100,0	-77,179	-0,905
11	13,0	3,67	100,0	-58,380	-0,838
12	15,0	3,67	100,0	-55,377	-0,827
13	59,0	3,67	0,0	-0,78	-0,651

Следует отметить, что применение данной схемы при пастеризации при температуре 90-95°С позволит получить еще больше электрической и тепловой энергии и использовать вместо детандера турбину на органическом цикле Ренкина (ORC). При использовании в схеме турбины, работающей в ORC, схема включения вихревой трубы 9 и теплообменника 8 принципиально не изменится. Изменятся только режим их работы. Также значительно увеличится стоимость установки.

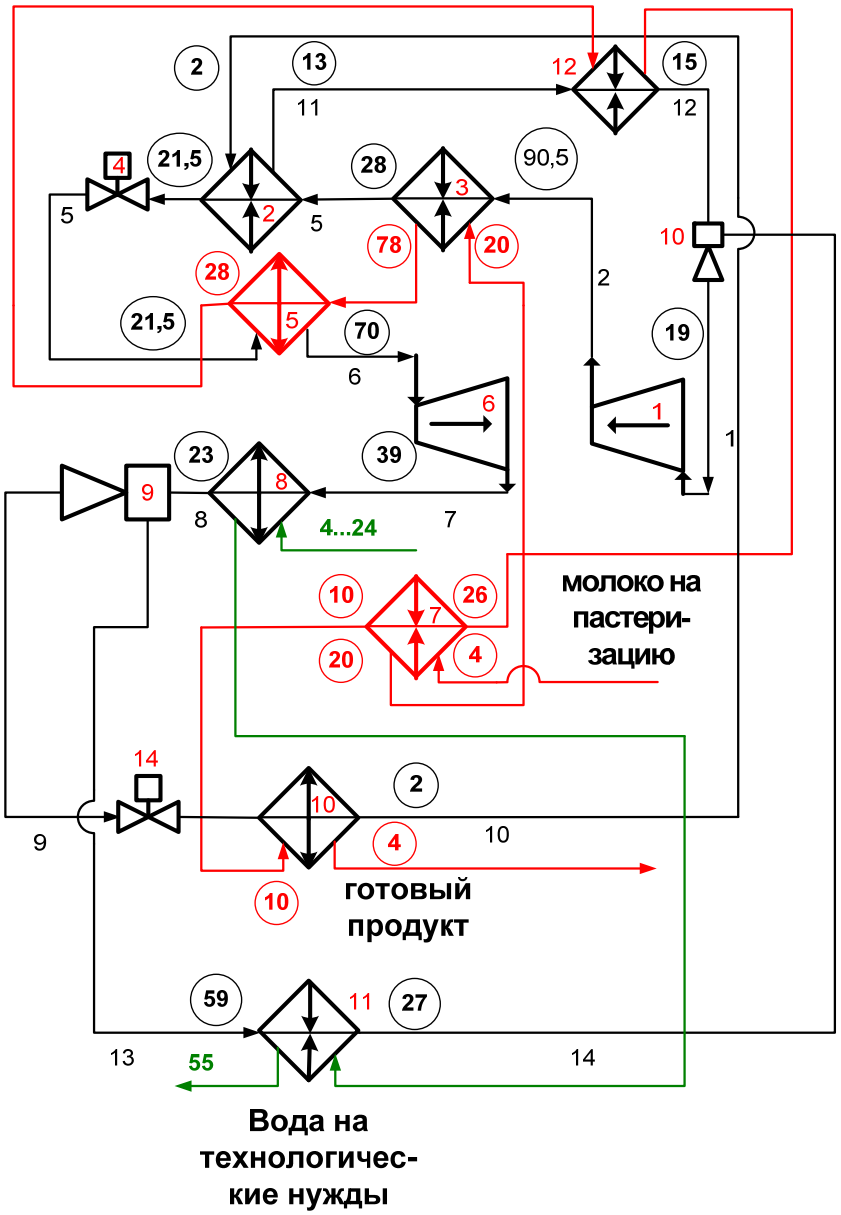

Рис. 7. Принципиальная схема установки для пастеризации - охлаждения молока с тепловым насосом с детандером и вихревой трубой.

Из анализа данных таблицы 3 можно рассчитать COP установки: COP=4,39. Объем электрической энергии, генерируемой генератором детандера, составляет около 20% от энергии, потребляемой компрессором.

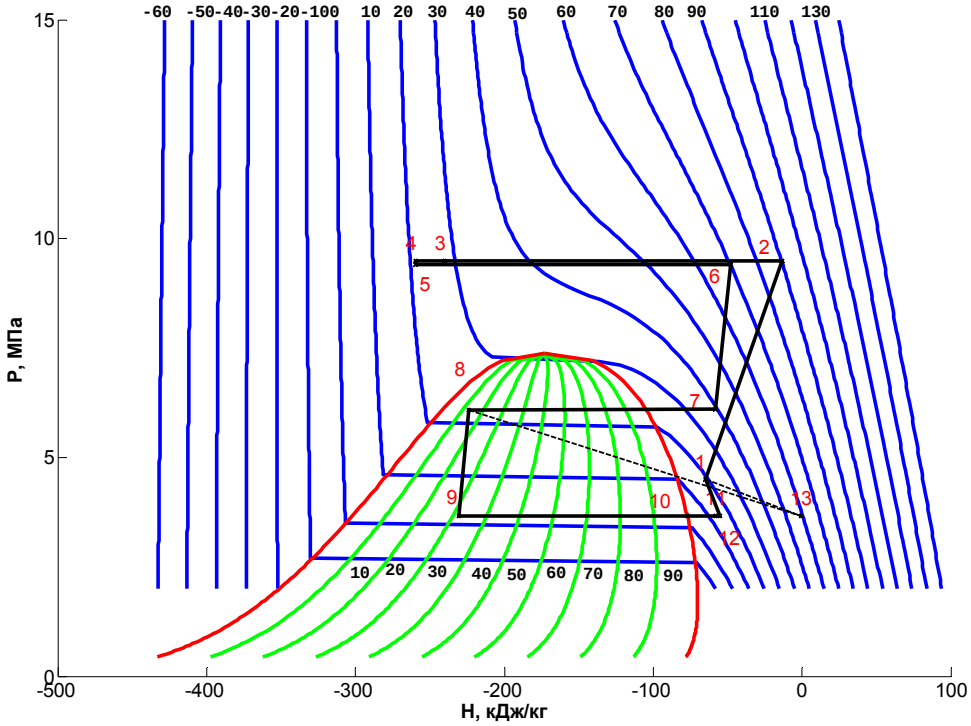

Рис. 8. Термодинамический цикл работы установки по рис.7.

4. Особенности системы автоматического управления установкой

Рассмотрим систему автоматического управления (САУ) газоохладителем (ГО) с регулируемым параметром - температурой продукта на выходе из ГО (рис.2). Регулирующими воздействиями являются: температура газа на входе в компрессор 1, изменяемая уровнями давления в испарителях 8 и 9, расход хладагента. Режим работы испарителя установки регулируется путем изменения расхода воды через рекуперативный теплообменник, 12, и регулирующим клапаном 7. Режим работы компрессора 1 регулируется регулятором давления 5, установленным после газоохладителя 2. Для компенсации возмущений по расходу молока, регулируют скорость вращения электропривода компрессора, с целью поддержания постоянного соотношения расходов газа и продукта. Давление газоохладителя и испарителей регулируется по схемам, предложенным в [10].

Рассмотрим процесс стабилизации режима работы установки при изменении температуры газа после компрессора. Например, пусть по каким-то причинам изоэнтропический КПД компрессора увеличился. При этом температура на выходе компрессора уменьшилась. Предполагаем, что расход хладагента и молока постоянны. Рассмотрим объект управления с двумя выходами: температурой молока на выходе теплообменника подогрева воды и температуры на выходе компрессора. Количество управлений также может быть равно трем: это расход молока на теплообменник 4 и расход воды на теплообменник подогрева воды 12 и изменение поверхности теплообмена теплообменника. Критерием качества работы системы стабилизации является требование нахождения в допуске температуры молока на выходе из газоохладителя. Система управления температурой газа перед газоохладителем является внутренним контуром каскадной системы управления стабилизации

температуры молока после газоохладителя. Структурная схема рассматриваемой системы, с учетом сказанного выше, имеет вид:

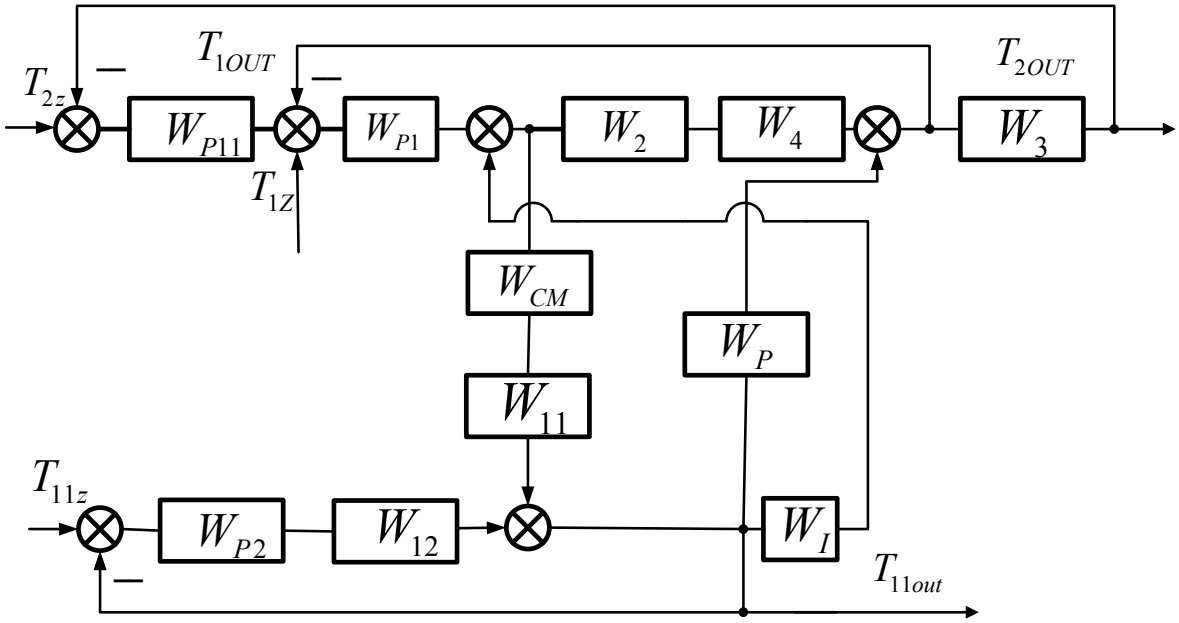

Рис. 9. Структурная схема системы регулирования температуры пастеризации и стабилизации температурного режима испарителя поз.8 ТНУ.

Обозначения, принятые на рис.9, приведены в табл.4.

Таблица 4. Обозначения на рис.9

$W_4(p)$	Передаточная функция теплообменника, поз.4, см. рис. 2, по каналу "расход жидкости в первичной цепи, температура хладагента на выходе вторичной цепи".
$W_2(p)$	Передаточная функция компрессора по каналу «температура хладагента на выходе из компрессора» - «температура хладагента на входе в компрессор».
$W_3(p)$	Передаточная функция газоохладителя по каналу «температура продукта на выходе из газоохладителя» – «температура хладагента на входе в газоохладитель».
$W_{P1}(p)$	Передаточная функция регулятора контура стабилизации температуры продукта на выходе из газоохладителя (с учетом динамики регулирующего клапана) – регулятора подчиненного контура каскадной системы.
$W_{CM}(p)$	Передаточная функция звена, связывающего расход молока и температуру молока на входе в теплообменник подогрева водопроводной воды.
$W_{11}(p)$	Передаточная функция теплообменника по каналу «температура первичного теплоносителя на входе» – «температура вторичного теплоносителя на выходе теплообменника».
$W_{12}(p)$	Передаточная функция теплообменника по каналу «расход первичного теплоносителя – температура вторичного теплоносителя на выходе теплообменника».
$W_{P2}(p)$	Передаточная функция регулятора контура стабилизации температуры продукта на выходе из теплообменника подогрева водопроводной воды (с учетом динамики регулирующего клапана).
$W_P(p)$	Передаточная функция, связывающая перегрев хладагента после испарителя и изменение нагрузки.
W_{P11}	Передаточная функция регулятора главного контура каскадной системы.

W_1	Передаточная функция, связывающая температуру до испарителя и перегрев хладагента после этого испарителя.
T_{1z}	Задание по температуре продукта на выходе из газоохладителя.
T_{1out}	Температура продукта на выходе из газоохладителя.
T_{11z}	Задание по температуре продукта на входе в первый испаритель.
T_{11out}	Температура продукта на входе в первый испаритель.
T_{2z}	Задание по температуре пастеризации молока.
T_{2OUT}	Температура молока на выходе газоохладителя.

Вид передаточных функций теплообменных аппаратов описан в работе [17] . Для стабилизации режима системы добавлена обратная связь по температуре перегрева хладагента после первого испарителя. Детальное исследование систем управления для разработанных схем будет являться предметом дальнейших работ.

6. Экономический эффект от применения теплового насоса в пастеризационно-охладительной установке

Для оценки ожидаемого экономического эффекта от применения ТНУ рассмотрим сначала схему одной из существующих пастеризационно-охладительных установок для пастеризации молока при производстве питьевого молока и кисломолочных напитков производительностью 10000 л/час (см. http://www.realpack.by/catalog-48-48-191.html?page=1). Оценим тепловую мощность, расходуемую котельной для пастеризации молока и холодильную мощность, требующуюся для охлаждения молока. Количество теплоты, выработанной котельной, необходимое для нагрева молока от температуры Т3 до температуры Т4 рассчитаем по формуле:

$$Q_1 = c_m \cdot \rho_m \cdot V_m \left(T3 - T4\right) \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{to}, \qquad (6.1)$$

где $\eta_{tr} = 0,98$ - КПД системы транспорта теплоты, $\eta_{to} = 0,95$ - КПД пароводяного теплообменника котла, - удельная теплоемкость молока, $\rho_m = 1027\, kg/m^3$ плотность молока, $V_m = 10000/3600$, расход молока, л/с (http://conductivity.at.ua/publ/teploprovodnosti_pishhevykh_produktov/teplofizicheskie_svojstva_molochnykh_produktov/5-1-0-104). Количество газа (м^3/с), необходимое для выработки количества теплоты Q_1 вычисляем по формуле:

$$G_g = Q_1 / \left(q_g \cdot \eta_k\right) \qquad (6.2)$$

В формуле (6.2) $\eta_k = 0,8$, КПД котла, $q_g = 33500\, кДж/кг$, удельная теплота сгорания природного газа. Оценим холодильную мощность установки, вырабатывающей 40000 л/час воды при температуре 8°С и 30000 л/час ледяной воды при температуре 1 ^{o}С.
Из уравнения теплового баланса:

$$c_m \rho_m V_m \left(T_{nm} - T_{km}\right) = c_V \rho_V V_V \left(T_{nv} - T_{kv}\right) \qquad (6.3)$$

можно определить конечную температуру воды (ледяной воды) и холодильную мощность испарителей холодильной установки с учетом $\eta_{ev} = 0,95$ - КПД испарителей.

Можно показать, что при приведенных исходных данных холодильная мощность каждого из испарителей составит около 100 кВт. Холодильный коэффициент машины $k_h = 3,3$ (http://www.frigodesign.ru/manufact/chillers/bitzer_piston/index.php). Следовательно, мощность электропривода компрессора составит приблизительно 67 кВт (200/3,3). Мощность электроприводов насосов, расходуемую на подачу горячей воды, на секцию холодной и ледяной воды, на секцию охлаждения установки принимаем равной 5% от мощности компрессора холодильной установки. Мощность насоса для подачи горячей воды на пастеризатор принимаем равной 5 кВт. Общую электрическую мощность, расходуемую на охлаждение воды в пастеризационно-охладительной установке, принимаем равной 73 кВт.

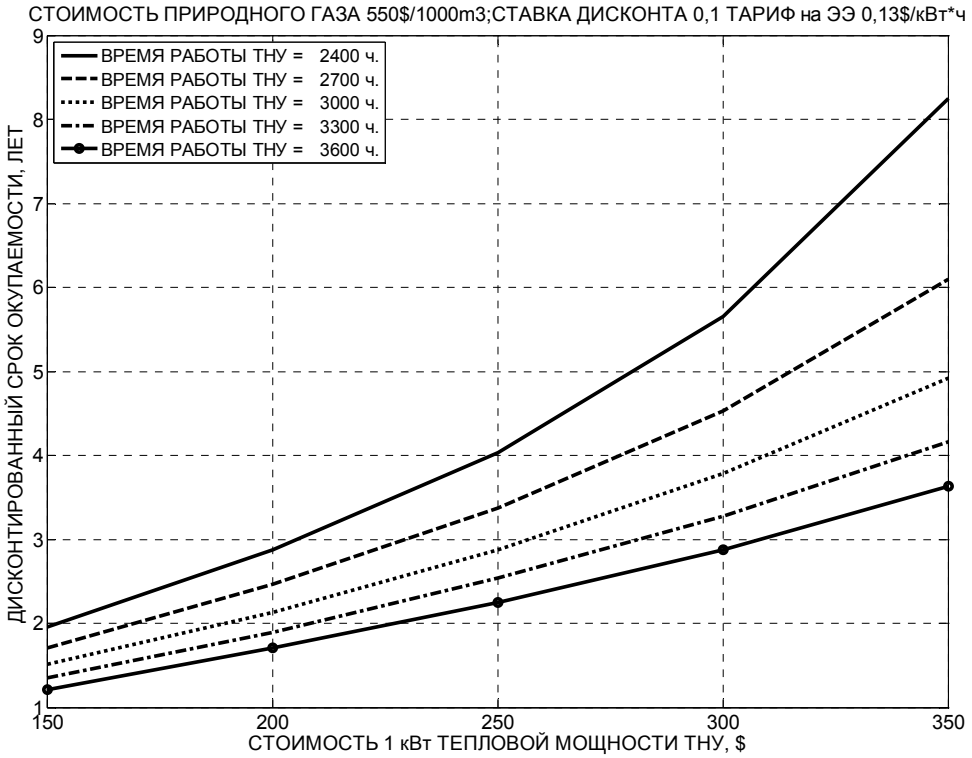

Рис.10. Зависимость срока окупаемости ТНУ с двумя испарителями от времени эксплуатации установки в год

Мощность электропривода теплового насоса при COP=4,65 составляет около 130 кВт. Тариф на электрическую энергию принимаем равным 0,14 $/кВт.час. Зависимость дисконтированного срока окупаемости при цене природного газа, равной 500$ за 1000 м^3 при различном времени работы установки в год, и COP ТНУ $COP = 4,65$ приведена на рис. 3. При применении теплового насоса отпадает необходимость в подогреве молока до 78°C с помощью газового котла, производится до 360 кВт тепловой мощности для подогрева водопроводной воды, но одновременно увеличивается на 130-73=57 кВт мощность потребляемой электрической энергии. Кроме того, вырабатывается дополнительная теплота для нагрева воды для технологических или санитарных нужд предприятия. В стоимость 1 кВт тепловой мощности ТНУ было учтено увеличение эксплуатационных расходов на пастеризационно-охладительную установку с ТНУ по сравнению с установкой без ТНУ.

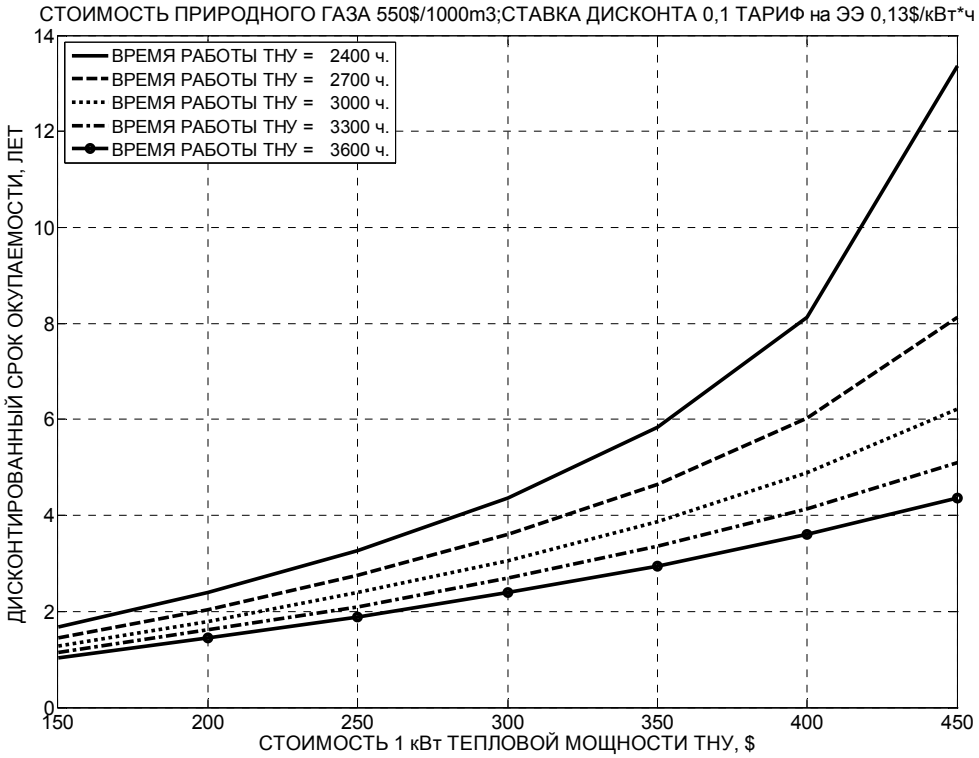

Рис.11. Зависимость срока окупаемости ТНУ с детандером и вихревой трубой и двухступенчатым компрессором от времени эксплуатации установки в год.

7. Выводы

1. Применение разработанных схем тепловых насосов на диоксиде углерода в составе пастеризационно-охладительных установок для молочных продуктов и для различных климатических условий позволяет существенно снизить потребление природного газа на предприятиях молочной промышленности, и установки с предложенными схемами могут иметь приемлемые сроки окупаемости инвестиций.
2. В схему системы регулирования температуры продукта необходимо ввести систему стабилизации температуры хладагента после компрессора, контур стабилизации температуры на входе в первый по ходу продукта испаритель, и обратную связь по температуре перегрева хладагента после первого испарителя.

Литература

[1] Смурыгин В.С., Краснов С.А., Кряклина И.В., Шешунова Е.В. Получение тепла и холода для животноводческого комплекса с использованием высокоэффективной энергосберегающей технологии // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №1; URL: www.science-education.ru/101-5462 (дата посещения сайта: 28.07.2012).
[2] Becker H., Vuillrmoz A., Marechal F, Heat pump integration in a cheese factory. Applied Thermal Engineering, 2012, v43, October 2012, p.118-127.
[3] Becker H., Marechal F., Vuillrmoz A., Process Integration and Opportunities for Heat Pumps in Industrial Processes. International Journal of Thermodynamics, Vol. 14 (No.2), pp.59-70, 2011. doi: 10.5541/ijot.260.

[4] Söylemez M.S., Operational cost minimization of heat pump for milk pasteurization in dairy. Journal of Dairy Research, 2005, v72., p.482-485.
[5] Söylemez M.S., Optimum heat pump in milk pasteurizing in dairy. Journal of Food Engineering, V.74, 2006, p. 546-551.
[6] http://telemiks.by/geo/food.html
[7] Bilir N., Kersad H.E. Performance improvement of the vapour compression refrigeration cycle by a two-phase constant area ejector. International Journal of Energy Research, 2009, v33., p. 469-480.
[8] Ozyurt O., Comakli O., Yilmaz and Karsh S Heat pump use in milk pasteurization: an exergy analysis. International Journal of Energy Research. V28, Iss.9, p.833-846, July, 2004.
[9] Везиришвили О.Ш., Хвития М.Т. Каскадная теплонасосная установка для охлаждения и пастеризации молока. Холодильная техника, № 7, 1990 г., с.4-6.
[10] Шит М.Л., Балануцэ А.П., Шит Б.М. Теплонасосная установка на диоксиде углерода с испарителями, работающими на разных температурных уровнях и при переменной тепловой нагрузке. Problemele Energeticii Regionale 2(10) 2010, с. 47-58.
[11] Jian-qiang Deng, Pei-xue Jiang, Tao Lu, Wei Lu, Particular characteristics of transcritical refrigeration cycle with an ejector. Applied Thermal Engineering 27(2007), p. 381-388.
[12] Chen Guangming, Xu Xiaoxiao, Liu Shuang, liang Lixia, Tang Liming, An experimental and theoretical study of CO_2 ejector. Applied Thermal Engineering 33(2010), p. 915-921.
[13] Yari M. performance analysis and optimization of a new two-stage ejector-expansion transcritical CO_2 refrigeration cycle. Applied Thermal Engineering 32(2009), p. 1997-2005.
[14] Manjili F.E., Yavari M.A. Performance of a new two-stage multi-intercooling transcritical CO_2 ejector refrigeration cycle. Applied Thermal Engineering 40(2012), p. 202-209.
[15] Tekeuchi H. Ejector with throttle controllable nozzle and ejector cycle using the same. Patent US 6,966,199 B2, Nov.22, 2005.
[16] Sarkar J. Cycle parameter optimization of vortex tube expansion transcritical CO_2 system. . Applied Thermal Engineering 48(2009), p. 1823-1828.
[17] Шит М.Л., Журавлев А.А., Шит Б.М. Управление газоохладителем теплового насоса на диоксиде углерода при работе в непрерывном режиме. Труды Одесской национальной Академии Пищевых технологий, вып.35, т.2., 2009 г. с. 241-246.
[18] http://molokoportal.ru/11-2-puti-povysheniya-kachestva-i-stojkosti-produktov-konservirovaniya-moloka/

Сведения об авторах

Шит Михаил Львович – к.т.н., зав. Лабораторией «Энергетической эффективности и систем управления» Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы на диоксиде углерода, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail: mihail_sheet@yahoo.com

Иойшер Анатолий Матусович – к.ф-м.н., зав. лабораторией Микропроводов и нитевидных наноструктур Института "ELIRI" (Кишинев). Область научных интересов: нанотехнология, сенсоры, производство тепла и холода с помощью вихревых труб и термоэлектрических тепловых насосов. E-mail: amyosher@gmail.com.

Шит Борис Михайлович – инженер-программист Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы на диоксиде углерода, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail:boris@fld.rambler.ru.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ НА ГАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ СТАНЦИЯХ

М.А. Жидков (НТЦ «Вихревые технологии», г. Москва),
Д.А. Жидков (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

Аннотация. В работе представлены результаты термодинамического анализа применения вихревых труб в рекуперативных технологических схемах и приведены примеры практической реализации полученных результатов в химической и нефтегазовой промышленности, в частности для подогрева природного газа на газораспределительных станциях.
Ключевые слова: трехпоточная вихревая труба, вихревая установка, газораспределительная станция, рекуперативный теплообменник, эксергетический анализ.

MAJORAREA EFICIENȚEI ENERGETICE A PROCECESELOR LA STAȚIILE DE REGLARE GAZE

M.A. Jidcov, Centrul tehnnico-ştiinţific „Tehnologii turbionare”, Moscova, D.A. Jidcov, Universitatea tehnică din Moscova „MGTU N. Ă. Bauman”

Rezumat. În lucrare sunt prezentate rezultatele analizei termodinamice a utilizării tuburilor de vârtejuri în schemele tehnologice recuperative şi sunt prezentate exemple de realizare practică în industria chimică şi industria de pentrol şi gaze, în particular, pentru încălzirea gazelor naturale la staţii de reglare gaze.
Cuvinte-cheie: tub de vârtejuri cu trei fluxe, instalaţie cu tubul de vârtejuri, schimbător de căldură recuperativ, analiză exergetică.

ENERGY EFFICENCY INCREASE OF PROCESSES ON GAS – REGULATING STATIONS

M.A. Zhidkov, Scientific and Technical center “Vortex technologies”, Moscow, D.A. Zhidkov, Bauman Moscow State Technical University

Abstract. There are presented results of the thermodynamic analysis of vortex tubes in recuperative technological schemes and examples of practical implementation of findings in the chemical, oil and gas industry, in particular for the vortex heating of the natural gas on the gas - regulating station.
Keywords: triple-flow vortex tube, installation with vortex tube, gas - regulating station, regenerative heat exchanger, exergy analysis.

Обозначения: расход газа, ст. м³/ч – V ; отношение давлений, б/р – $\pi = P_B / P_X$; доля холодного потока – $\mu = V_X / V_B$; температурная эффективность ВТ,˚С– $\Delta \grave{O}_X = \grave{O}_B - \grave{O}_X$;температура окружающей среды – T_o ; точка росы, ˚С– T_p ; удельная холодопроизводительность,˚С – $q_{\tilde{o}} = \Delta \grave{O}_{\tilde{o}} \cdot \mu$;удельная эксергия потока вещества, кДж/кг – e ; удельная энтальпия газа, кДж/кг– i ;удельная энтропия газа, кДж/кг·град – s .
Индексы: у– вход в установку, в – вход в вихревую трубу, х – холодный поток, г – горячий поток, хт – холодный поток после теплообменника, см – смешанный поток.
Сокращения: ВТ – вихревая труба, ВУ – вихревая установка, ТВТ – трехпоточная вихревая труба, ГРС – газораспределительная станция, ТП – тепловой насос.

Введение. Высокопроизводительные вихревые трубы (ВТ) Ранка-Хилша с автоматическим регулированием ключевых параметров успешно эксплуатируются в нефтегазовой и химической промышленности России и Украины [1, 2]. В отличие от однопоточных генераторов холода (дроссель, детандер и др.) вихревая труба имеет специфику: исходный газ, расширяясь, делится в ней на два потока – холодный и горячий.

В исследованиях на газах умеренного давления (до 1,0 МПа) доказано многократное превосходство ВТ над дросселем по параметрам ΔT_X и q_X [3, 4]. И это действительно так если ВТ используется в качестве генератора холода на уровне

температуры окружающей среды ($T_B \approx T_O$) и на газах с небольшим дроссель-эффектом, например на водороде или гелии. Но если она применяется в схемах с рекуперативным теплообменником (рис. 1) и на газах с высоким значением эффекта Джоуля-Томпсона (природный и попутный нефтяной газ), то вопрос ее эффективности требует специального рассмотрения.

Схемы вихревых установок для ГРС.

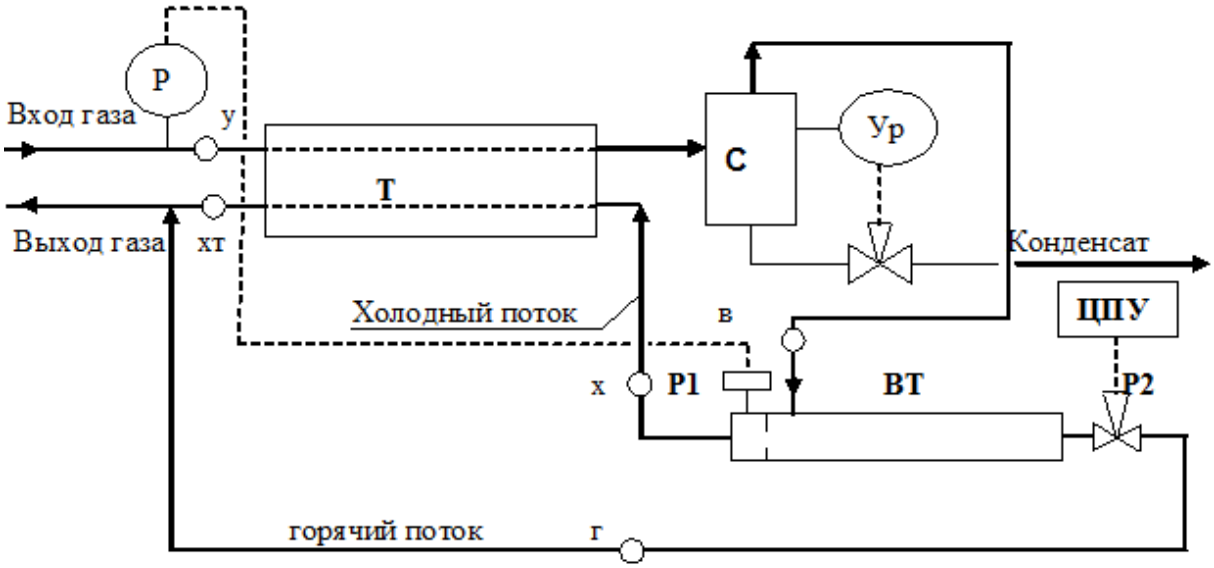

Рис. 1. Принципиальная рекуперативная схема вихревой установки

Обозначения на рис.1. Т – теплообменник; С – сепаратор; ВТ – вихревая труба; Р1 – узел регулирования производительности ВТ; Р2 – регулятор соотношения потоков.; Ур – уровень, ЦПУ – центральный пульт управления.

Исходя из первого закона термодинамики, легко доказать, что ВТ будет эффективнее дросселя в рекуперативном цикле при соблюдении следующего неравенства $i_{\tilde{A}} > i_{XT}$ или (при равенстве теплоемкостей) $T_{\tilde{A}} > T_{XT}$
Количество холода, произведенное в вихревой трубе сверх эффекта Джоуля-Томпсона, эквивалентно количеству тепла, отводимого из системы с горячим потоком.

Проиллюстрируем это теоретическое положение на конкретных примерах. В таблице 1 представлены режимы работы вихревой установки (ВУ) на синтез-газе производства ацетилена, имеющим весьма небольшой дроссель-эффект. Величина $\Delta T_T = T_{\grave{O}} - \grave{O}_{\tilde{A}}$ (графа 12 таблицы 1) отображает холодопроизводительность ВУ, т.к. генерируемый в ВТ холод идет только на охлаждение исходного газа. Она максимальна при $\mu = 0,77$ ($\Delta T_T = 43^o C$), когда температура $\Delta T_{\tilde{A}}$ горячего потока значительно (на 33,5 °С) превосходит T_{XT}. По мере уменьшения разницы температур между $T_{\tilde{A}}$ и T_{XT} ($\Delta T_{\tilde{A}-\tilde{o}\grave{o}} = \grave{O}_{\tilde{A}} - \grave{O}_{\tilde{o}\grave{o}}$) уменьшается и величина ΔT_T. Так, при значении параметра $\Delta T_{\tilde{A}-\tilde{o}\grave{o}} = 15,5^o C$ (графа 11) ΔT_T становится равной 20,0 °С.

Таблица 1 Параметры режимов работы рекуперативной вихревой установки на синтез-газе производства ацетилена

№ ре-жи ма	$P_в$, МПа	π	Температура, °С					$\Delta T_х$	$\Delta T_г$	$\Delta T_т$	$\Delta T_{г-хт}$	μ	$q_х$
			$T_у$	$T_в$	$T_х$	$T_г$	$T_{хт}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,96	7,1	19,5	-13,0	-32,0	71,0	20,5	19,0	84,0	32,5	50,5	0,82	15,6
2	0,93	6,6	16,0	-27,0	-48,0	47,5	14,0	21,0	72,5	**43,0**	33,5	**0,77**	**16,2**
3	0,98	7,0	18,0	-23,0	-46,5	51,0	17,5	23,5	72,0	41,0	33,5	0,75	17,3
4	0,95	6,8	21,0	-7,0	-34,0	46,5	20,0	27,0	51,5	28,0	26,5	0,66	17,8
5	0,92	6,6	17,0	-16,0	-43,5	37,0	18,5	27,5	51,0	**33,0**	13,0	**0,65**	**17,9**
6	0,92	6,8	18,0	-2,0	-34,0	34,5	19,0	32,0	34,5	20,0	15,5	0,52	16,6

При работе ВУ на природном газе наблюдается существенное влияние эффекта дросселирования. Так при $\mu = 0,95 - 1,0$ (практически дросселирование) наблюдается максимальное значение параметра ΔT_T. Опираясь на подобные экспериментальные факты, ряд авторов (например, в работе [5]), делают вывод, что вихревой эффект не всегда имеет преимущество в рекуперативных схемах перед эффектом Джоуля-Томпсона.

Но этот вывод базируется на первом законе термодинамики, оперирующем только количеством холода, и оказывается неверным с позиции второго закона термодинамики, который позволяет оценить «качество» холода.

Оценка «качества» может быть произведена с помощью эксергетического анализа [6]. Эксергия потока вещества подчиняется закону сохранения только в обратимых (идеальных) процессах. В реальных же (необратимых) процессах она частично или полностью теряется в результате диссипации (рассеяния) энергии. Чем меньше такие потери, тем более совершенен термодинамический процесс.

Удельное количество эксергии для потока вещества определяется по соотношению:

$$e = (i - i_o) - T\left[s - s_o\right], \qquad (1)$$

где индекс «о» обозначает равновесие с окружающей средой. Эксергетический баланс расширения газа в ВТ описывается уравнением:

$$e_B = \mu e_{\tilde{o}} + \left(1 - \mu\right) e_{\tilde{a}} + d_{\hat{a}\grave{e}\tilde{o}\eth} \qquad (2)$$

где $d_{\hat{a}\grave{e}\tilde{o}\eth}$ – потери эксергии при расширении газа в ВТ.

Эксергетический баланс процесса дросселирования соответствует соотношению:

$$e_{\hat{a}} = e_{\ddot{a}\eth} + d_{\ddot{a}\eth}, \qquad (3)$$

где $e_{\ddot{a}\eth}$ – эксергия газа после дросселирования, а $d_{\ddot{a}\eth}$ – соответствующие потери эксергии. Если учесть последующий процесс смешения двух потоков газа после ВТ с потерями эксергии $d_{\tilde{n}\grave{\imath}}$, то, используя уравнения (2) и (3) получим:

$$d_{\hat{a}\grave{e}\tilde{o}\eth} = d_{\ddot{a}\eth} - d_{\tilde{n}\grave{\imath}} . \qquad (4)$$

Таким образом, потери эксергии при расширении газа в ВТ будут всегда меньше потерь эксергии при дросселировании на величину, равную потерям эксергии при смешении горячего и холодного потоков.

На рис. 2 представлены результаты расчета эксергий в виде функции e_x и $e_{\tilde{a}}$ от μ при $\pi = 4,9$, выполненные по данным испытаний регулируемой вихревой трубы на природном газе ГРС [7] при условии ее работы в рекуперативном цикле с параметрами $T_в$ = -20°С и $T_о$ = 13°С. Здесь же нанесены кривые удельной «эксергопроизводительности» потоков ($q_x^{экс}$, $q_г^{экс}$) и прямая $e_{др} = q_{др}^{экс}$. Как видно из графиков, величина e_x практически в три раза превышает $e_{др}$ при μ = 0,7, а значение $q_x^{экс}$ в два раза превышает аналогичный показатель процесса дросселирования.

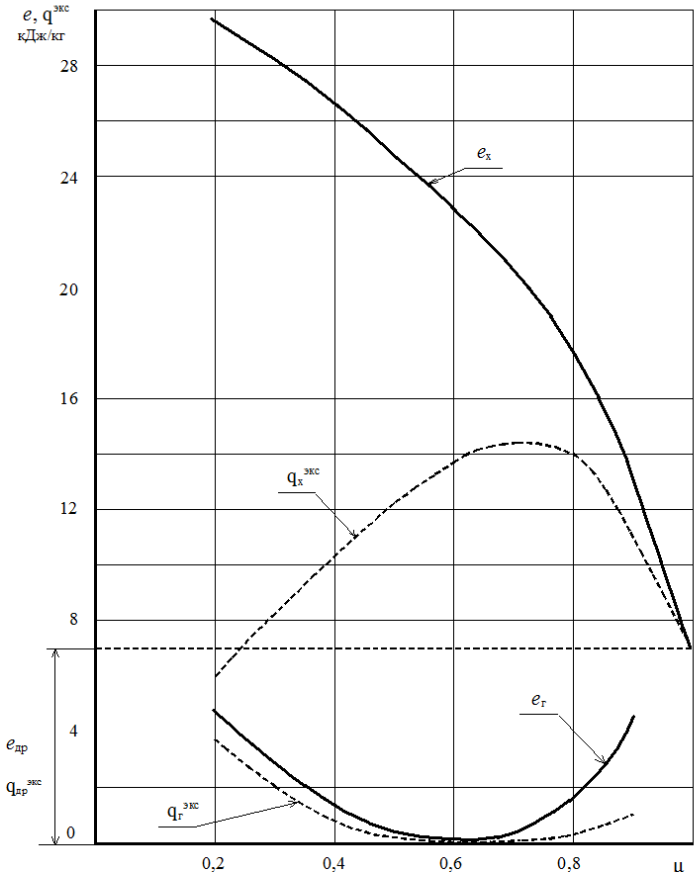

Рис.2. Зависимость эксергии *e* и эксергопроизводительности $q^{экс}$ потоков ВТ от μ при температурах $T_о$ = +13°С, $T_в$ = -20°С и π = 4,9 (рекуперативная схема)

Итак, теоретически показано, что существует принципиальная возможность эффективного применения ВТ в низкотемпературных рекуперативных циклах за счет высокой эксергии холодного потока, в том числе при $T_{\tilde{A}} < T_{XT}$. Каковы же пути практической реализации термодинамического преимущества ВТ?

В первую очередь – это принципиальная возможность получения более низкого уровня температур холодного потока по сравнению с дроссельным расширителем. Такое преимущество ВТ можно использовать либо для непосредственного захолаживания объектов, либо для более эффективной конденсации компонентов при разделении газовых смесей. Причем преимущество ВТ в части конденсации примесей заключается в дополнительном снижении статической температуры газа (увеличении эксергии) при высокоскоростном истечении газа из сопла [8].

Последнее преимущество можно продемонстрировать на примере достижения точек росы при работе промышленной вихревой установки подготовки нефтяного газа к транспорту (таблица 2).

Таблица 2.Параметры работы ВУ подготовленного нефтяного газа

№	Давление, МПа		Температура, °С		Точка росы, °С		Расширитель
	$P_в$	$P_х$	$T_в$	$T_х$	вода	углеводороды	
1	6,20	3,80	13,0	0,7	-1,2	-0,9	ТВТ
2	6,60	4,20	14,9	2,1	-3,3	-0,2	
3	6,32	3,83	16,5	2,1	-3,2	-0,1	
4	6,42	3,77	19,3	2,1	-3,1	-0,3	
5	6,49	4,09	11,8	-0,6	-2,7	-2,3	
6	6,10	4,17	19,4	12,3	13,6	15,1	дроссель
7	6,00	4,00	18,0	9,0	9,2	9,0	
8	6,33	4,20	18,0	7,0	6,4	7,9	

В этой ВУ [9] используется трехпоточная вихревая труба (ТВТ), обеспечивающая не только генерацию холода, но и сепарацию конденсирую-щихся в ней компонентов (третий поток – выход конденсата). В качестве примера успешного применения ВТ в химической промышленности по схеме рисунка 1 можно привести ВУ выделения метанола из продувочного газа производства метанола Новомосковской АК «Азот» производительностью до 16 000 ст. м^3/час [10]. ВТ была принята в эксплуатацию в 1998 году, и до настоящего времени не было зафиксировано ни одной остановки технологии из-за ее поломки. Аналогичная установка была пущена в 2002 году в Северодонецком «Объединении Азот» (Украина). Сказала свое техническое слово ВТ и в энергетике. Так, в 2006 г. на одном из объектов АНК «Башнефть» введена в эксплуатацию ВУ подготовки топливного газа для шести газопоршневых электростанций Caterpillar, обеспечивающая точку росы подготовленного газа на уровне $T_р$ = -40°С [11] .

Эксергетический анализ позволил предложить оригинальный способ подогрева природного газа на ГРС с помощью ВТ (взамен огневого подогревателя). Он заключается в возможности «сброса» избытка холода в окружающую среду, т.е. подогревать холодный поток ВТ теплом наружного воздуха. Таким образом, по принципу теплового насоса (ТН), ВТ позволяет «качать» тепло из окружающей среды.

Такое технологическое решение было положено в основу проекта вихревой установки подогрева природного газа на ГРС Тульского УМГ РАО «Газпром» производительностью до 50 000 ст. м^3/час (рисунок 3). В ее состав входит секция оребренных трубопроводов ОТ (или теплообменных панелей), предназначенная для подогрева холодного потока ВТ окружающей средой.

Расчетный режим для зимнего варианта эксплуатации установки при температуре атмосферного воздуха ($T_о$ = -15÷-20°С) представлен в таблице 4. В этом режиме Т1 и ХК в процессе расширения газа не задействованы; ВТ работает на параметрах $\mu = 0,5$ *è* $\pi = 5,0$.

Расчетный вариант применения ВТ в качестве ТН (по схеме: Т1 плюс ОТ рис. 3) для ГРС одного из городов-потребителей представлен в таблице 5. Здесь дано два варианта расчета: первый, самый неблагоприятный (минимальное давление на входе в ГРС и зимние условия окружающей среды – январь), и второй, сентябрьский, когда имеет место максимальное давление на входе в ГРС, а значит и максимальный дроссель-эффект, который нужно компенсировать за счет ТН.

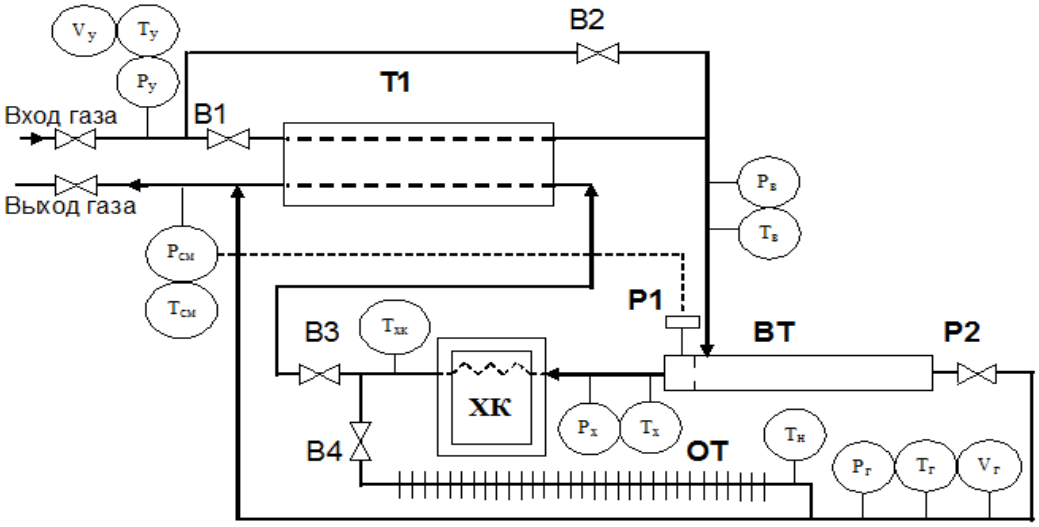

Рис. 3. Принципиальная технологическая схема вихревой установки для подогрева природного газа на ГРС

Обозначения на рис. 3. Т1 – теплообменник; ВТ – регулируемая вихревая труба; ХК – холодильная камера; ОТ – секция оребренных трубопроводов; Р1 и Р2 – регуляторы

Таблица 4. Расчетный режим работы вихревой установки по подогреву природного газа на ГРС Тульского УМГ РАО «Газпром» (зимние условия эксплуатации)

Точка схемы	Давление, МПа	Температура, °С	Расход, ст. м^3/час
Вход в установку	3,5	-3	40 000
Вход в вихревую трубу	3,5	-3	40 000
Холодный поток после ВТ	0,64	-55	20 000
Горячий поток после ВТ	0,60	25	20 000
Холодный поток после подогрева в ОТ	0,60	-25	20 000
Смешанный поток на выходе ГРС	0,60	0	40 000

Таблица 5. Режим работы ВУ по подогреву природного газа на ГРС города-потребителя

Точка схемы	Давление, МПа	Температура, °С	Давление, МПа	Температура, °С
Варианты	Январь 2008 г.		Сентябрь 2008 г.	
Вход в вихревую трубу	1,35	4	4,32	8
Холодный поток	0,3	-31	0,3	-47
Горячий поток	0,3	31	0,3	86
Холодный поток после ОТ	0,3	-21	0,3	-10
Смешанный поток	0,3	5	0,3	19

Как видно из таблицы 5, оба варианта обеспечивают необходимый подогрев сдросселированного газа на выходе из ГРС. В первом случае при $\mu = 0,5$ температура смешанного потока составляет $T_{CM} = 5^o C$, во втором случае при $\mu = 0,7$ эта температура равна $T_{CM} = 19^o C$.

Выводы.

Показана как теоретическая, так и практическая возможность использования вихревых труб в низкотемпературных системах охлаждения и разделения газовых смесей, в том числе, в качестве теплового насоса. В частности, высокая эксергия холодного потока вихревой трубы позволяет получать более эффективное по сравнению с дросселем низкотемпературное разделение углеводородных компонентов (осушка природного газа до точки росы -40°С), а также исключить из схемы ГРС такой энергоемкий и экологически не безупречный аппарат, как огневой подогреватель природного газа (при расчетах вихревой подогрев составляет 5-19°С).

Литература

1. Бетлинский В.Ю., Жидков М.А., Овчинников В.П. «Двухпоточные регулируемые вихревые трубы в промышленных установках очистки и осушки газов». Газовая промышленность, январь 2008, с. 72-75.
2. Рябов А.П., Гусев А.П., Жидков М.А., Жидков Д.А. «Трехпоточные вихревые трубы в нефтедобывающей и газовой промышленности (аналитический обзор)». Нефтегазовые технологии, февраль 2007, с. 2-7.
3. Меркулов А.П. «Вихревой эффект и его применение в технике». Самара, Оптима, 1997, 296 с.
4. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. «Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения». М., УНПЦ «Энергомаш», 2000, 414 с.
5. Меркулов А.П., Колышев Н.Д. «О целесообразности использования вихревого эффекта на высоких давлениях». Труды Куйбышевского авиационного института, вып. 12, Куйбышев,1962, с. 276-282.
6. Бродянский В.М. «Эксергетический метод термодинамического анализа». М., Энергия, 1973, 296 с.
7. Бетлинский В., Жидков М., Овчинников В., Жидков Д. «Экспериментальное исследование термодинамической эффективности регулируемой вихревой трубы на природном газе». Нефтегазовые технологии, февраль 2008, с. 2-6.
8. Жидков М.А., Гусев А.П., Рябов А.П., Овчинников В.П., Жидков Д.А. «Сверхзвуковая сепарация углеводородных газов в вихревых трубах Ранка-Хилша». Oil & Gas Journal Russia, март-апрель, 2007, с. 101-106.
9. Зеленцов А.И., Солдатов П.Я., Жидков М.А., Рябов А.П., Исламкин В.Г., Пахомова Г.Ю. «На Капитоновском попутный газ сжигать не будут». Oil & Gas Journal Russia, сентябрь, 2007, с. 28-31.
10. Жидков М.А., Комарова Г.А., Воробьев В.С. и др. «Опыт эксплуатации промышленной установки выделения метанола из продувочных газов синтеза с применением вихревой трубы». Химическая промышленность, май, 2000, с. 3-6.
11. Жидков М.А., Бетлинский В.Ю., Зозуля В.Ю. и др. «Промышленная установка низкотемпературной подготовки природного газа с применением регулируемой вихревой трубы». Oil & Gas Journal Russia, август, 2007, с. 92-98.

Об авторах.

Михаил Андреевич Жидков, к.т.н., директор научно-технического центра «Вихревые технологии» ЗАО НПП «Импульс» (г. Мос-ква). Автор оригинального способа автоматического регулирования производительности вихревых труб, позволившего реализовать высокорасходную вихревую технологию на предприятиях нефтегазового и химического комплексов. Разработчик конструкции трехпоточных вихревых труб, не имеющих зарубежных аналогов, которые с успехом эксплуатируемых на ряде месторождений России. Область научных интересов: разработка теории вихревого эффекта Ранка-Хилша на основе ударно-волновой концепции. E-mail: grena_der@mail.ru**.**

Дмитрий Алексеевич Жидков,
студент 6-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва) по специальности «Холодильные установки». Принимает участие в проектировании и реализации вихревых труб. E-mail: grena_der@mail.ru.