

РАЗДЕЛ «ЭНЕРГЕТИКА»

УДК 662.987.697

ПАБАТ А.А., магистр
ПАБАТ А.И., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

МИРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА XXI ВЕКА: ИННОВАЦИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ

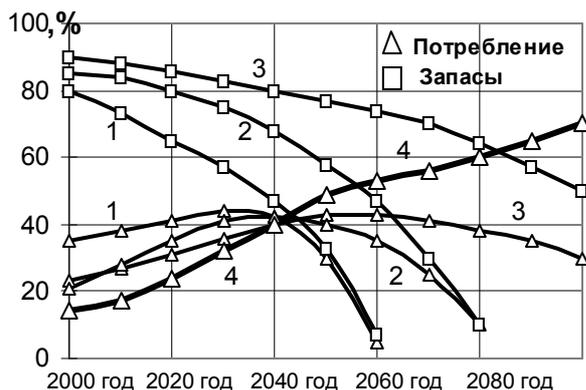
В статті здійснено енергоекономічний аналіз традиційних та інноваційних енергетичних технологій в перспективі розвитку світової енергетики XXI століття

В статье произведен энергоэкономический анализ традиционных и инновационных энергетических технологий в перспективе развития мировой энергетики XXI века.

The article gives a power economic analysis of conventional and innovational power engineering technologies in the perspective of the development of world power engineering in the XXI century.

Введение. Одним из важнейших факторов развития мировой энергетики является эффективность использования энергии, значение которого будет неуклонно возрастать вследствие увеличения энергопотребления, истощения традиционных ископаемых энергоносителей и стремительной эскалации их стоимости. К началу XXI столетия чрезвычайное развитие масштабов мирового производства и развитие промышленной инфраструктуры, возрастание численности населения планеты привели к колоссальному увеличению потребления природных ресурсов. Только за вторую половину XX столетия мировое потребление твердого топлива увеличилось в 2 раза, жидкого – в 8,5 раза, а потребление природного газа возросло почти в 10 раз. Интенсивное использование органического топлива привело к тому, что в настоящее время основная часть легкой для добычи фракции оказывается практически выработанной и значительный объем доказанных запасов относится к категории повышенной сложности добычи, поскольку приходится на мелкие месторождения, расположенные на больших глубинах и в труднодоступных для освоения географических районах, поэтому дальнейшая добыча требует резкого повышения уровня затрат, которые стремительно возрастают по мере приближения к границе истощения ресурсов. Так, в России для поддержания практически стабильного уровня добычи нефти в 2000 году было израсходовано \$2,2 млрд., в 2010 году понадобится \$11,2 млрд., а в 2020 году – \$43 млрд. [1,2].

Доминирующие в мировой энергетике технологии, заимствованные из XIX века и ориентированные на использование ископаемого углеродного топлива, к концу XXI века в значительной степени окажутся несостоятельными как вследствие недостаточной энергоэкономической эффективности, так и избыточного экологического влияния. Согласно прогнозам экспертов технологического предвидения UNIDO и расчетам “Римского клуба” следующие сто лет развития мировой энергетики будут происходить в условиях довольно стремительного истощения запасов главных энергетических ресурсов, прежде всего нефти и газа (рис.1), поэтому дальнейшее концептуальное развитие мировой энергетики будет ориентировано на использование альтернативных энергоносителей, прежде всего водородной энергетики, ветроэнергетики и гелиоэнергетики. К сожалению, пока не существует эффективного и безопасного источника энергии, способного заменить ископаемые энергоносители.



1 – нефть; 2 – газ; 3 – уголь; 4 – альтернативные источники
 Рисунок 1 – Прогноз динамики мирового потребления энергоресурсов, %

Оптимистичные прогнозы середины XX столетия относительно развития атомной энергетики как безграничного источника энергии не оправдались вследствие недостаточной совокупной эффективности АЭС в сравнении с другими энергетическими технологиями, снижения прогнозируемого уровня безопасности АЭС, увеличения затрат на переработку и утилизацию радиационных отходов, возрастающей угрозы неконтролируемого распространения атомных вооружений и радиационных материалов в террористических целях. Вследствие значительного сокращения с середины XX столетия финансирования стратегических фундаментальных научных исследований новые энергетические технологии так и не появились, а промышленное использование энергии управляемого термоядерного синтеза даже не поддается прогнозированию, несмотря на объединение научных и технологических усилий всех стран, владеющих ядерными технологиями.

Постановка задачи. На рубеже тысячелетий довольно активно разрабатываются технологические, макроэкономические и прочие прогнозы энергопотребления на ближайшие 50-100 лет. Главный недостаток такого прогнозирования – ориентация развития мировой энергетики на использование традиционных энергоносителей. Действительно, невозможно согласиться с тем, что через 60-80 лет не станет нефти и газа. Но сомнения есть – чего стоит оценка запасов угля, нефти, газа и урана до глубины 12 км [3]. Не исключено, что до конца столетия появятся технологии добычи даже из такой глубины, а вот экономическая целесообразность таких технологий довольно сомнительна. Существует мнение, что далеко не все запасы нефти и газа уже разведаны и это действительно так. Наиболее перспективными считаются месторождения Каспийского бассейна, побережья Латинской Америки и глубоководные шельфы Западной Африки, но добыча энергоносителей с применением новейших технологий увеличивает их стоимость в 3-5 раз, что экономически также бесперспективно, тем не менее в какой-то мере сможет предотвратить полный коллапс традиционной энергетики. Подчеркнем, что территории, на которых могут быть выявлены запасы органического топлива или урана, принадлежат существующим государствам, а в странах ОЭСР запасы органических энергоносителей достаточно изучены, так что наращивание энергии, выработанной из органического топлива, может осуществляться только за счет колонизации или войн, поэтому одним из главных критериев дальнейшего развития мировой энергетики является возможность перехода от традиционных энергоносителей к нетрадиционным – солнечную и ветровую энергию приватизировать еще не научились.

Попробуем осуществить аналитическое прогнозирование экономически целесообразного менеджмента развития традиционных и инновационных мировых энергетических технологий, руководствуясь исключительно достоверной фундаментальной информацией.

Результаты работы. Возьмем за основу отмеченное в большинстве прогнозов возрастание суммарного энергетического потенциала мировой экономики с $4,2 \cdot 10^{20}$ Дж энергии в начале столетия до $15,3 \cdot 10^{20}$ Дж к концу столетия (оптимистический прогноз). При сохранении существующей технологической базы и прогнозируемого изменения структуры традиционных энергоносителей уровень выбросов в атмосферу увеличится в пять раз и составит 6% атмосферного диоксида углерода, что даже в случае неисчерпаемых запасов традиционных энергоресурсов неминуемо будет иметь глобальные антропогенные экологические последствия.

Ключевым направлением перехода к устойчивому развитию мировой энергетики является замедление темпов эксплуатации невозобновляемых ресурсов и замещения их возобновляемыми, минимизация и утилизация отходов и снижение нагрузки на окружающую среду. Предлагаемые экспертами МЭА и Евросоюза экстраординарные меры по внедрению более жестких экологических норм к энергетической области экономически несостоятельны, так как требуют беспрецедентных капиталовложений в усовершенствование традиционных технологий, ведь эффективность традиционной тепловой энергетики едва достигает 40%, атомной – 35%, следовательно 60-70% всей энергии превращается в тепловое излучение. С учетом глобального распределения энергоресурсов в ближайшие 20-30 лет для развития мировой энергетики понадобится \$16 трлн., из которых на электроэнергетику приходится 60%, нефтяную и газовую промышленность – по 19%, угольную промышленность – 2%. \$7,9 трлн. инвестиций понадобится развивающимся странам Азии и Африки, \$6,5 трлн. – странам ОЭСР, \$1,7 трлн. – странам с переходной экономикой, в том числе России – \$1,1 трлн., Украине – \$0,3 трлн., что несомненно существенным образом снизит энергоэкономическую эффективность традиционных технологий.

Традиционная атомная энергетика, основанная на делении урана, потенциально способна обеспечить все мировое энергопотребление, однако утилизация отработанного атомного топлива при существующих технологиях представляет практически неразрешимую технологическую задачу. Пока других технологий нет даже теоретически, полная утилизация 1 т отработанного уранового топлива провоцирует образование 2154 т радиоактивных отходов, что очевидно неприемлемо не только в будущем, но и в настоящем. Активно начатые в 50-х годах XX столетия работы по управляемому термоядерному синтезу пока не вышли из стадии лабораторного эксперимента. Абсолютный мировой рекорд продолжительности управляемой термоядерной реакции на французском реакторе «Tore Supra» составил 210 секунд, а промышленные технологии получения электроэнергии на таких установках пока даже не апробированы. Тем не менее, страны ЕС, США, Канада, Россия, Япония и Китай с 2003 года ускоренными темпами развивают создание общей термоядерной установки ITER, на разработку и проектирование которой уже израсходовано более \$1 млрд. из запланированных \$7 млрд.[4].

Итак, оказываются экономически и экологически несостоятельными не только энергетические технологии XIX столетия, но и XX столетия как следствие недостаточного финансирования стратегических фундаментальных исследований, поэтому правильный выбор концептуальных технологий и направлений развития мировой энергетики является исключительно важным, поскольку возможная недооценка перераспределения энергоресурсов и экологического влияния традиционных энергетических технологий может иметь катастрофические последствия прежде всего для экономики развитых стран мира.

К сожалению, очевидно не удастся не только в ближайшем будущем, но и до конца столетия создать новейшую энергетическую супертехнологию, поэтому обратимся к анализу существующих и надежно апробированных фундаментальных

разработок. Известно, что мощность солнечной радиации на поверхности Земли составляет $1,75 \cdot 10^{17}$ Вт, что эквивалентно $5,4 \cdot 10^{24}$ Дж энергии в год, и в 10 раз превышает общемировые запасы органического топлива, которые оцениваются в $6,9 \cdot 10^{23}$ Дж, или в 1000 раз превышает прогнозируемое до конца столетия общемировое энергопотребление в $15,3 \cdot 10^{20}$ Дж. Представляется очевидным, что использование всей этой энергии эквивалентно глобальной антропогенной катастрофе – солнечная радиация является главной климатообразующей энергетической доминантой планеты, но почему-бы не научиться аккумулировать часть этой энергии и управлять климатом на Земле, тем более, что основные технологии управления климатом разработаны теоретически и в значительной степени апробированы экспериментально. Кстати, на планете каждую секунду происходит 2000 гроз, суммарная энергия которых оценивается в $5,3 \cdot 10^{23}$ Дж в год – почему-бы также не научиться использовать эту энергию? Как следствие солнечной радиации, пригодная к утилизации часть общепланетарной климатообразующей энергии ветра оценивается в $1,3 \cdot 10^{24}$ Дж, энергия массообмена рек и морских течений – $6,7 \cdot 10^{23}$ Дж. Следовательно, использование даже 0,1% суммарного энергетического потенциала солнечной радиации способно целиком удовлетворить энергетические потребности мировой экономики до конца XXI века. К сожалению, вера в безграничное атомное энергетическое будущее отбросила своевременное исследование указанных технологий на третье тысячелетие.

Рассмотрим наиболее целесообразные концептуальные направления развития мировой энергетики, основанные как на уже существующих энергетических технологиях, так и на инновационных технологиях ближайшего будущего. Если принять во внимание приведенное на рис.1 перераспределение энергоресурсов в связи с их исчерпанием, то совокупные инвестиции в традиционную энергетику могут оказаться экономически несостоятельными, поскольку развитие традиционной энергетики бесперспективно – запасы органических энергоносителей будут исчерпаны. Мировой опыт показывает, что наиболее рациональным решением задачи повышения энергетической эффективности является разработка адекватных методик оценки интегральной конкурентоспособности энергетических технологий, базирующейся прежде всего на сравнительном анализе их технико-энергетических показателей (рис.2) [5,6], а также формирование действенного механизма стимулирования практического их использования. Как следует из рис.2, только технологии нетрадиционной энергетики имеют устойчивую тенденцию к снижению стоимости оборудования и выработанной энергии, что обеспечит им в ближайшем будущем практический паритет с классическими энергетическими технологиями. Наиболее перспективным очевидно является дальнейшее развитие ветроэнергетики как вследствие высокой энергетической эффективности, низкой себестоимости электроэнергии в 0,03-0,08 \$/кВт·час, минимального экологического влияния, так и вследствие наличия хорошо отработанных технологий и оборудования ветроэнергетики. Достигнутые характеристики ветроэнергетических установок при наличии благоприятной географической локализации позволяют им уже сегодня конкурировать с классическими ТЭС, а в будущем значительно их превосходить по стоимости электроэнергии. Так, с 1970 года стоимость одного кВт·час выработанной энергии снизилась с 0,17 \$/кВт·час до 0,03 \$/кВт·час (рис.2, график 4). Эти программы уже сегодня активно развиваются в Германии, Испании, США, Китае и особенно в Дании, которая планирует к середине столетия обеспечение за счет ветроэнергетики половины национального электропотребления.



1 – автономная теплоэлектроэнергетика; 2 – биоэнергетические технологии; теплоэлектростанции; 6 – ТЭС на угле; 7 – фотоэлектрические станции; 8 – атомные электростанции

Рисунок 2 – Показатели динамики стоимости капитальных затрат энергетического оборудования и стоимости энергии

Гелиоэнергетика также целиком обеспечена технологической базой, однако по энергетической эффективности, себестоимости электроэнергии в 0,27-0,47 \$/кВт·час и экологическому влиянию проигрывает ветроэнергетике. Энергетическая эффективность наиболее распространенных кремниевых фотопреобразователей составляет 18%, арсенид - галлиевых – 37 %, новейших инновационных образцов – до 42%, что уже превышает показатели традиционной тепловой энергетики. Заметим, что с 1970-го года до настоящего времени стоимость энергии фотоэлектрических станций снизилась почти в десять раз - с \$2,5 до 0,27 \$/кВт·час (рис.2, график 7). Некоторые страны мира, даже расположенные далеко от экватора, например, Франция, Швеция, Нидерланды чрезвычайно активно развивают это направление, а потенциальный мировой рынок фотоэлектрических технологий оценивается в \$100 млрд. Япония, не имеющая собственных органических энергетических ресурсов, планирует к середине столетия обеспечение за счет гелиофотоэнергетики половины национальной потребности в электроэнергии [7].

Очевидно, что классическая атомная энергетика вследствие непреодолимых экологических последствий не сможет занять главных позиций, однако ее доля в общемировом энергопроизводстве не уменьшится. Управляемый термоядерный синтез до конца столетия вероятно состоится как международная промышленная энергетическая технология, но существенного вклада в энергопроизводство не внесет. Между тем, водородная энергетика как основа промышленного производства электроэнергии является единственно возможным концептуальным направлением развития мировой энергетики. Запасы в морской воде дейтерия как водородного термоядерного топлива оцениваются в $4 \cdot 10^{13}$ т, что эквивалентно 10^{17} МВт·год энергии. Наиболее перспективным представляется разработка и промышленное применение инновационных импульсных стеллараторов – термоядерных реакторов неуправляемого ядерного синтеза как генераторов тепловой энергии для теплоэлектростанций. В связи с конструктивными и технологическими особенностями минимальная мощность таких установок должна быть не менее 12-15 ГВт, что экономически целесообразно для стран с развитой транснациональной или трансконтинентальной энергосистемами. Кроме того, электрогидролизный водород, получаемый на гелиоэнергетических установках, как наиболее экологически безопасный, целесообразно использовать для локальных электроэнергетических установок на топливных элементах, локальных теплоэнергетических установок или как топливо для водного, воздушного, автомобильного, а также космического транспорта, основы развития которого закладываются уже сегодня. И если для воздушного или ав-

томобильного транспорта технологии применения водородного топлива уже достаточно и основательно отработаны, то для локальной энергетики или водного транспорта пока не существует даже надежно апробированных теоретических концепций альтернативного энергетического обеспечения, поэтому исследования, разработка и промышленное использование технологий водородной энергетики является первоочередной задачей мировой науки. С учетом перспектив исчерпания ископаемых ресурсов и стремительной эскалации их стоимости ведущие страны мира чрезвычайно активно развивают это направление. Во время российско-американского делового энергетического саммита (Санкт-Петербург, 22-23 сентября 2003 года) американским и российским министрами энергетики были сделаны заявления о сотрудничестве России и США в работах по развитию водородной энергетики. По программе «Атомно-водородная инициатива» США намерены в течение пяти лет израсходовать \$1,7 млрд. на разработку водородного двигателя, а Евросоюз выделяет \$2 млрд. на создание технологий промышленного производства водородного топлива с целью перехода в ближайшие 15-20 лет прежде всего автомобильного транспорта на водородное топливо [8].

Итак, с учетом неминуемой перспективы эскалации стоимости и исчерпания ископаемых энергоносителей, развитые страны мира чрезвычайно активно ведут разработку технологий нетрадиционной энергетики и энергетических технологий следующего поколения для обеспечения на протяжении ближайших 20-30 лет энергетических потребностей экономики за счет принципиально новых технологий. Общий объем мирового производства энергии в 2005 году составил $4,96 \cdot 10^{20}$ Дж, а общий вклад всех альтернативных технологий – $8,13 \cdot 10^{19}$ Дж или 16,4%. Согласно расчетам Мирового Энергетического Совета, общий объем производства энергии по крайней мере до середины столетия по оптимистичному прогнозу достигнет $6,3 \cdot 10^{20}$ Дж (по пессимистическому прогнозу – $10,3 \cdot 10^{20}$ Дж), а вклад нетрадиционной энергетики – $3,1 \cdot 10^{20}$ Дж или 49%. Прогноз динамики структуры нетрадиционной энергетики и ее вклада в мировой энергетический баланс до 2050 года представлен на рис.3 [9].

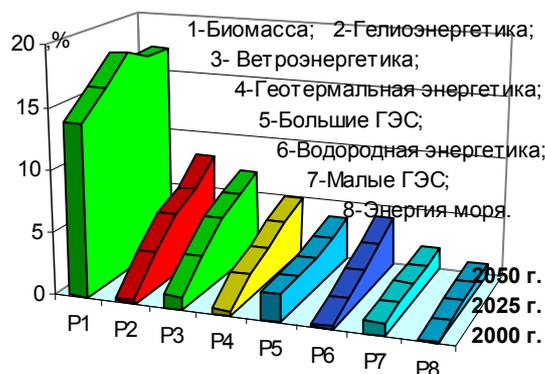


Рисунок 3 – Прогноз динамики развития мировой нетрадиционной энергетики, %

Выводы. Таким образом, традиционная энергетика, базирующаяся на ископаемых энергоресурсах, оказывается технологически, экономически и экологически несостоятельной в обеспечении возрастающих потребностей развивающейся мировой энергетики. Неопровержимым является утверждение, что вследствие неминуемого исчерпания ископаемых энергоресурсов только развитие альтернативной энергетики с использованием традиционных и инновационных технологий способно обеспечить дальнейшее развитие мировой энергетики и собственно существование цивилизации. Доминирующие мировые концепции стратегического энергетического менеджмента и критериев определения эффективности альтернативной энергетики не учитывают во-

зобновляемый характер энергии, отсутствие затрат на добычу, транспортировку, утилизацию энергоносителей, гарантированную энергетическую безопасность, минимальное влияние на окружающую среду и социальные условия. В настоящее время действительно существуют определенные научные, технические, экономические, даже политические трудности для незамедлительного развития технологической базы и широкого использования водородной, гелио- и ветроэнергетики, и если их доля в общем объеме мирового энергопроизводства в ближайшее время не достигнет необходимого уровня, то уже с 2060-2080 года, когда почти не останется нефти и газа, срочное внедрение альтернативной энергетики окажется экономически несостоятельным даже для самых развитых государств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интернетсайт Еврокомиссии по вопросам научных исследований в области энергетики, http://194.185.30.69/energysite/index_en.html.
2. В.Поляков. Обеспеченность мировой экономики энергоносителями в XXI веке // Мировая экономика и международные отношения. – 2005. – № 6. – С.106-112.
3. Г. Коновал. Энергетика XXI столетия: время следующего выбора // Энергетика и рынок. – 2003. – № 7. – С.32-41.
4. Л.Б.Преображенская. Ядерная энергетика мира: состояние и перспективы // Энергия: экономика, техника, экология. – 2003. – № 11. – С.18-23.
5. М.В.Рачков. Экономическая оценка влияния «внешней стоимости» на темпы развития атомной энергетики на конкурентном рынке // Известия Академии промышленной экологии. – 2004. – № 4. – С.75-79.
6. П.П.Безруких. Использованию ВИЭ – государственную поддержку // Энергия: экономика, техника, экология. – 2005. – № 6. – С.12-20.
7. А.А.Северин. Использование солнечного излучения для фотоэлектрического преобразования // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 6. – С.18-21.
8. С.П.Малышенко, Ф.Н.Пехота. Сегодня и завтра водородной энергетики // Энергия: экономика, техника, экология. – 2003. – № 1. – С.2-9.
9. Э.С.Панцхава, В.А.Пожарнов. В перспективе Россия – крупнейший поставщик биотоплива на мировой рынок // Энергия: экономика, техника, экология. – 2005. – № 6. – С.11-19.

УДК 662.987.697

ПАБАТ А.А., магістр
ПАБАТ А.І., к.т.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНІ КРИТЕРІЇ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ НАЦІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Визначені інтегральні чинники конкурентоспроможності традиційних і альтернативних енергоносіїв та енергетичних технологій в перспективі економічної доцільності концептуальних напрямків розвитку національної енергетики.

Определены интегральные предпосылки конкурентоспособности традиционных и альтернативных энергоносителей и энергетических технологий в перспективе экономической целесообразности концептуальных направлений развития национальной энергетики.

The integral assumptions of competitiveness of conventional and alternative technologies in the perspective of economic efficiency of conceptual trends of the development of national power engineering have been given definition.

Вступ. На початок XXI століття забезпеченість вуглеводними енергоносіями є одним з головних чинників розвитку економіки кожної держави, вирішення проблем соціальної сфери та зростання рівня життя людей. Основою стратегії енергетики кожної країни є забезпечення енергоносіями власних енергетичних потреб з урахуванням перспектив вичерпання та ескалації вартості традиційних органічних ресурсів [1-4]. Основними енергоносіями у світі сьогодні є нафта, вугілля, природний газ та уран, які також складають основу паливно-енергетичного комплексу України [4]. Структура споживання первинних енергоресурсів в Україні, країнах ЄС та у світі наведена на рис. 1.

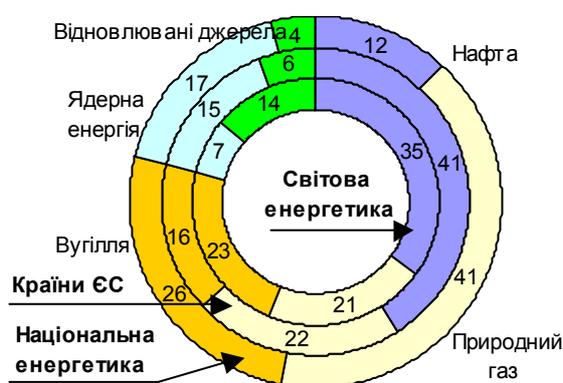


Рисунок 1 – Структура споживання енергоресурсів в Україні, країнах ЄС та у світі, %

Згідно з рис.1 частка ядерної енергетики природного газу та вугілля в національному енергетичному балансі значно перевищує загальноєвропейський і світовий рівень, а використання нафти та відновлюваних джерел суттєво не досягає світового рівня. Забезпеченість потреби в енергоносіях за рахунок власного видобутку газу складає 24%, нафти – 18%, тому проблема дефіциту непоновлюваних енергоресурсів (нафти, газу, вугілля, урану), яка актуальна для всіх країн світу, для України є першорядною. У найближчі 20 років національна економіка буде залишатися енергодефіцитною, що потребує щорічного імпорту паливно-енергетичних ресурсів в обсязі 110-140 млн.тонн умовного палива, а з урахуванням ескалації вартості органічних енергоносіїв їх імпорт є надто критичним.

З усіх видів шкідливого впливу на довкілля технологічного використання на-самперед органічних енергоносіїв найбільш масштабними та небезпечними є викиди забруднюючих речовин в атмосферу, частка яких від загального обсягу викидів в Україні досягає 60% – тисячі тонн з'єднань сірки, азоту, вуглецю та твердих часток вступають в хімічну реакцію з атмосферною вологою, утворюючи небезпечні кислоти та інші сполуки. Оскільки використання вугілля та природного газу в національних енергетичних технологіях суттєво перевищує світовий рівень (рис.1), питоме забруднення одиниці території України є одним з найбільших у Європі [5]. Атомні електростанції завдають не меншої шкоди – екологічні збитки від утилізації відпрацьованого палива ядерних реакторів, конструктивних матеріалів ядерних реакторів, наслідків радіаційних викидів та аварій поки неможливо навіть підрахувати.

Постановка задачі. Визначимо інтегральні чинники конкурентоспроможності традиційних і альтернативних енергоносіїв та енергетичних технологій в перспективі

економічної доцільності концептуальних напрямків розвитку національної енергетики. На початок XXI століття оцінки і аналіз екологічних збитків від використання традиційних та нетрадиційних енергетичних технологій майже в усіх розвинених країнах є фундаментальною основою для порівняння конкурентоспроможності різних енергоносіїв та енергетичних технологій. Згідно з критеріями загальноєвропейського проекту “Зовнішні ціни енерговиробництва Extern E”, найбільш повно порівняння конкурентоспроможності різних енергоносіїв та енергетичних технологій визначається “зовнішньою ціною” використання енергоносіїв – насамперед економічною оцінкою вартості забезпечення технологічної безпеки, захисту навколишнього середовища, екологічних наслідків від кліматичних змін в результаті викидів тепличних газів, хімічного забруднення біосфери та впливу на здоров’я населення.

Результати роботи. Аналіз сучасної оцінки конкурентоспроможності і перспектив використання енергетичних технологій почнемо з питання забезпеченості енергоресурсами як головного критерію енергетичної безпеки країни або регіону [6,7]. Певною мірою енергетична безпека характеризується коефіцієнтом K_{EB} , що дорівнює

$$K_{EB} = E_B / E_C, \quad (1)$$

де E_B – вироблена первинна енергія в країні; E_C – сумарна споживана первинна енергія. Якщо $K_{EB} < 1$, то країна змушена імпортувати енергоресурси, якщо $K_{EB} > 1$, то країна експортує або накопичує енергоносії. Динаміка самозабезпеченості енергоресурсами країн світу за період з 1970 по 2000 роки наведена на рис.2. За зазначений період Канада збільшила коефіцієнт самозабезпеченості з 1,1 до 1,5, Англія – з 0,52 до 1,17, Росія – з 1,44 до 1,57. Неухильно знижується коефіцієнт самозабезпеченості США (з 0,92 до 0,73) та Німеччини (з 0,57 до 0,43), підвищилася самозабезпеченість Японії (з 0,22 до 0,64) і Франції (з 0,26 до 0,51), однак майже половина потреби в енергоресурсах цих країн задовольняється за рахунок імпорту. Не змінилася за минулий період залежність Італії від імпорту енергоресурсів.

Більш повно характеризує енергетичну безпеку держави коефіцієнт енергоекономічної безпеки K_{EEB} , який враховує інтегральну енергоекономічну ефективність базових промислових технологій:

$$K_{EEB} = K_{EB} * E_{EH} / E_{EC}, \quad (2)$$

де E_{EH} – енергоефективність національних технологій, E_{EC} – світовий рівень енергоефективності. Так, коефіцієнт енергоекономічної безпеки $K_{EEB} = 0,27$ Італії майже вдвічі перевищує коефіцієнт енергетичної безпеки $K_{EB} = 0,16$ завдяки високому рівню енергоефективності технологій. Україна, яка за рівнем енергетичної безпеки $K_{EB} = 0,52$ знаходиться серед розвинених країн Європи, внаслідок енергозатратних базових технологій має $K_{EEB} = 0,15$, а для Росії з найвищим $K_{EB} = 1,57$ з тих же причин $K_{EEB} = 0,65$ (рис.2).

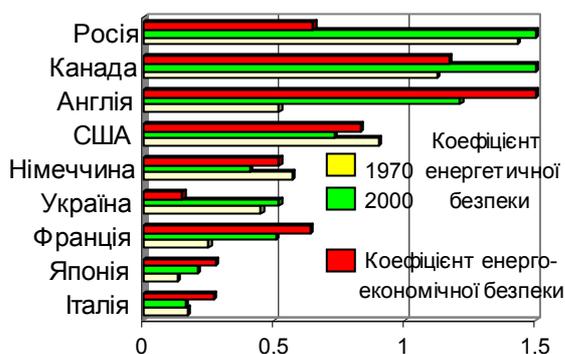


Рисунок 2 – Динаміка самозабезпеченості енергоресурсами

Для визначення конкурентоспроможності енергоносіїв та енергетичних технологій скористаємось визнаними світовими рейтингами: GCI (the Growth Competitive Index) – за індексом перспективи зростання конкурентоспроможності та BCI (the Business Competitiveness Index) – за індексом поточної конкурентоспроможності. Перший рейтинг оцінює перспективи конкурентоспроможності в залежності від прогнозованих та стохастичних варіацій головних чинників, а другий визначає конкурентоспроможність на основі існуючих детермінованих економічних та технологічних інтегральних параметрів.

Відзначимо, що об'єктивна інтегральна економічна оцінка конкурентоспроможності енергоносіїв та енергетичних технологій може бути здійснена тільки на базі фундаментальних законів термодинаміки і теорії інформації як ентропії інформації $S_I = k \ln \Delta\Omega$, де k - константа нормування, $\Delta\Omega$ – сукупність інформаційних параметрів [8], в якості яких використовуємо екологічні, економічні, енергетичні та технологічні параметри, що враховують поновлюваний характер енергії, відсутність витрат на видобуток, транспортування, утилізацію нетрадиційних енергоносіїв, гарантовану енергетичну безпеку, мінімальний вплив на навколишнє середовище і соціальні умови. Загальний аналітичний вираз, яким згідно з методикою BCI визначається рейтинг конкурентоспроможності P_{ET} енергоносіїв та енергетичних технологій:

$$P_{ET} = k \times \ln \left[\left(\frac{B_{OE}}{B_{OE} + B_{ЗД} + B_{ЗП} + B_{ЗВ}} \right) \times \left(\frac{B_{BE} - B_{ПЕ}}{B_{BE} + B_{ОБ}} \right) \times (K_{КД} K_{ВП} K_{ТС}) \times \left[1 + K_{СЕ} \exp\left(\frac{T_C}{T_C + 10^2}\right) - K_{ІЕ} \exp\left(-\frac{T_I}{T_I + 10^2}\right) \right] \right], \quad (3)$$

де k – константа нормування; B_{OE} – загальні матеріальні або фінансові витрати виробництва одиниці енергії, \$/ГДж; $B_{ЗД}$ – загальні матеріальні або фінансові екологічні збитки видобування одиниці первинної енергії, \$/ГДж; $B_{ЗП}$ – загальні матеріальні або фінансові екологічні збитки перетворення первинної енергії, \$/ГДж; $B_{ЗВ}$ – загальні матеріальні або фінансові екологічні збитки використання вторинної енергії, \$/ГДж; B_{BE} – вартість (тариф) одиниці вторинної енергії, \$/ГДж; $B_{ПЕ}$ – вартість (собівартість) одиниці первинної енергії, \$/ГДж; $B_{ОБ}$ – приведена до визначеної цінової категорії вартість технологічного обладнання для виробництва одиниці енергії, \$/ГДж; $K_{КД}$ – безрозмірний коефіцієнт перетворення енергії (коефіцієнт корисної дії) обладнання; $K_{ВП}$ – коефіцієнт використання генеруючих потужностей; $K_{ТС}$ – коефіцієнт технічного стану обладнання (ступінь зношеності генеруючих потужностей); $K_{СЕ}$ – коефіцієнт самозабезпечення енергоносія; T_C – термін вичерпання власного енергоносія, років; $\exp\left(\frac{T_C}{T_C + 10^2}\right)$ –

визначений згідно з моделлю Гомперца [9] коефіцієнт варіації за часом економічної ефективності видобування власних енергоносіїв; $K_{ІЕ}$ – частка використання імпортованого енергоносія; T_I – термін вичерпання джерела імпорту енергоносія, років; $\exp\left(-\frac{T_I}{T_I + 10^2}\right)$ – визначений згідно з моделлю Гомперца коефіцієнт варіації за часом економічної ефективності диверсифікації енергоносія. Для будь-яких енергоносіїв P_{ET} зростає при збільшенні коефіцієнту самозабезпеченості $K_{СЕ}$ та потенціалу $\exp\left(\frac{T_C}{T_C + 10^2}\right)$ джерел видобутку енергоносія і зменшується при збільшенні частки імпорту $K_{ІЕ}$. Видається очевидним, що біенергетичні монотехнології (перетворення одно-

го виду енергії в інший, наприклад, геліотеплоенергетика, геліофотоенергетика, воднева енергетика і т.ін.) більш ефективні в порівнянні з триенергетичними бітехнологіями (з подвійним перетворенням енергії, наприклад, теплової в механічну, потім в електричну), для яких $K_{КД}=K_1 \cdot K_2$, оскільки коефіцієнти перетворення енергії першою та другою технологіями завжди $K_1 < 1$ і $K_2 < 1$. Рейтинг конкурентоспроможності енергоносіїв та енергетичних технологій згідно з методикою GCI також розраховується за формулою (3) при умові використання прогнозованих в часі екологічних, технологічних, енергоекономічних та фінансових параметрів, які визначають конкурентоспроможність.

Значення питомої вартості $V_{ПЕ}$ найбільш поширених традиційних та альтернативних енергоносіїв наведені на рис.3. Як і очікувалось, з урахуванням наявних в Україні на середину 2006 року ринкових цін (тарифів) на енергоносії, вартість 1 ГДж енергії найменша при використанні ядерного палива та найбільша при використанні нафтопродуктів (курс НБУ 5,05 грн/\$). На жаль, активно пропаговані останнім часом біоенергоносії значною мірою поступаються традиційним за енергетичною ефективністю, а вартість сільськогосподарських технологій має стійку тенденцію до зростання, тому розвиток використання біоенергоносіїв економічно доцільний тільки в разі вичерпання традиційних енергоносіїв. Оскільки біоенергоносії не виробляються в Україні в промислових масштабах, їх питома вартість розрахована за світовими та європейськими цінами. Зокрема, ринкова вартість біоетанолу в Бразилії становить $\$192/\text{м}^3$, в США – $\$300/\text{м}^3$, в Європі – $\$540/\text{м}^3$, а собівартість українського біоетанолу з відходів цукрової меляси може становити $\$135/\text{м}^3$, що з урахуванням екологічних пріоритетів достатньо конкурентоспроможно навіть попри меншої енергоефективності.



Рисунок 3 – Вартість одиниці енергії різних енергоносіїв

На основі вищевикладеного методами комп'ютерного моделювання розрахуємо P_{ET} за методикою VCI, використовуючи існуючу схему диверсифікації поставок нафти та природного газу із Росії, а термін вичерпання власних запасів вугілля оцінимо в 200 років, нафти, газу та урану з урахуванням перспектив освоєння нових родовищ оцінимо в 30 років. Коефіцієнт самозабезпечення поновлюваних гідро- біо- вітро- та геліоенергоносіїв $K \equiv 1$, а термін вичерпання $T_C \equiv \infty$. Коефіцієнт використання потужності $K_{ВЛ}$ для теплової енергетики становить 0,32-0,36, для атомної енергетики – 0,86, а коефіцієнт технічного стану $K_{ТС}$ енергетичної галузі ледве досягає 0,6 [5]. Рейтинг конкурентоспроможності P_{ET} основних енергоносіїв та енергетичних технологій, розрахований за методикою VCI станом на середину 2006 року наведено на рис.4.



Рисунок 4 – Рейтинги конкурентоспроможності основних енергетичних технологій

Використовуючи розраховані рейтинги конкурентоспроможності енергетичних технологій, визначимо основи економічно доцільного стратегічного державного менеджменту національної енергетики згідно з новітньою концепцією “Енергетичної стратегії України на період до 2030 року” [10] з урахуванням перспектив вичерпання викопних енергоносіїв, обмеженості власних гідроресурсів, екологічних та соціальних наслідків недостатнього використання альтернативної енергетики, гарантій енергетичної та національної безпеки. Як і очікувалось, найбільш конкурентоспроможною виявляється вітроенергетика насамперед з урахуванням соціально-екологічних чинників та внаслідок високої енергетичної ефективності ($K_{КД}=0,9$), низької собівартості електроенергії в 0,03-0,08 \$/кВт-год, невичерпності вітроенергії, наявності добре відпрацьованих технологій і власного устаткування вітроенергетики, проте найбільш доцільно розвивати вітроенергетику на узбережжі Чорного та Азовського морів, у Львівській, Івано-Франківській та Донецькій областях, що дозволило б до 2030 року розраховувати на покриття 10-15% загальної прогнозованої потреби електроенергії. Геліофотоенергетика за енергетичною ефективністю, собівартістю електроенергії в 0,23-0,27 \$/кВт-год, екологічним впливом значно програє вітроенергетиці та і енергетична ефективність найбільш розповсюджених кремнієвих фотоперетворювачів становить $K_{КД}=18\%$, арсенід – галієвих – $K_{КД}=37\%$, новітніх інноваційних зразків – до 42%, що вже перевищує показники традиційної теплової енергетики, а рейтинг конкурентоспроможності вдвічі вищий в порівнянні з традиційною енергетикою, проте промислове використання найбільш доцільно в південних регіонах. Оптимістичні прогнози середини ХХ століття щодо розвитку атомної енергетики як безмежного джерела енергії не справдилися внаслідок недостатньої сукупної ефективності АЕС в порівнянні з новітніми енергетичними технологіями, насамперед вітро- та геліоенергетикою, зниження прогнозованого рівня безпеки АЕС, збільшення витрат на переробку та утилізацію радіаційних відходів, зростаючої загрози неконтрольованого розповсюдження атомних озброєнь та радіаційних речовин в терористичних цілях. Подальший розвиток національної ядерної енергетики має здійснюватись шляхом створення повного замкненого циклу ядерного палива, добудови і введення в експлуатацію розпочатих ще в 1981-1984 роках Дністровської, Ташлицької, Канівської ГАЕС, ра-

ціональної диверсифікації експорту електроенергії та промислового виробництва водню задля стабілізації режиму енергоблоків АЕС. Теплова електроенергетика експлуатується переважно в режимі компенсації пікових навантажень з коефіцієнтом використання потужностей $K_{ВП} = 0,32-0,36$, що спричиняє 365 пусків-зупинок у рік енергоблоків ТЕС потужністю 200 МВт і додаткові витрати понад 7,4 млн. грн/рік. Мінімальною виявляється конкурентоспроможність нафтопродуктів та природного газу насамперед в зв'язку зі значним екологічним впливом, обмеженістю власних енергоресурсів, стрімким зростанням вартості та критичності їх імпорту, а достатня забезпеченість національної енергетики власним вугіллям підвищує його конкурентоспроможність попри більших екологічних збитків. Використання біопалива на транспорті дійсно конкурентоспроможне тільки при наявності новітніх промислових технологій його виробництва і насамперед з урахуванням екологічних пріоритетів. Відзначимо перспективність розвитку технологій геліотеплоенергетики та біоенергетики в побутовому секторі економіки як наслідок їх надзвичайно високої конкурентоспроможності. Відзначимо також, що конкурентоспроможність викопних і біологічних енергоносіїв буде невпинно знижуватись насамперед внаслідок вичерпання викопних енергоносіїв, зменшення загального об'єму продукованої біосферою біомаси та ескалації їх вартості.

Висновки. Як наслідок специфіки структури національного паливно-енергетичного комплексу, частка непоновлюваних енергоносіїв є надто велика, а новітні технології енергозбереження не з'являться відразу навіть за безмежного фінансування, тому з огляду на наявний власний потенціал і стрімку ескалацію вартості традиційних енергоресурсів тільки використання альтернативних джерел енергії та енергетичних технологій спроможне забезпечити в найближчому майбутньому реальний розвиток національного енергетичного комплексу, підвищити рівень національної безпеки, соціальних стандартів життя громадян, перспективи світової та євроінтеграції України. Відсутність дієвих національних програм та ефективного державного менеджменту енергозбереження і використання поновлюваних джерел енергії створює реальну загрозу стабільності національного енергетичного комплексу не тільки в зв'язку з прогнозованими екстерналіями енергетики, але і внаслідок стрімко прогресуючих тенденцій глобалізації економіки, для нівелювання впливу яких найбільш розвинені країни світу вже сьогодні запроваджують надзвичайні превентивні заходи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Веклич О. Екологічний чинник формування конкурентоспроможності національної економіки // Економіка України. – 2005. – № 12. – С.65-72.
2. Бутко М. Інвестиційні аспекти підвищення конкурентоспроможності економіки // Економіка України. – 2005. – № 5. – С.40-45.
3. Буравльов Е., Стогній В. Науково-технологічна безпека України у контексті глобалізації // Економіка України. – 2005. – № 3. – С.32-40.
4. Бойченко С.В.. Концепція енергоощадності в нафтопродуктозабезпеченні // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 2005. – № 2. – С.9-12.
5. Куцан Ю.Г. Екологічні інвестиційні проекти Мінпаливенерго України // Енергетика и Электрификация. – 2003. – № 1. – С.14-17.
6. В.Поляков. Обеспеченность мировой экономики энергоносителями в XXI веке // Мировая экономика и международные отношения. – 2005. – № 6. – С.106-112.
7. В.В.Бушев, А.А.Троицкий. Энергоэффективность и экономика России // Энергия: экономика, техника, экология. – 2004. – № 5. – С.10-19.

8. Юхновський І. Базові принципи вдосконалення українського суспільства: закономірності буття у контексті стаціонарної термодинаміки // Вісник НАН України. – 2006. – № 1. – С.3-13.
9. Кузьмин В.И., Галуша А.Н. Природный газ мира: состояние и перспективы // Энергосбережение. – 2005. – № 4. – С.74-80.
10. Енергетична стратегія України на період до 2030 року // Енергоінформ. – 2006. – № 12(351), № 13(352).

УДК 62-83:681.513.5

САДОВОЙ А.В., д.т.н., професор
КЛЮЕВ О.В., ст. преподаватель

Днепродзержинский государственный технический университет

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ КАСКАДОМ

Розглянуто питання технічної реалізації контуру екстремального регулювання в складі релейно-векторної системи керування асинхронним вентильним каскадом (АВК) при зміні кутової швидкості і моменту навантаження в широких межах. Розроблено функціональну схему електропривода (ЕП), запропоновано алгоритм роботи екстремального регулятора і здійснено структурно-параметричний синтез спостерігача координат АВК. Матеріали статті можна використовувати для створення енергетично ефективних асинхронних каскадних електроприводів.

Рассмотрены вопросы технической реализации контура экстремального регулирования в составе релейно-векторной системы управления асинхронным вентильным каскадом (АВК) при изменении угловой скорости и момента нагрузки в широких пределах. Разработана функциональная схема электропривода (ЭП), предложен алгоритм работы экстремального регулятора и осуществлён структурно-параметрический синтез наблюдателя координат АВК. Материалы статьи можно использовать для создания энергетически эффективных асинхронных каскадных электроприводов.

The problems of engineering realization of a circuit extreme regulating in structure of a relay vectorial control system of the asynchronous gate cascade (AGC) are considered at a modification of an angular velocity and moment of a load over a wide range. The functional scheme of the electric drive is developed, the algorithm of operation of the extreme controller is offered and the synthesis of the observer coordinates AGC is realized. The materials of paper can be used for creation of energetically effective asynchronous electric drives.

Введение. В Украине и других государствах СНГ машины и механизмы с электроприводом потребляют около 60% вырабатываемой электроэнергии. Они являются основными потребителями электроэнергии и любое, даже незначительное, сокращение потерь энергии в электроприводе может дать огромную экономию в масштабах страны.

С точки зрения энерго- и ресурсосбережения рациональным является использование систем регулируемого привода переменного тока, особенно для насосов, вентиляторов, компрессоров, на долю которых приходится до 80-90% электроэнергии, потребляемой системами электропривода многих промышленных предприятий. Приме-

нение систем регулируемого электропривода в указанных машинах и механизмах может в отдельных случаях позволить сэкономить до 25-50% электроэнергии [1]. Поскольку в электроприводах турбомеханизмов широко используются электрические машины переменного тока, то становится актуальным вопрос создания асинхронного ЭП с высокими динамическими и энергетическими показателями.

В настоящее время перспективным направлением реализации электроприводов турбомеханизмов является использование асинхронной машины с фазным ротором в каскадных схемах включения (электроприводы по схемам асинхронно-вентильный каскад (АВК) – машина двойного питания (МДП)). В [2] указывается на то, что в некоторых случаях структура системы векторного управления АД с постоянным потоком может оказаться нерациональной, так как стабилизация потока приводит к снижению коэффициента мощности в области малого момента нагрузки. Указанным недостатком обладают регулируемые ЭП механизмов с вентиляторной механической характеристикой. Очевидно, что энергетические показатели можно улучшить, изменяя поток в функции момента сил сопротивления на валу АД. При этом целью регулирования следует принять достижение экстремума некоторого критерия качества и слежение за дрейфом экстремума при изменении параметров и переменных состояния ЭП. Критерий качества должен отражать энергетические характеристики ЭП. Для реализации поставленной задачи требуется ввести в состав САУ контур экстремального регулирования. Поскольку системы управления турбомеханизмами предназначены для стабилизации скорости в длительных режимах работы, то необходимо обеспечить предельные энергетические показатели ЭП в установившихся режимах эксплуатации.

Постановка задачи. Цель работы состоит в построении функциональной схемы релейно-векторной системы управления АВК, обеспечивающей улучшение его энергетических показателей за счёт применения контура экстремального регулирования, в структурном и параметрическом синтезе отдельных блоков схемы, составлении и описании их алгоритмов работы.

Результаты работы. Систему управления АВК целесообразно синтезировать, исходя из условия понижения потребляемой ЭП реактивной мощности, что потребует выполнения зависимости

$$Q_s = \frac{3}{2} \operatorname{Im}[\vec{U}_s \vec{I}_s^*] = \frac{3}{2} (U_{sv} I_{su} - U_{su} I_{sv}) = 0, \quad (1)$$

при которой асинхронная машина возбуждается со стороны ротора, а поле статора компенсируется потоком ротора.

Известно, что низкий коэффициент мощности асинхронно-вентильного каскада является основным недостатком этой системы электропривода [3]. Учитывая указанное свойство при рассмотрении АВК как объекта экстремального управления, в работе [4] получены следующие целевые функции, характеризующие его энергетические показатели в установившихся режимах работы

$$Q_r = \frac{3}{2k_r L_m} \Psi_s^2 (\omega_0 - \omega) + \frac{2L_\delta M_c^2 (\omega_0 - \omega)}{3N^2 k_s^2 \Psi_s^2}, \quad (2)$$

$$\cos \varphi_r = \frac{P_r}{\sqrt{P_r^2 + Q_r^2}}, \quad (3)$$

$$\text{где } P_r = \frac{3r_2 \Psi_s^2}{2L_m^2} + \frac{2r_2 M_c^2}{3N^2 \Psi_s^2} + \frac{M_c}{N} (\omega - \omega_0).$$

Выражения (2) и (3) сформированы при соблюдении условия (1).

В статье [4] в качестве переменной, изменением которой можно улучшить энергетические показатели АВК по критериям (2) и (3), предложено использовать модуль вектора потокосцепления Ψ_s при неглубоком регулировании напряжения питания статорной цепи.

Если за целевую функцию взять выражение (3), то при двухзонном регулировании скорости возникают трудности по реализации алгоритма экстремального управления в области малых скольжений. Из графиков на рис.1 видно, что в процессе регулирования скорости не представляется возможным определить её значение, при котором необходимо перестраивать алгоритм экстремального регулятора с поиска минимума на поиск максимума целевой функции или наоборот. При этом, если использовать как функцию качества выражение (2), то такая граница значений скоростей чётко обозначена и проходит через точку $\omega = \omega_0$ [4].

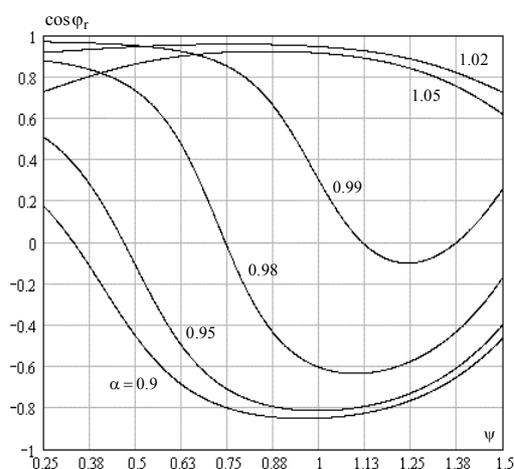


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента мощности роторной цепи от потокосцепления статора при $\mu = 0.5$

Здесь и далее исследования проводятся для двигателя 4АНК315М4У3 со следующими техническими данными: $P_n = 250$ кВт, $U_\phi = 220$ В, $n_n = 1500$ об/мин. Для других АД результаты получаются аналогичными. Все величины на рис.1 приведены в относительных единицах, а именно:

$$\mu = \frac{M}{M_n}, \quad \psi = \frac{\Psi_s}{\Psi_{sh}}, \quad \alpha = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{— относительные}$$

значения электромагнитного момента, потокосцепления статора и скорости ротора соответственно.

В данной работе коэффициент мощности роторной цепи рассчитывается как угол сдвига фаз между вектором тока ротора и добавочной ЭДС, подводимой к фазам ротора. В двигательном режиме при сверхсинхронной скорости добавочная ЭДС и активная составляющая тока ротора совпадают по направлению, а при скорости ниже синхронной — направлены встречно, что и определяет знак коэффициента мощности роторной цепи.

По причине близости экстремумов функций (2) и (3) АВК, оптимизированный по величине реактивной мощности роторной цепи, будет также обладать высоким значением коэффициента мощности [4]. Поэтому если условия эксплуатации АВК требуют его работы в области малых скольжений или перехода через синхронную скорость, то целесообразнее применять настройку экстремального регулятора по критерию (2).

В функции (2) и (3) входит величина статического момента на валу асинхронной машины M_c , которая не поддается приборному измерению. К тому же для реализации алгоритмов управления активной составляющей тока ротора и скоростью АВК [5]

$$U_{pc} = -I_{rv}^* \text{sign}[\omega^* - \omega - \gamma_2 p \omega - \gamma_3 p I_{rv}]; \quad U_{pat} = U_m \text{sign}[U_{pc} - I_{rv} - \gamma_1 p I_{rv}] \quad (4)$$

требуется организовать обратные связи по производным от скорости и тока. Прямое, тем более многократное дифференцирование сигналов обратных связей таких быстрых переменных как ток, неизбежно содержащих высокочастотную составляющую помехи, сопряжено с большими техническими трудностями. Для преодоления указанных препятствий на пути технической реализации системы экстремального управления АВК

необходимо применить наблюдающее устройство, идентифицирующее не только переменные состояния объекта управления, но и недоступные прямому измерению внешние воздействия.

Наблюдатель состояния (НС) строится на основе известной структуры и параметров линейного объекта. Начальные значения векторов состояния объекта управления и наблюдателя должны быть одинаковыми, а входные воздействия прикладываются одновременно к реальному объекту и к наблюдателю. Уравнения, описывающие динамические процессы в канале управления по моментобразующей составляющей тока ротора АВК, имеют вид:

$$\begin{aligned} p\omega_r &= -\frac{3Nk_s\Psi_s}{2J}I_{rv} - \frac{M_c}{J}; \\ pI_{rv} &= \frac{k_s N\Psi_s}{L_\delta}\omega_r - \frac{R''}{L_\delta}I_{rv} + \frac{U_{rv}}{L_\delta} - \frac{k_s}{L_\delta}U_{sv} - \frac{U_{pr}}{L_\delta}, \end{aligned} \quad (5)$$

где U_{rv}, U_{sv} – активные составляющие напряжений ротора и статора соответственно; $U_{pr} = (\omega_k - N\omega_r)L_\delta I_{ru}$ – сигнал перекрёстной связи; ω_k – частота вращения опорного вектора потокосцепления статора; M_c – момент сопротивления.

Для модели канала активной мощности АВК (5) переменные U_{rv}, U_{sv}, U_{pr} служат входными сигналами, а величина M_c – возмущающим воздействием. Тогда характеристическое уравнение объекта (5) определится следующим образом:

$$\begin{vmatrix} p & \frac{3Nk_s\Psi_s}{2J} \\ -\frac{Nk_s\Psi_s}{L_\delta} & p + \frac{R''}{L_\delta} \end{vmatrix} = p^2 + \frac{R''}{L_\delta}p + \frac{3N^2k_s^2\Psi_s^2}{2JL_\delta}. \quad (6)$$

Формируя вектор состояния, вводим обозначения $x_1 = \omega_r$, $x_2 = I_{rv}$. Поскольку возмущение M_c не может быть измерено и введено в наблюдающее устройство, то оно рассматривается как одна из переменных состояния $x_3 = M_c$ расширенного таким образом объекта управления [6]. Если рабочий орган имеет вентиляторную механическую характеристику, то всегда, хотя бы очень приближённо, можно записать её аналитическое выражение в следующем виде:

$$M_c = M_0 + (M_{ch} - M_0) \left(\frac{\omega_r}{\omega_{гн}} \right)^2, \quad (7)$$

где M_c – момент сопротивления производственного механизма при скорости ω_r ; M_0 – момент трения в движущихся частях; M_{ch} – момент сопротивления при номинальной скорости $\omega_{гн}$.

Дифференцируя (7) по времени с использованием первого выражения системы (5), получим следующее уравнение, связывающее внешнее воздействие M_c с переменными состояния объекта (5)

$$pM_c = -\frac{3Nk_s\Psi_s b}{2J}I_{rv} - \frac{b}{J}M_c, \quad (8)$$

где $b = \frac{2(M_{сн} - M_0)\omega_r}{\omega_{гн}^2}$ – коэффициент, изменяющийся пропорционально скорости ротора.

Если выражение (8) добавить к системе (5), то уравнения расширенного объекта управления (ОУ) в векторно-матричной форме примут вид:

$$\begin{aligned} pX &= AX + BU; \\ Y &= CX, \end{aligned} \quad (9)$$

где X – вектор состояния объекта; U – вектор измеряемых входных воздействий; A и B – матрицы состояния и входа; Y – вектор измеряемых выходных переменных и матрица выхода C , находятся как

$$X = \begin{pmatrix} \omega_r \\ I_{rv} \\ M_c \end{pmatrix}; U = \begin{pmatrix} U_{rv} \\ U_{sv} \\ U_{pr} \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{3Nk_s\Psi_s}{2J} & -\frac{1}{J} \\ \frac{Nk_s\Psi_s}{L_\delta} & \frac{R''}{L_\delta} & 0 \\ 0 & -\frac{3Nk_s\Psi_s b}{2J} & -\frac{b}{J} \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_\delta} & -\frac{k_s}{L_\delta} & -\frac{1}{L_\delta} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$Y = I_{rv}; C = (0 \ 1 \ 0).$$

Ранг матрицы наблюдаемости $Q = [C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T]$ равен порядку системы (9) $n = 3$, т.е. расширенный объект полностью наблюдаем и задача оценки его состояния имеет решение.

Наблюдающее устройство описывается уравнением [6]

$$p\hat{X} = (A - KC)\hat{X} + BU + KY, \quad (10)$$

где \hat{X} – восстановленный наблюдателем вектор состояния объекта; K – вектор коэффициентов корректирующих связей НС.

Выбор элементов вектора модальной обратной связи $K = (k_1 \ k_2 \ k_3)^T$ означает задание определённого вида характеристического уравнения наблюдателя, которое записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \det[pI - (A - KC)] &= \begin{vmatrix} p & \frac{3Nk_s\Psi_s}{2J} + k_1 & \frac{1}{J} \\ -\frac{Nk_s\Psi_s}{L_\delta} & p + \frac{R''}{L_\delta} + k_2 & 0 \\ 0 & \frac{3Nk_s\Psi_s b}{2J} + k_3 & p + \frac{b}{J} \end{vmatrix} = p^3 + \left(\frac{R''}{L_\delta} + \frac{b}{J} + k_2 \right) p^2 + \\ &+ \left(\frac{3N^2 k_s^2 \Psi_s^2}{2JL_\delta} + \frac{Nk_s\Psi_s k_1}{L_\delta} + \frac{bR''}{JL_\delta} + \frac{bk_2}{J} \right) p + \frac{Nk_s\Psi_s bk_1}{JL_\delta} - \frac{Nk_s\Psi_s k_3}{JL_\delta}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для придания наблюдателю желаемых динамических свойств зададимся стандартной полиномиальной формой третьего порядка

$$D(p) = p^3 + A_1\Omega_0 p^2 + A_2\Omega_0^2 p + \Omega_0^3, \quad (12)$$

где Ω_0 – среднегеометрический корень (СГК) характеристического уравнения наблюдающего устройства.

Коэффициенты A_1 и A_2 определяют размещение корней характеристического уравнения НС на комплексной плоскости. Для распределения по Баттерворту имеем $A_1 = A_2 = 2$. Из сравнения сомножителей при одинаковых степенях p уравнений (11) и (12) находятся аналитические выражения для коэффициентов обратных связей вектора K

$$k_2 = 2\Omega_0 - \frac{R''}{L_\delta} - \frac{b}{J};$$

$$k_1 = \frac{2\Omega_0^2 L_\delta}{Nk_s \Psi_s} - \frac{3Nk_s \Psi_s}{2J} - \frac{bR''}{JNk_s \Psi_s} - \frac{bL_\delta k_2}{JNk_s \Psi_s};$$

$$k_3 = bk_1 - \frac{\Omega_0^3 J L_\delta}{Nk_s \Psi_s}.$$
(13)

Преобразовав (10), получим уравнение

$$p\hat{X} = A\hat{X} + K(Y - C\hat{X}) + BU, \quad (14)$$

которое для каждой координаты в отдельности записывается так:

$$p\hat{\omega}_r = -\frac{3Nk_s \Psi_s}{2J} \hat{I}_{rv} - \frac{\hat{M}_c}{J} + k_1(I_{rv} - \hat{I}_{rv});$$

$$p\hat{I}_{rv} = \frac{Nk_s \Psi_s}{L_\delta} \hat{\omega}_r - \frac{R''}{L_\delta} \hat{I}_{rv} + k_2(I_{rv} - \hat{I}_{rv}) + \frac{U_{rv}}{L_\delta} - \frac{k_s}{L_\delta} U_{sv} - \frac{U_{pr}}{L_\delta};$$

$$p\hat{M}_c = -\frac{3Nk_s \Psi_s b}{2J} \hat{I}_{rv} - \frac{b}{J} \hat{M}_c + k_3(I_{rv} - \hat{I}_{rv}).$$
(15)

Система уравнений (15) определяет структуру наблюдающего устройства и его алгоритм работы.

Так как на объект всегда действуют возмущения, которые невозможно измерить и ввести в наблюдатель, а также может иметь место некоторое несоответствие между математическим описанием объекта и наблюдателя, рекомендуется выбирать Ω_0 так, чтобы быстродействие наблюдателя было несколько выше быстродействия той системы, которая замкнута через него. Быстродействие ОУ определяется его СГК, который находится по формуле [7]:

$$\Omega_{об} = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} = Nk_s \Psi_s \sqrt{\frac{3}{2JL_\delta}}, \quad (16)$$

где a_0 и a_2 – коэффициенты при p^2 и p^0 характеристического уравнения (6), причём $\Omega_0 = (2...3)\Omega_{об}$ [7].

Структурная схема НС, составленная в соответствии с системой уравнений (15), показана на рис.2. Для коррекции значений текущих переменных НС контролируется моментобразующая составляющая тока ротора I_{rv} , которая сравнивается с аналогичной переменной \hat{I}_{rv} , вычисляемой наблюдателем, и их разность через блоки корректирующих обратных связей (k_1, k_2, k_3) подаётся на входы интеграторов наблюдающего устройства. При несовпадении значений переменных объекта и их оценок работает корректирующая цепь наблюдателя, так как появляется ошибка идентификации тока I_{rv} . Внешние воздей-

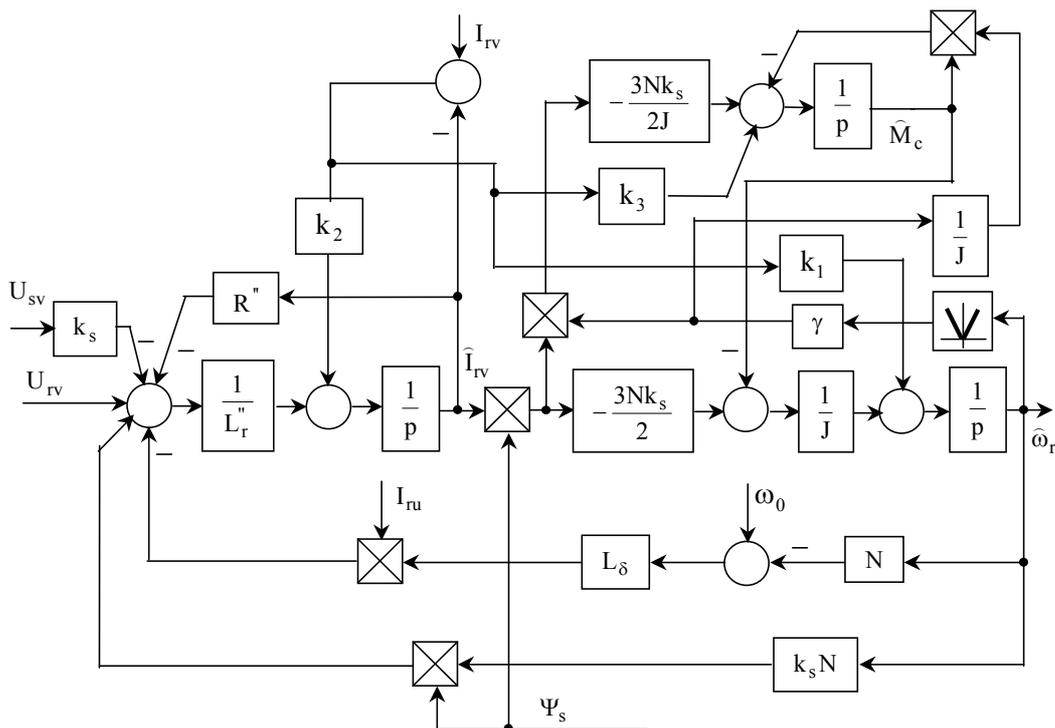


Рисунок 2 – Структурная схема наблюдателя состояния третьего порядка, оценивающего скорость и момент статической нагрузки АВК

ствия U_{rv}, U_{sv}, U_{pr} измеряются или вычисляются и подаются на вход наблюдателя. Для упрощения его структуры при вычислении сигнала перекрёстной связи через потоки рассеяния U_{pr} скорость вращения опорного вектора потокосцепления статора ω_k заменяется значением синхронной скорости ω_0 . В выражении для коэффициента b вместо скорости ротора берётся её оценка $\hat{\omega}_r$, а соотношение $\frac{2(M_{сн} - M_0)}{\omega_{ГН}^2}$ заменяется коэффициентом γ .

Блок выделения модуля необходим для применения наблюдателя в АВК с реверсированием скорости по ротору. Если реверс осуществляется переключением фаз статора, то необходимо ещё изменить знак сигнала круговой частоты сети ω_0 на противоположный. Как видно из формул (13), коэффициенты корректирующих связей k_1, k_2 и k_3 изменяются в функции потока статора, оценки скорости ротора, а также зависят от Ω_0 . Динамические ошибки оценивания переменных состояния объекта будут тем меньше, чем больше величина Ω_0 . Однако возможности увеличения Ω_0 ограничены, так как оно влечёт за собой возрастание коэффициентов вектора K , что приводит к колебательности и далее к потере устойчивости САУ, замкнутой через наблюдатель.

На рис.3 представлена функциональная схема релейно-векторной системы управления АВК с контуром экстремального регулирования. Силовая часть ЭП отличается от традиционной в схеме управления скоростью и реактивной мощностью АВК наличием в статорной цепи регулятора напряжения (РН). Он необходим для реализации экстремального управления в случае, когда варьируемой координатой, с помощью которой осуществляется поиск оптимального режима, служит модуль вектора потокосцепления статора. Поскольку речь идёт о мощных ЭП, к которым не предъявляется требование обеспечения высоких динамических показателей, то возможно использование как тиристорных, так и дроссельных регуляторов напряжения.

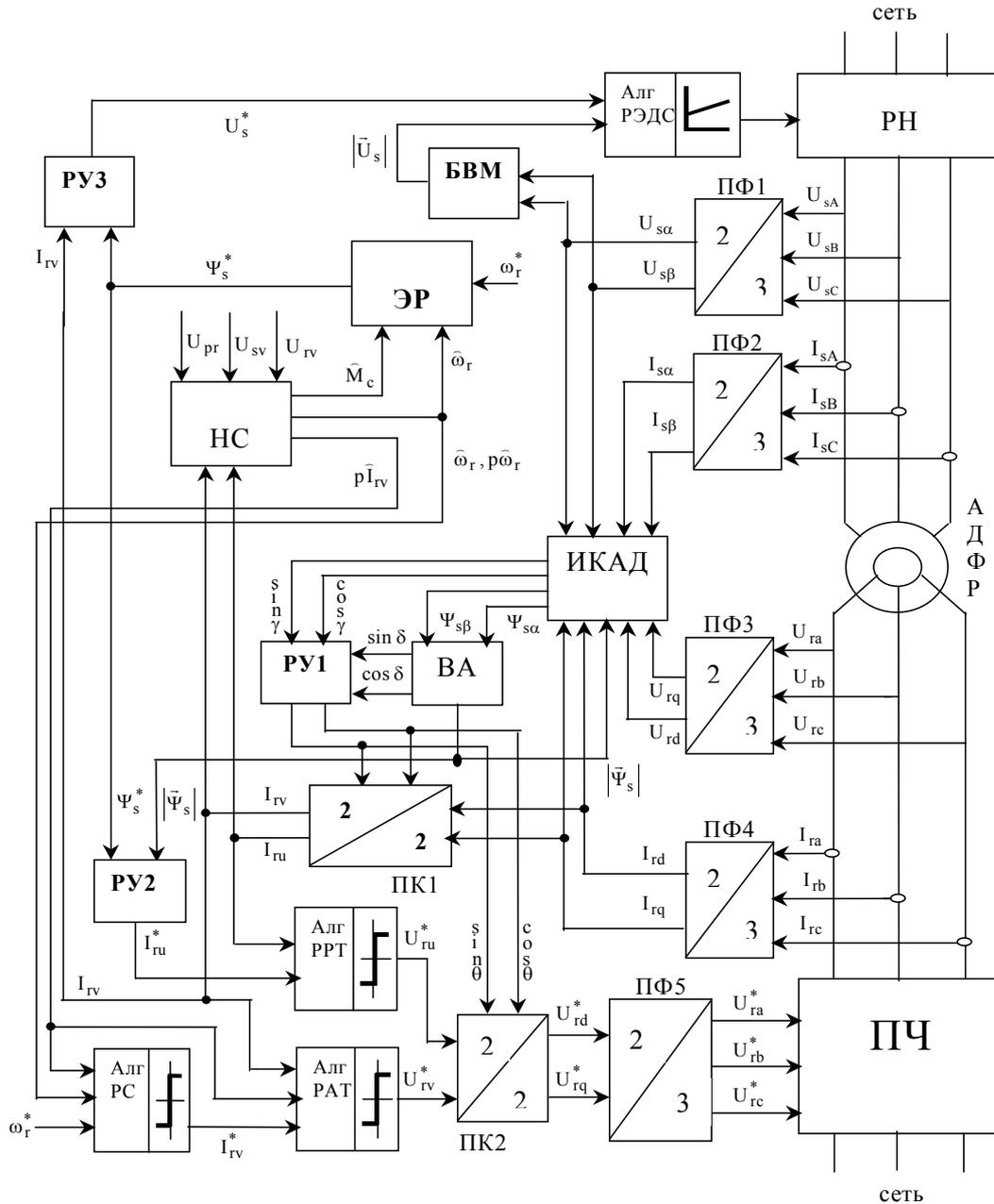


Рисунок 3 – Функциональная схема САУ АВК с контуром экстремального регулирования и восстановлением переменных наблюдателем состояния

Идентификация момента статической нагрузки и скорости ротора осуществляется наблюдателем состояния (НС), структурная схема которого приведена на рис.2. Для реализации регуляторами алгоритмов управления (4) необходимо организовать обратные связи по первым производным скорости и активного тока ротора, сигналы которых также вычисляются в НС по уравнениям его математической модели (15). На вход НС подаются три измеряемых внешних воздействия U_{sv}, U_{rv}, U_{pr} , которые определяются по формулам

$$U_{sv} = U_{s\beta} \cos \delta - U_{s\alpha} \sin \delta; \quad U_{rv} = U_{rq} \cos \theta - U_{rd} \sin \theta; \quad U_{pr} = (\omega_0 - N\hat{\omega}_r)L_\delta I_{ru}. \quad (17)$$

Контур регулирования скорости замыкается через наблюдающее устройство, с выхода которого поступают сигналы обратных связей $\hat{\omega}_r, p\hat{\omega}_r$ и $p\hat{I}_{rv}$. Переменные I_{rv} и I_{ru} вычисляются на основе измеренных датчиками величин токов I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} .

В рассматриваемой САУ отсутствует датчик положения вала двигателя. Вместо этого датчика идентификатор координат АД (ИКАД) реализует его модель. Применяемый косвенный способ измерения механической переменной основан на том, что информация о ней содержится в протекающих в АМ электромагнитных процессах и может быть получена путём измерения электрических параметров статора и ротора. Преобразователи фаз ПФ1-ПФ4 переводят токи и напряжения статора и ротора из фазной системы координат в ортогональные двухосные системы по выражениям, подробно рассмотренным в [5]. Далее сигналы, пропорциональные проекциям векторов токов и напряжений на оси α, β и d, q , подаются на входы ИКАД. Идентификатор координат представляет собой микропроцессорное устройство, в котором информация об угле поворота вала двигателя получается в результате математических вычислений в реальном масштабе времени на основе измеренных мгновенных значений токов и напряжений АВК.

Оценивание тригонометрических функций косинуса и синуса угла поворота оси d относительно оси α производится по формулам:

$$\cos \gamma = \frac{\Psi_{s\alpha} \Psi_{sd} + \Psi_{s\beta} \Psi_{sq}}{\Psi_s^2}; \quad \sin \gamma = \frac{\Psi_{s\beta} \Psi_{sd} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{sq}}{\Psi_s^2}, \quad (18)$$

где $\Psi_s^2 = \Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2$ – квадрат модуля потокосцепления статора.

Проекции вектора $\vec{\Psi}_s$ на оси α, β и d, q определяются в соответствии с равенствами:

$$\Psi_{s\alpha} = \int (U_{s\alpha} - r_1 I_{s\alpha}) dt; \quad \Psi_{s\beta} = \int (U_{s\beta} - r_1 I_{s\beta}) dt; \quad (19)$$

$$\Psi_{sd} = \frac{1}{k_s} \int (U_{rd} - r_2 I_{rd}) dt - L_\sigma I_{rd}; \quad \Psi_{sq} = \frac{1}{k_s} \int (U_{rq} - r_2 I_{rq}) dt - L_\sigma I_{rq}, \quad (20)$$

где $L_\sigma = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m}$.

В блоке векторного анализатора (ВА) происходит вычисление модуля и угла поворота опорного вектора потокосцепления статора относительно оси α . В решающем устройстве РУ1 вычисляется угол поворота вектора $\vec{\Psi}_s$ относительно ротора. Преобразователи координат ПК1 и ПК2 пересчитывают проекции векторов в системе d, q на оси u, v и наоборот. Блок ПФ5 предназначен для реализации вычислений обратных тем, что осуществляются в ПФ3. Соотношения, которые реализуют указанные блоки функциональной схемы, подробно рассмотрены в [5]

Релейные регуляторы скорости (РС) и моментобразующей составляющей тока ротора (РАТ) в канале активной мощности реализуют алгоритмы управления (4). Регулятор реактивной составляющей тока ротора (РРТ) имеет следующий алгоритм управления:

$$U_{\text{ppt}} = U_m \text{sign} [I_{ru}^* - I_{ru}]. \quad (21)$$

Величина задания РРТ рассчитывается в РУ2 из условия обеспечения нулевого значения реактивной мощности статорной цепи по формуле:

$$I_{ru}^* = \frac{\Psi_s^*}{L_m (\Psi_\delta)}, \quad (22)$$

причём вначале определяется величина модуля вектора потокосцепления воздушного зазора Ψ_δ по соотношению

$$\Psi_\delta = \Psi_s \sqrt{1 + \frac{4\hat{M}_c^2 L_{s\sigma}^2}{9N^2 \Psi_s^4}}, \quad (23)$$

а затем значение функции $L_m(\Psi_\delta)$ по выражению

$$L_m = L_{mn} (1.505 - 0.501\varphi^2), \quad (24)$$

где L_{mn} – взаимная индуктивность, рассчитанная из паспортных данных АД;

$\varphi = \frac{\Psi_\delta}{\Psi_{\delta n}}$ – относительное значение потока в воздушном зазоре. Функция $L_m = L_m(\Psi_\delta)$

учитывает насыщение двигателя по главному магнитному пути. Величина $\Psi_{\delta n}$ рассчитывается при номинальном моменте нагрузки.

В блоке вычисления модуля (БВМ) определяется величина модуля вектора напряжения статора

$$|\vec{U}_s| = \sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}, \quad (25)$$

которая как сигнал обратной связи поступает в блок регулятора статорной ЭДС (РЭДС). Величина задающего сигнала РЭДС рассчитывается в блоке РУЗ по следующему выражению:

$$U_s^* = \omega_0 \Psi_s^* - k_s r_1 I_{rv}. \quad (26)$$

Пропорционально-интегральный регулятор ЭДС настроен на модульный оптимум. Канал регулирования напряжения позволяет с нулевой статической ошибкой обрабатывать как изменяющиеся сигналы задания, так и возмущающие воздействия со стороны питающей сети.

Экстремальный регулятор (ЭР) включен в контуры регуляторов реактивного тока ротора (РРТ) и ЭДС статора (РЭДС), воздействуя на систему через величины их задающих сигналов. Основная задача ЭР состоит в определении величины Ψ_s^* для обеспечения экстремальных значений функций качества (2) или (3) в любой точке рабочего диапазона регулирования скорости при ограничении напряжения статора. Таким образом, можно записать

$$\text{extr}_{\Psi_s} \left\{ Q_r(\omega_r, M_c, \Psi_s) \Big|_{U_\phi \leq U_{m\phi}} \right\} \quad \text{или} \quad \text{extr}_{\Psi_s} \left\{ \cos \varphi_r(\omega_r, M_c, \Psi_s) \Big|_{U_\phi \leq U_{m\phi}} \right\}, \quad (27)$$

где $U_{m\phi}$ – амплитуда номинального фазного напряжения статора.

Блочная схема алгоритма численного решения экстремальных задач (27) показана на рис.4, где введены следующие обозначения: $\Psi_{s\min}, \Psi_{s\max}$ – значения потокосцепления статора, определяющие границы его варьирования; ε – вспомогательный параметр, задающий точность вычисления экстремума; F_0, F_1 – значения целевой функции.

В своей работе ЭР через одинаковые интервалы времени производит сканирование своих входов, на которые подаются сигнал задания по скорости, сигналы, пропорциональные моменту нагрузки на валу АД и скорости ротора. Период сканирования, а следовательно и длительность цикла расчёта, учитывая возможности современной микропроцессорной техники, может быть небольшим, порядка 1мс. За это время, ис-

пользуя информацию о скорости и моменте статической нагрузки, ЭР производит поиск экстремума заданной функции качества в соответствии с алгоритмом метода дихотомии, показанном на рис.4. Алгоритм не требует трудоёмких процедур вычисле-

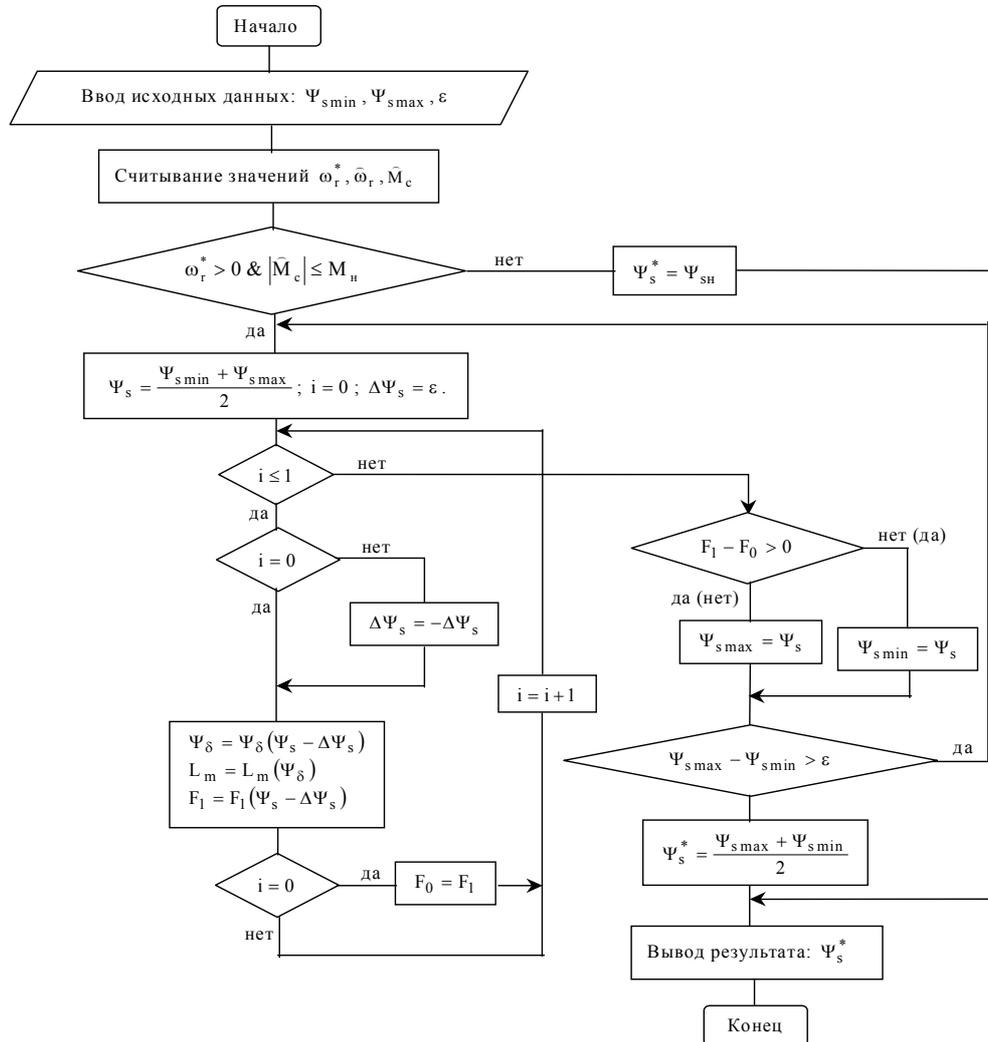


Рисунок 4 – Алгоритм расчёта Ψ_s^* при экстремальном управлении АВК

ния производных для определения экстремума целевой функции и довольно быстро позволяет попадать в малую окрестность экстремальной точки. Так, для определения положения экстремума с точностью в 1% от исходного интервала варьирования переменной Ψ_s нужно сделать всего 7 шагов дихотомии. Алгоритм соответствует поиску максимума целевой функции. Условия, указанные в скобках, обеспечивают поиск минимума. Функции качества, определяющие цели экстремального управления, формируются с учётом нелинейности кривой намагничивания путём изменения L_m в зависимости от главного потокосцепления Ψ_δ в соответствии с (23) и (24). На свой выход ЭР выдаёт сигнал, пропорциональный оптимальной величине потока Ψ_s^* , т. е. величине, при которой функция качества достигает экстремума. По истечении времени периода сканирования снова происходит опрос датчиков и для новых величин $\hat{\omega}_r$ и \hat{M}_c определяется следующее значение Ψ_s^* и т. д. Таким образом, ЭР представляет вычислительное уст-

ройство, которое выполняет математические операции, определяемые заданными целевыми функциями, и логические операции по реализации алгоритма поиска экстремума.

Оптимизация потока позволяет уменьшить потребляемую мощность в установленном режиме путём снижения уровня питающего напряжения. В переходных режимах ЭР также продолжает работать, определяя величину потока статора в функции изменяющегося момента нагрузки на валу. При вентиляторном характере нагрузки с плавным её изменением система управления создаёт необходимый для разгона АВК динамический момент. При $\widehat{M}_c > M_n$ для увеличения перегрузочной способности двигателя контур настройки на экстремальную величину потока размыкается и ЭР на свой выход выставляет номинальное значение потокосцепления $\Psi_s^* = \Psi_{sn}$ без реализации итерационной процедуры поиска экстремума. Сигнал ω_r^* вводится в ЭР для определения начала пуска и включения контура экстремального регулирования.

Графики переходных процессов в САУ АВК с экстремальным регулированием потока по критериям максимума коэффициента мощности и минимума реактивной мощности роторной цепи изображены на рис.5 и 6. Модель АД составлена в фазных осях с учётом влияния нелинейности кривой намагничивания на числовые значения его параметров. Предполагается, что по схеме АВК создан электропривод турбомеханизма с вентиляторной механической характеристикой. Все величины на графиках показаны в относительных единицах. Кроме уже описанных обозначений используются следующие:

и: $i_{ru} = \frac{I_{ru}}{I_r'}$; $i_{rv} = \frac{I_{rv}}{I_r'}$; $i_{su} = \frac{I_{su}}{I_s}$; $q_s = \frac{Q_s}{P_n}$; $q_r = \frac{Q_r}{P_n}$, где I_r' – амплитуда номинального

фазного тока ротора, приведенного к статору; $I_r' = \frac{I_{rn}}{k_e}$; k_e – коэффициент трансформации напряжения асинхронной машины.

Из рисунков видно, что изменение величины задания реактивного тока ротора I_{ru}^* в соответствии с (22), обеспечивает нулевое среднее значение тока I_{su} в установленном режиме и, следовательно, отсутствие в среднем потребления статорной цепью реактивной мощности. Реактивная мощность ротора изменяется пропорционально скольжению и при переходе через синхронную скорость изменяет знак на противоположный. Регулирование напряжения статора, а значит и Ψ_s , происходит только вниз от номинального значения. Моделирование проводилось для процессов возбуждения АВК, его разгона и торможения до различных значений скорости.

На рис.5 показаны переходные процессы регулирования при скоростях ниже синхронной и настройке САУ на поиск экстремума коэффициента мощности роторной цепи. Величина $\cos \varphi_r$ удерживается системой управления на предельно возможном для заданной рабочей точки уровне путём изменения потока статора (кривая 2) и при постоянном номинальном потоке (кривая 1). Как видно из графиков коэффициента мощности на рис. 5 при скоростях $0.2\omega_{гн}$ и $0.4\omega_{гн}$ его значения повышаются с уровня 0.5 до величины 0.9 (на 44%) и с 0.77 до 0.9 (на 14%) соответственно.

На рис.6 представлены графики переходных процессов при двухзонном регулировании скорости АВК и настройке контура экстремального управления на поиск экстремума реактивной мощности роторной цепи. Прохождение АВК синхронной скорости вращения при разгоне сопровождается перенастройкой алгоритма экстремального регулятора с поиска минимума целевой функции (2) на поиск её максимума или наоборот при торможении. При этом уменьшением потока статора на пониженных скоростях, а, следовательно, и моментах нагрузки меньше номинального, удаётся достичь улучшения коэффициента мощности роторной цепи (кривая 2) по сравнению с режи-

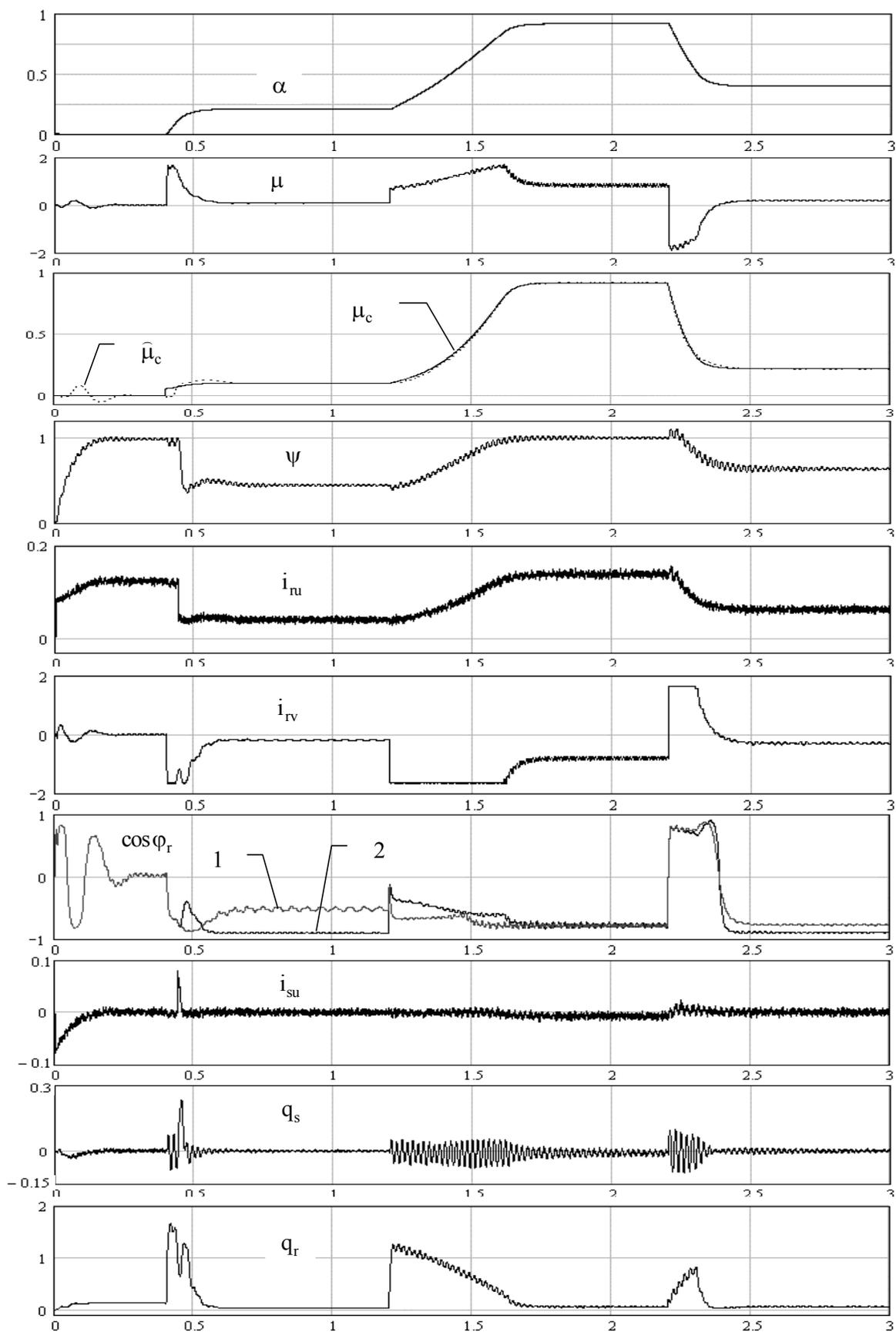


Рисунок 5 – Переходные процессы в замкнутой через наблюдатель состоянии САУ АВК с экстремальным регулированием потока по максимуму коэффициента мощности роторной цепи

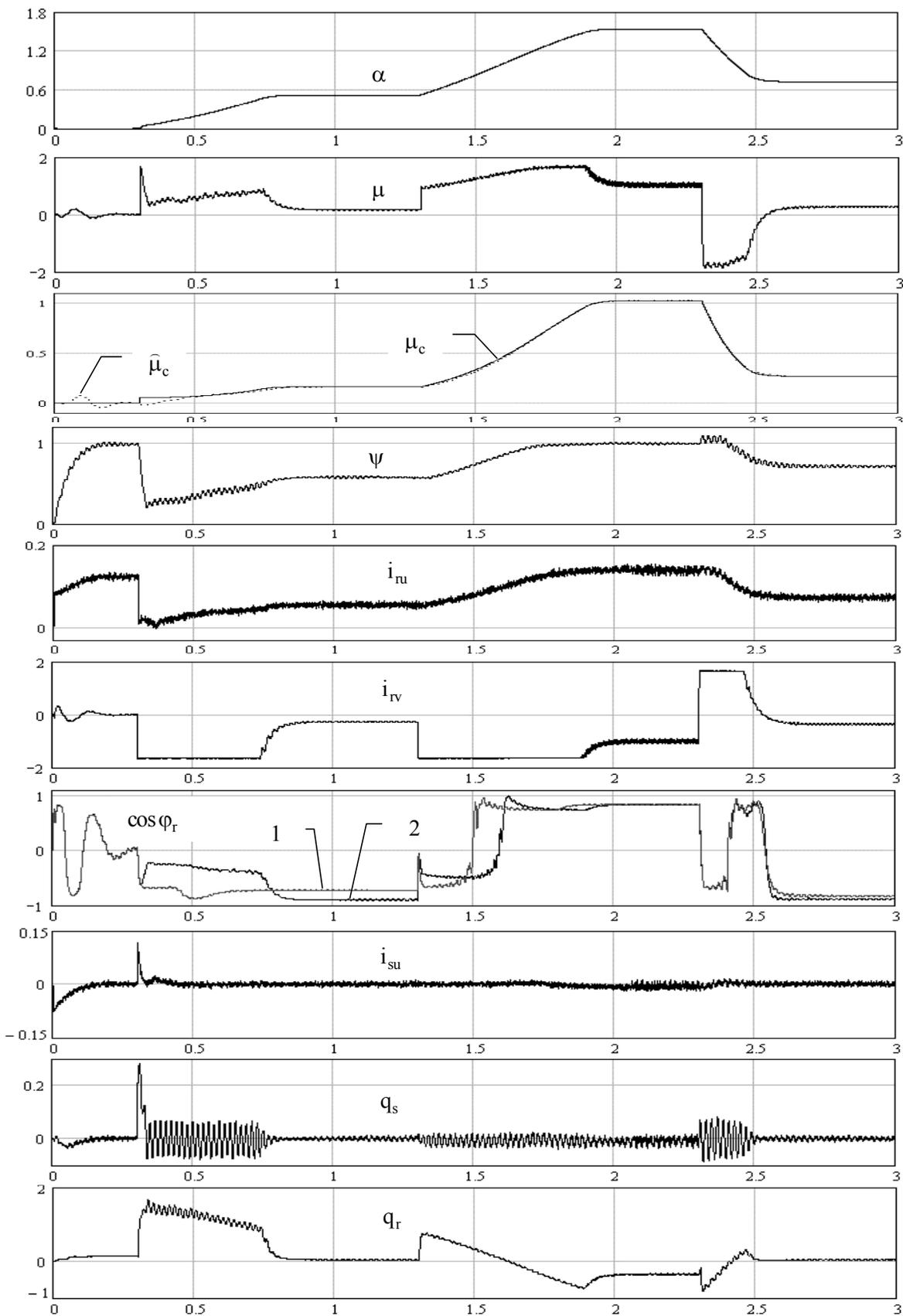


Рисунок 6 – Переходные процессы в замкнутой через наблюдатель состояния САУ АВК с экстремальным регулированием потока по минимуму реактивной мощности роторной цепи

мом постоянства потока (кривая 1). Из графиков $\cos\varphi_r$ на рис.6 следует, что применение контура экстремального регулирования по критерию реактивной мощности роторной цепи позволяет повысить величину её коэффициента мощности при скоростях $0.5\omega_{\text{гн}}$ и $0.7\omega_{\text{гн}}$ соответственно с уровня 0.72 до 0.9 (на 20%) и с 0.8 до 0.88 (на 9%).

Выводы. 1. Разработана функциональная схема релейно-векторной системы управления АВК, в которой для улучшения энергетических показателей предложено применить принципы экстремального регулирования.

2. Составлен алгоритм работы экстремального регулятора, синтезирован модальный наблюдатель состояния для определения момента статической нагрузки и скорости ротора, её производной и производной активной составляющей тока роторной цепи. Осуществлено бездатчиковое векторное управление АВК. Предложено положение ротора определять по выражениям (18)-(20) математической модели.

3. При регулировании АВК в диапазоне скоростей ниже синхронной в качестве целевой функции контура экстремального управления предложено использовать величину коэффициента мощности роторной цепи (3), в то время как при двухзонном регулировании скорости рекомендуется оптимизировать систему по минимуму реактивной мощности ротора (2).

4. Эффективность предложенных технических решений проверена методом математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамалыга В. М. Практически важные задачи сбережения энергии, потребляемой машинами и механизмами с электроприводом, и принцип достаточности. / Энергетика и электрификация. – 2000. – № 5. – С.40-44.
2. Борцов Ю.А., Пашков Н.Н., Юнгер И. Б. Управление асинхронным двигателем с использованием скользящих режимов нелинейной модели. / Электричество. – 1987. – №4. – С.47-49.
3. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. – М.: Энергия, 1972. – 240с.
4. Ключев О.В., Садовой А.В. Асинхронный вентильный каскад как объект экстремального управления. Национальный горный университет: Материалы международной конференции – Форум горняков. – Днепропетровск, 2005. – Том 2. С.212-225.
5. Ключев О. В. Техническая реализация релейных систем управления асинхронным вентильным каскадом. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, Вип. 3(32), 2005. – С.100-104.
6. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184с.
7. Бесекерский В. А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768с.
8. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392с.

Український науково-дослідний інститут побутового машинобудування

ВИПАРНО-ПАРОКОМПРЕСІЙНІ ОХОЛОДЖУВАЧІ

Розроблено нові схемні рішення комбінованих охолоджувачів на основі випарного охолоджувача непрямого типу НВО (перший ступінь охолодження) і парокомпресійної холодильної машини ХМ (другий ступінь охолодження), що забезпечують раціональне сполучення природних і штучних методів охолодження середовищ. Розглянуто особливості протікання процесів спільного тепломасообміну.

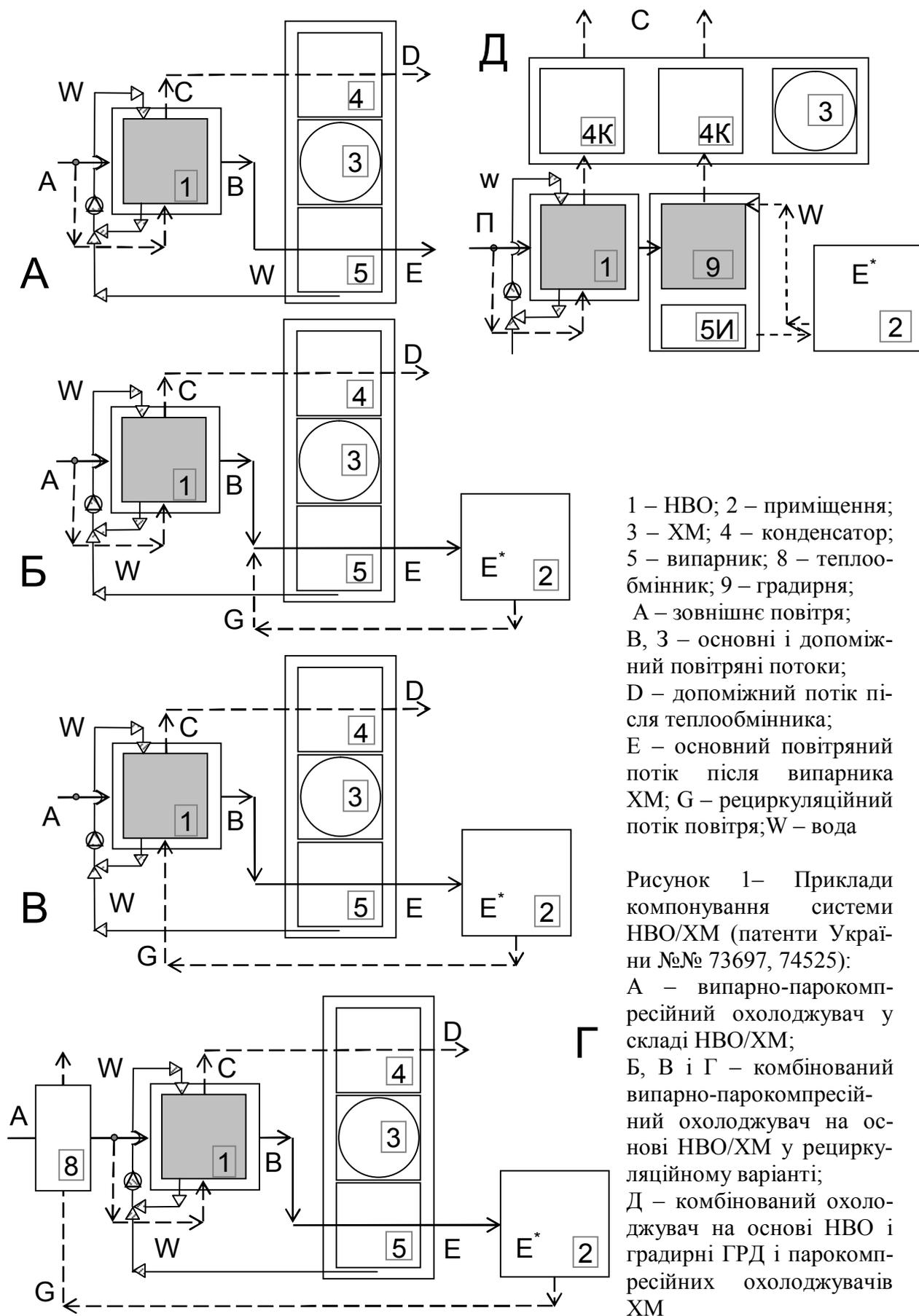
Разработаны новые схемные решения комбинированных охладителей на основе испарительного охладителя непрямого типа НВО (первая ступень охлаждения) и парокомпрессионной холодильной машины ХМ (вторая ступень охлаждения), обеспечивающие рациональное сочетание естественных и искусственных методов охлаждения сред. Рассмотрены особенности протекания процессов совместного тепломассообмена.

New circuit design developed for combined coolers based on an indirect evaporative cooler (1st cooling stage) and vapor compression refrigerating unit (2nd cooling stage), which ensure an efficient combination of natural and artificial air conditioning methods. Special features of combined heat and mass exchange processes studied.

Вступ. Випарні охолоджувачі, володіючи істотними достоїнствами, мають кліматичні обмеження, що істотно стримує їхнє практичне застосування. Створення комбінованих охолоджувачів на основі спільної роботи випарного охолоджувача НВО і холодильної машини ХМ дозволяє зняти ці обмеження і, таким чином, інтегрувати переваги методів природного і штучного охолодження середовищ. У роботі розглядається декілька принципових варіантів компонування таких систем і проводиться їхнє порівняння з метою виявлення оптимального схемного рішення, а також достоїнств і недоліків кожної розглянутої системи.

Постановка задачі. Основний повітряний потік проходить послідовне охолодження в першому ступені ("суха" частина НВО) і в другому ступені (повітроохолоджувач - випарник ХМ). Допоміжний повітряний потік, що залишає НВО, є досить холодним (але зволеним) і може використовуватися для охолодження конденсатора ХМ (рис.1). Конденсатор і випарник ХМ розташовуються на виході допоміжного й основного потоків з НВО відповідно. Конденсат, що утворився у випарнику, зливається в піддон НВО. На рис. 1Б, В і Г представлені варіанти схем кондиціонерів повітря, призначених для приміщень з можливістю часткової рециркуляції повітряного потоку. На рис. 1Г наведений варіант схеми з теплообмінником на лінії поворотного, досить холодного повітряного потоку, що залишає приміщення, яке кондиціонується. Це дозволяє попередньо охолодити потік свіжого повітря, що надходить з навколишнього середовища в НВО. Схема досить просто реалізується, але габарити повітро-повітряного теплообмінника при порівняно низьких швидкостях руху теплоносіїв виявляються великі. Тут, на поворотному повітряному потоці, можна додатково установити випарний охолоджувач прямого типу ПВО, що підвищить ефективність схеми в цілому.

З погляду задач кондиціонування повітря, тобто його термовологої обробки, безсумнівний інтерес представляє компонування кондиціонера, що включає в себе у випарній частині комбінований охолоджувач у складі непрямої і прямої випарних



охолоджувачів (НВО в першому ступені і ПВО, або градирня ГРД, у другому ступені охолоджувача, рис.1Д). Застосування прямого випарного охолоджувача ПВО забезпечує, поряд з додатковим охолодженням повітря можливість його зволоження причому ступінь необхідного зволоження повітря в цій схемі легко регулюється.

Включення додаткового ступеня ПВО на низькому температурному рівні спрощує задачу одержання у СКП комфортних параметрів повітря і знижує його відносний вологовміст. Схема комбінованого охолоджувача на основі випарного охолоджувача в складі НВО/ГРД і ХМ (рис.1Д) дозволяє одержувати охолоджену воду, що потім, у випадку СКП, подається у вентильовані водно-повітряні теплообмінники, установлені безпосередньо в приміщеннях, що обслуговуються. Тут конденсатор розбитий на два ступені, які включені в схему послідовно та відповідно до температурних рівнів повітряних потоків (4ДО), які викидаються з НВО і ГРД, а випарник ХМ (5И) розміщений безпосередньо в піддоні (ємності охолодженої води) градирні. Випарне охолодження води повітряним потоком, що пройшов "сухе" охолодження в НВО і має низьку температуру мокрого термометра, дозволяє істотно знизити навантаження на ХМ. Охолоджена вода подається у вентильовані теплообмінники, безпосередньо встановлені в приміщенні, що обслуговується.

З усіх розглянутих схем комбінованих охолоджувачів найбільший інтерес представляють рециркуляційні схеми (рис. 1Б, В і Г). Схема по рис. 1В особливо перспективна, оскільки не вимагає використання додаткового теплообмінника, вона забезпечує для комбінованої системи зниження енерговитрат на організацію процесу у порівнянні з вентиляційними схемами на 25-35%. У ряді випадків у цій схемі доцільно використовувати для організації випарного процесу в мокрій частині НВО суміші свіжого і рециркуляційного повітря, причому у залежності від кліматичних умов і часу року співвідношення цих повітряних потоків може варіюватися. Остаточний вибір схеми і режимів її експлуатації в сучасних системах кондиціонування повітря визначається на основі техніко-економічного аналізу таких охолоджувачів.

Результати роботи. На рис.2 наведена схема процесів у комбінованому охолоджувачі, показані потоки і їхні основні параметри. Розглянутий найбільш простий варіант комбінованої системи, без рециркуляції повітря з приміщення, що обслуговується. Схема руху потоків представлена умовно, так що основний повітряний потік, охолоджений у "сухій" частині НВО надходить на наступні охолодження у випарник ХМ, а допоміжний повітряний потік, що забезпечив у "мокрій" частині НВО випарне охолодження водяної плівки, що стікає по зовнішніх поверхнях елементів насадки, надходить на охолодження повітряного конденсатора ХМ. Конденсат з випарника ХМ повертається у випарний контур НВО. У НВО відбувається охолодження обох повітряних потоків холодною водою (основного – через стінку, яка розділяє канали НВО), а результуючий винос відведеного тепла відбувається в зв'язаній формі через адекватну зміну вологовмісту допоміжного повітряного потоку. Стінка, що поділяє канали на "сухі" і "мокрі", які чергуються, не обов'язково повинна бути виконана з теплопровідного матеріалу, наприклад з алюмінієвої фольги, як це було в попередній частині досліджень [1-3], оскільки термічний опір тонкої стінки-перегородки між каналами $R_{ст}$ цілком порівняно з термічним опором рідинної плівки $R_{ж}$, що відзначено, при розробці випарного охолоджувача НВО з полімерних матеріалів, у роботі австралійських дослідників [7]. Конденсат має низьку температуру, що додатково підкреслює доцільність його повернення у випарний контур НВО. Інтерес представляє можливість роботи комбінованого охолоджувача з повним поверненням вологи в НВО, оскільки необхідність випарних охолоджувачів у підживленні свіжою водою є одним з найважливіших недоліків.

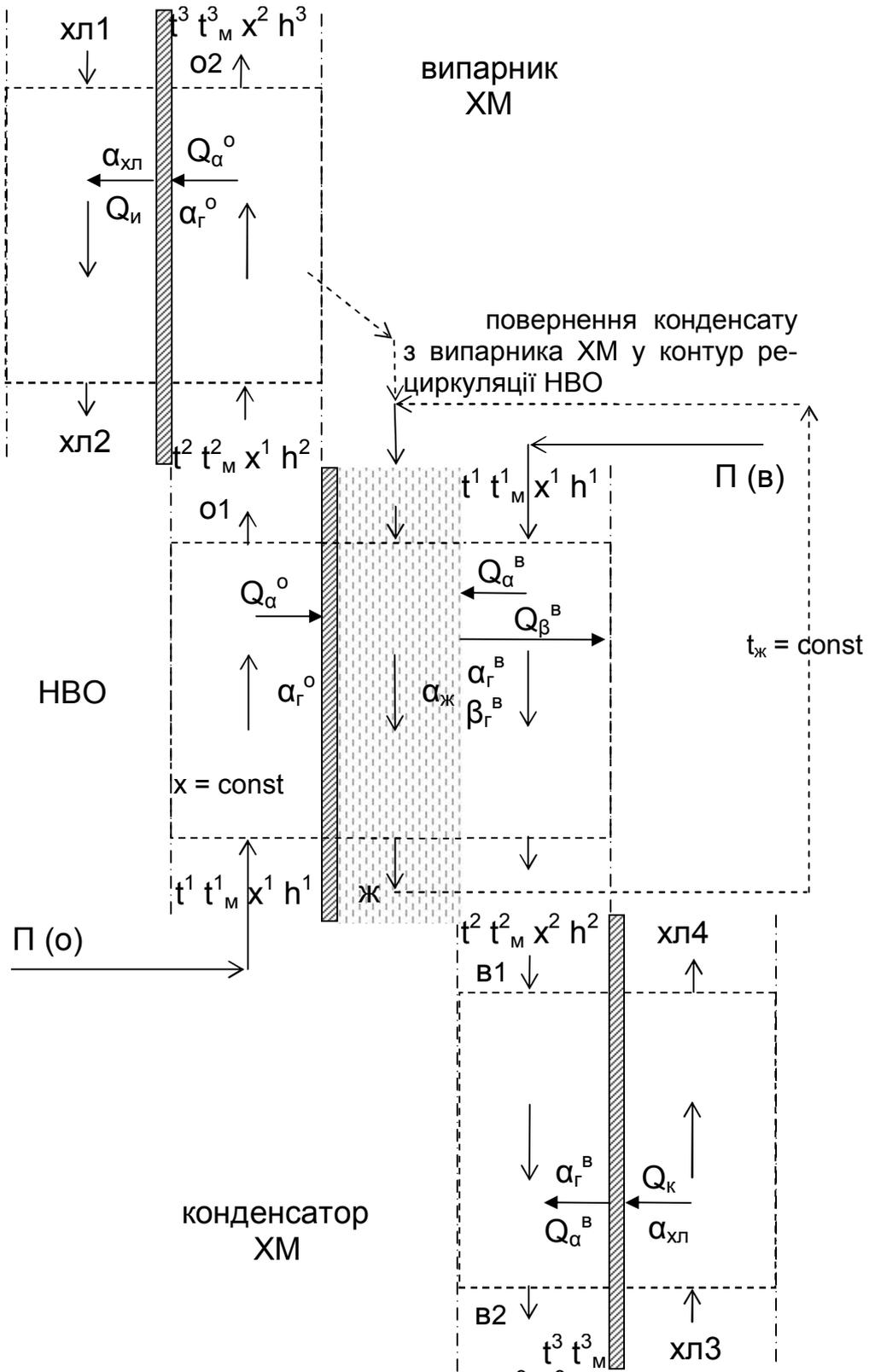
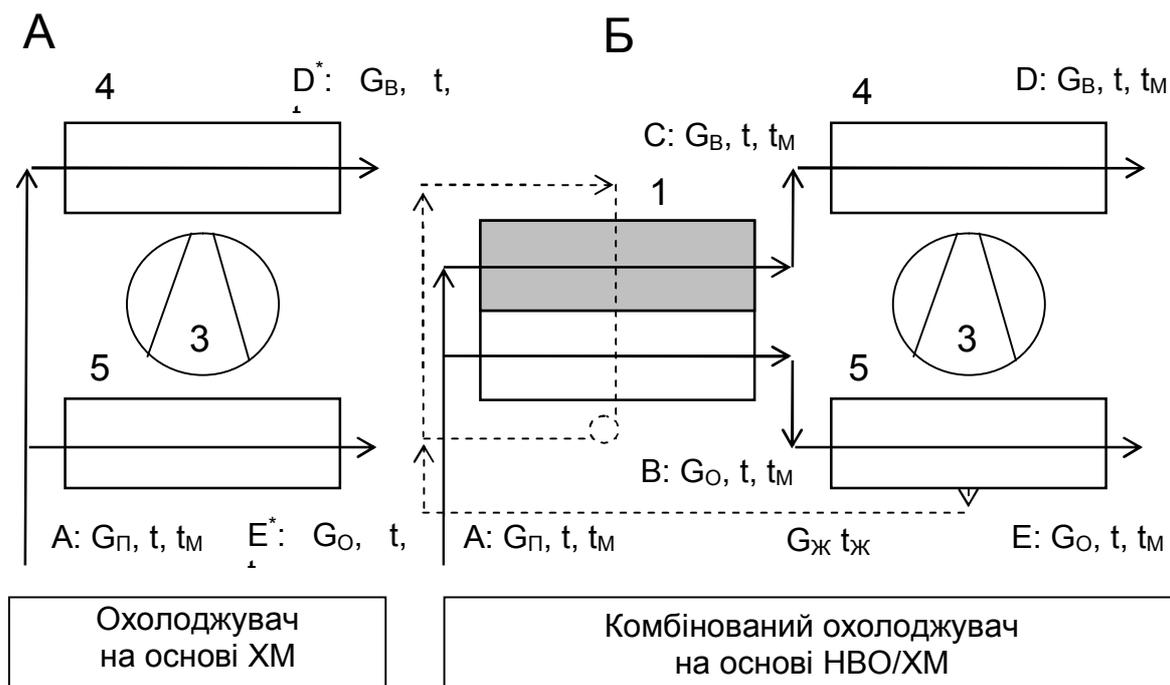


Рисунок 2 – До розрахунку процесів тепломасообміну в комбінованому випарно-парокомпресійному охолоджувачі НВО/ХМ



1 – НВО; 3 – ХМ; 4 – конденсатор; 5 – випарник; А – зовнішнє повітря; В,С – основний і допоміжний повітряні потоки; D – допоміжний потік після конденсатора ХМ; E – основний повітряний потік після випарника ХМ

Рисунок 3 – Розрахункові схеми парокompресійного (А) і випарно-парокompресійного охолоджувачів (Б)

При розрахунках процесів у першому ступені охолодження НВО використовувалося розроблене авторами програмне забезпечення, що базується на математичних моделях процесів спільного тепломасообміну [1-3]. Розрахунок процесу в ХМ заснований на використанні програми CoolPack. Розрахунки виконувалися для двох порівнюваних варіантів охолоджувача (ХМ і НВО/ХМ) при однаковій холодопродуктивності системи й ідентичних початкових параметрах навколишнього середовища. Для комбінованого варіанта, поряд з холодопродуктивністю першого ступеня НВО, враховувалися й енерговитрати на вентилятор і водяний насос.

Висновки.

1. Випарне охолодження ефективне при вологовмісті зовнішнього повітря < 12 г/кг; використання цього методу при великих значеннях вологовмісту можливо в комбінованих схемних рішеннях на основі випарно-парокompресійних охолоджувачів у складі НВО/ХМ.

2. Розроблено схемні рішення комбінованих охолоджувачів на основі спільної роботи випарного охолоджувача (перший ступінь охолодження) і парокompресійної ХМ (другий ступінь), що забезпечує раціональне сполучення природних і штучних методів охолодження.

3. Об'єднання НВО і ХМ у єдину систему дозволяє знизити витрати води на підживлення замість тієї, що випарувалася у випарному контурі НВО, що дозволяє змен-

шити запас води в піддоні, а отже, і загальні габарити апарата, матеріалоемність і витрати на його виготовлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дорошенко А.В. Компактная теплообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика): Докторская диссертация. Одесский институт низкотемпературной техники и энергетики. – Одесса. – 1992.
2. Дорошенко А.В., Демьяненко Ю.И., Филипцов С.Н., Горин А.Н. Испарительные охладители комбинированного типа для систем кондиционирования воздуха. – Рынок инсталляций, 2005, №07-08. – С.16-19.
3. Дорошенко А.В., Демьяненко Ю.И., Филипцов С.Н., Горин А.Н. Испарительные охладители комбинированного типа для систем кондиционирования воздуха. – АВОК, 2005. – №6. – С.58-63.
4. Дорошенко О., Дем'яненко Ю., Горін О., Філіпцов С. Спосіб двоступінчатого комбінованого охолодження і кондиціонування повітря: Патент на винахід, №73697.
5. Горін О., Філіпцов С., Федоров А., Дорошенко О., Демьяненко Ю. Испарительный охладитель непрямого типа: Патент на винахід № 74525.
6. P.Koltun, S.Ramakrishnan, A.Doroshenko, M.Konsov. Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternantive Air-Conditioning Systems. 21h International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, 2003, D.C. – ICR0140.
7. JOHN L. McNAB, PAUL McGREGOR/ Dual Indirect Cycle Air-Conditioner Uses Heat Concentrated Dessicant and Energy Recovery in a polymer Plate Heat Exchanger. 21h International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, 2003, D.C. – ICR0646.

УДК 004.031.43:681.5:658.5(078)

ЛИТВИН А. И., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

СОЗДАНИЕ НМИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ

Розглянуто питання створення людино-машинних інтерфейсів (НМІ), реалізованих при створенні динамічних тренажерів технологічних процесів і пристроїв. Наведено приклади реалізації, виконані на базі інструментальної системи розробки TRACE MODE 6 і T-FACTORY.

Рассмотрены вопросы создания человеко–машинных интерфейсов (НМИ), реализуемых при создании динамических тренажеров технологических процессов и устройств. Приведены примеры реализации, выполненные на базе инструментальной системы разработки TRACE MODE 6 и T-FACTORY.

Questions of creation human-machine interfaces (HMI), dynamic simulators of technological processes sold at creation and devices are considered. The examples of realization executed on the basis of tool system of development TRACE MODE 6 and T-FACTORY are resulted.

Введение. Ключевым элементом системы тренинга в рамках динамического тренажера (ДТ) являются наглядность технологического процесса (ТП), происходящих событий, представления сложной системы управления как совокупности объектов управления (ОУ). Причем, для ДТ как модельной системы управления ТП и ОУ важно

сохранять все управленческие функции, свойственные реальным автоматизированным системам управления (АСУ).

Оптимальными средствами реализации подобного подхода являются инструментальные системы разработки, прежде всего SCADA-системы.

Постановка задачи. В рамках создания ДТ для ТП необходимо разработать понятный и наглядный графический интерфейс автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора-диспетчера с сохранением всех ключевых функций производственных АСУ.

В качестве примера ТП и ОУ рассматривается парогенератор барабанного типа, для которого реализованы элементы ДТ.

Результаты работы. Котельный агрегат (парогенератор) включает барабан, топку, пароперегреватель и хвостовые поверхности нагрева (для простоты схемы не показаны) (рис.1). Основным показателем качества работы парогенератора – давление пара за котлом, основное возмущение – колебания нагрузки. Поэтому основная задача при автоматизации котельного агрегата – регулирование давления пара на выходе котла.

Эта задача решается с помощью каскадной автоматизированной системы регулирования (АСР) давления пара за котлом (поз.1). Промежуточная регулируемая величина – давление пара в барабане, регулирующее воздействие – расход топлива.

Устойчивость процесса горения в топке поддерживается АСР разрежения в топке (поз.2). Регулирующее воздействие – отбор дымовых газов (производительность дымососов).

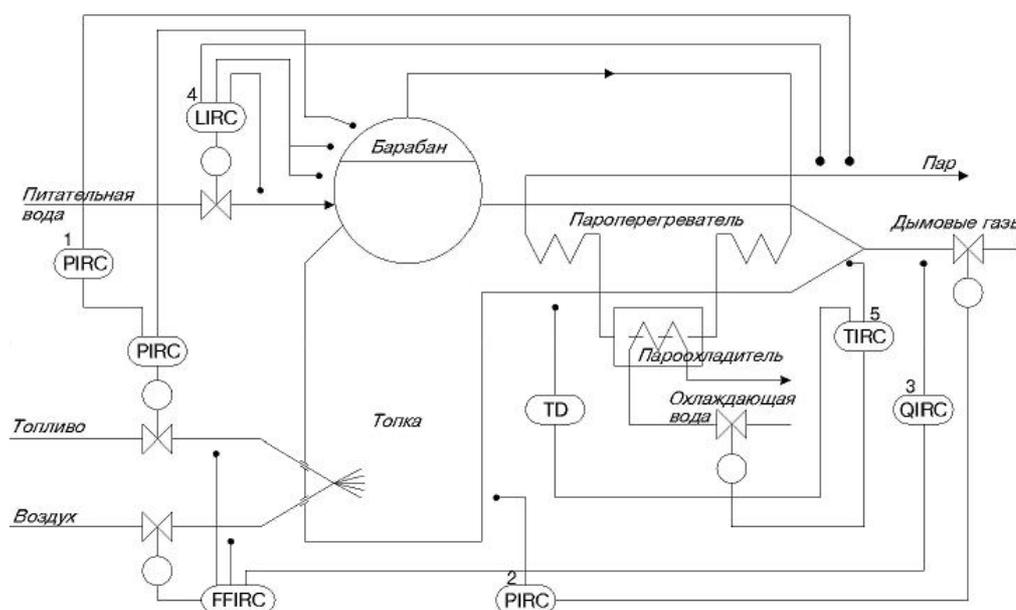


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы контроля и управления парогенератором

Экономичность процесса горения обеспечивается стабилизацией коэффициента избытка воздуха, который поддерживается регулятором соотношения топливо/воздух (поз.3). При этом, поскольку подача топлива является регулирующим воздействием в АСР давления пара, расход топлива выступает как задание регулятору соотношения, а расход воздуха "следит" за расходом топлива. При определенных возмущениях (просачивание воздуха в щели топки, изменение теплотворной способности топлива) коэффициент избытка воздуха может отклоняться от оптимального значения. Поэтому качество регулирования экономичности горения можно повысить, вводя корректирующий

импульс по содержанию в дымовых газах O_2 или CO_2 , т.е. применяя каскадную систему. Содержание CO_2 измеряется газоанализаторами.

Важной задачей при автоматизации котлоагрегата является поддержание материального баланса в барабане котла, так как при его переполнении или опустошении возникает аварийная ситуация. Эта задача решается посредством АСР уровня воды в барабане котла (поз.4, L-уровень). Измерение уровня осуществляется дифманометрическим способом по перепаду давлений над и под столбом жидкости. Регулирующее воздействие – подача питательной воды в барабан.

Для регулирования температуры пара на выходе пароперегревателя используется АСР со скоростным импульсом от промежуточной регулируемой величины – температуры в первой секции пароперегревателя (поз.5, D – дифференциатор промежуточной величины). Регулирующее воздействие – подача охлаждающей воды в пароохладитель.

Графический интерфейс ДТ парогенератора реализуется на базе интегрированной SOFTLOGIC/SCADA/MES/EAM/HRM системы TRACE MODE-6 (AdAstra) по иерархическому принципу: главная мнемосхема – мнемосхемы отдельных узлов с параметрическими окнами и линиями тренда, панели защит, сигнализации и пр.

Переключение между мнемосхемами осуществляется как по отдельным участкам (например, участок подачи питательной воды, участок отбора дымовых газов), так и по ключевым ОУ парогенератора (например, пароперегреватель, барабан).

Реализованная общая мнемосхема парогенератора приведена на рис.2. Здесь возможно получение сведений о программе , доступ к журналу отчета и тревог , инструкциям .

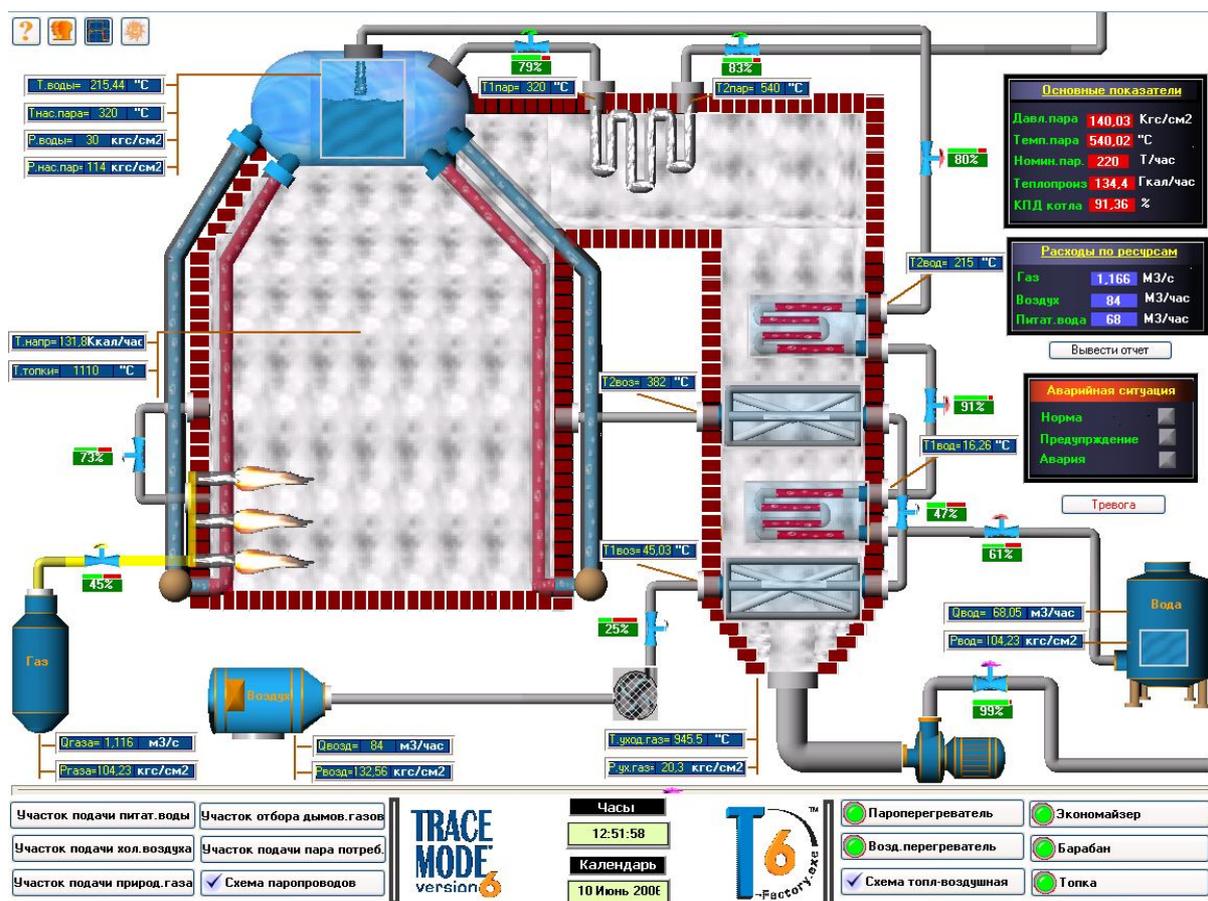
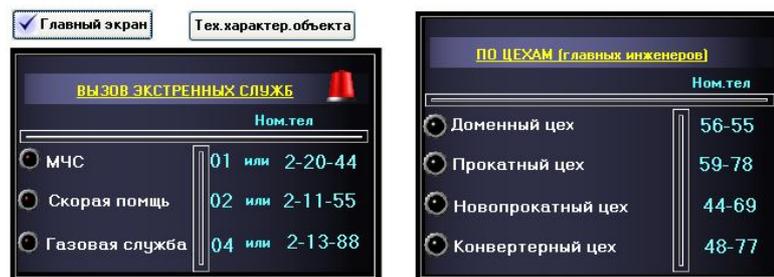


Рисунок 2 – Общая мнемосхема парогенератора

В частности, на рис. 3 показана общая инструкция по обслуживанию котла.



Инструкция для оператора по работе с системой.

Оператор должен:

1. Пройти инструктаж по технике безопасности и соблюдать все нормы и предписания, что там изложено: в случае аварии или ЧП номера телефонов вызова экстренных служб и т.д. приведены выше.
2. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации котельного агрегата.
3. Ознакомиться с технологическим описанием данного объекта, а так же четко представлять технологический цикл производства (получение) пара.
4. В процессе работы оператором осуществляется контроль следующих параметров:
 - Давление пара в барабане котла.
 - Давление воздуха (подача воздуха в топку).
 - Давление и разрежение в топке котла.
 - Давление и разрежение перед дымососом.
 - Давление и разрежение перед воздухоподогревателем.
 - Давление пара на выходе.
 - Уровень воды в барабане котла.
 - Расход воды.
 - Расход пара.
 - Расход природного газа.
 - Расход остаточного газа.
 - Расход факельного газа.
 - Контроль температуры по тракту котла - 9 точек.
 - Контроль погасания пламени.
5. Оператор имеет возможность ручного регулирования работы котла. Кроме того, могут быть включены следующие контуры автоматического регулирования:
 - Уровень воды в барабане котла.
 - Соотношение газ-воздух.
 - Разрежение в топке котла.
 - Давление пара на выходе.

Рисунок 3 – Инструкция оператора по работе с системой

А на рис.4 в качестве примера приведены выдержки из главного журнала сообщений и тревог.

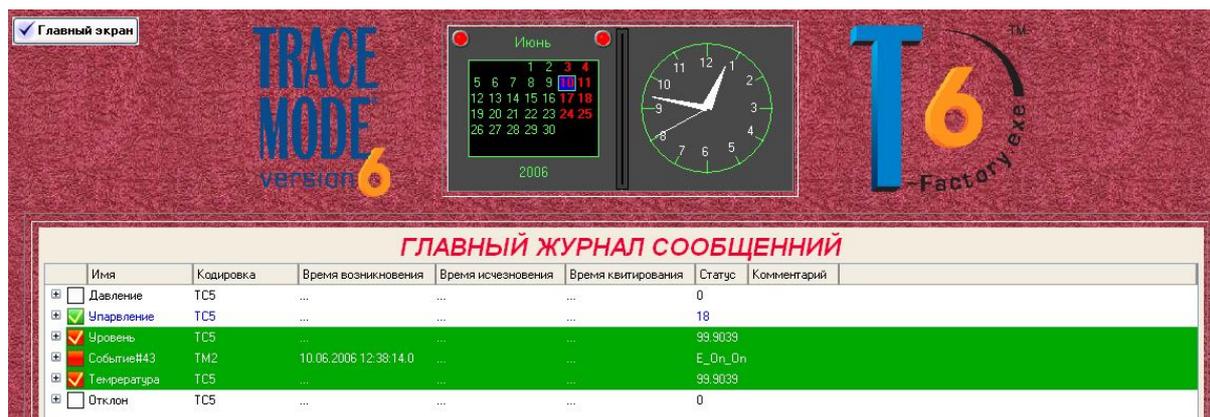


Рисунок 4 – Элемент главного экрана сообщений и тревог

Как было показано ранее, интерфейс ДТ имеет иерархическую структуру с детализацией на уровне мнемосхем отдельных участков и/или ОУ.

В качестве примера детализации на рис.5 приведена мнемосхема контроля работы и управления на участке подачи питательной воды.

Здесь, как и на основной мнемосхеме, возможно получение доступа к журналу отчета и тревог , инструкциям по обслуживанию и управлению ОУ .

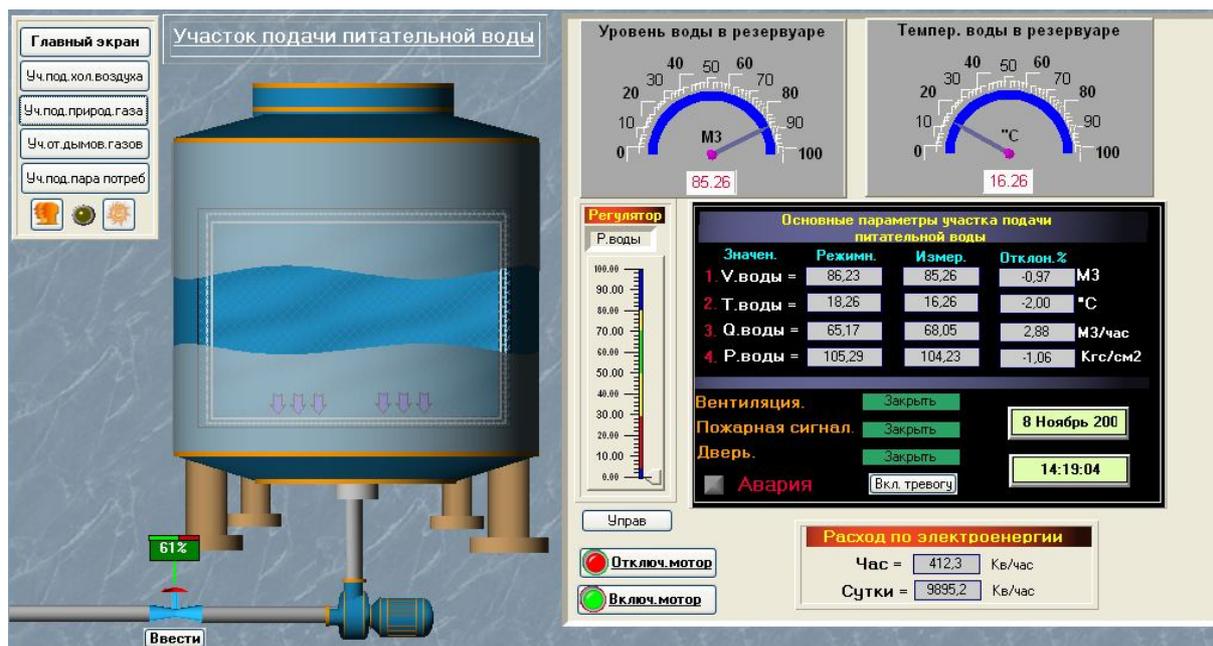


Рисунок 5 – Мнемосхема участка питательной воды

В случае наступления нештатной или аварийной ситуации оператор-диспетчер вправе осуществлять перечень регламентированных действий.

Для отдельных ключевых ОУ предусмотрены детальные мнемосхемы, как, например, для барабана парогенератора (рис.6).

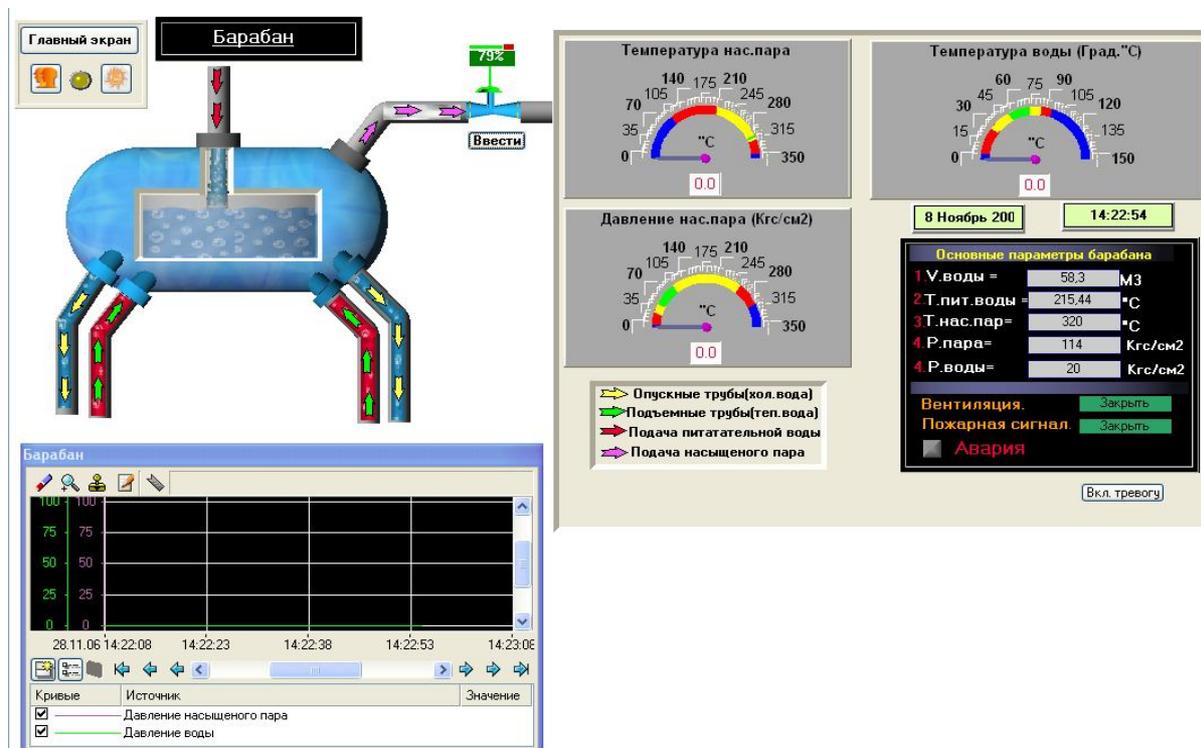


Рисунок 6 – Мнемосхема барабана котла

Таким мнемосхемам свойственны все заложенные в системе возможности по контролю, управлению, инструктированию на случай необходимости принятия управленческого решения.

Слежение за мгновенными значениями рабочих сред осуществляется, в том числе, с помощью стрелочных приборов и таблиц параметров. Линии тренда позволяют фиксировать протекающие процессы с заданным периодом дискретных опросов с последующей архивацией всех получаемых системой данных, принимаемых решений, возникающих ситуациях.

В рамках реализованной системы ДТ предусмотрен участок подачи пара потребителям (рис.7). Список в составе крупнейших потребителей составлен применительно к металлургическому комбинату.

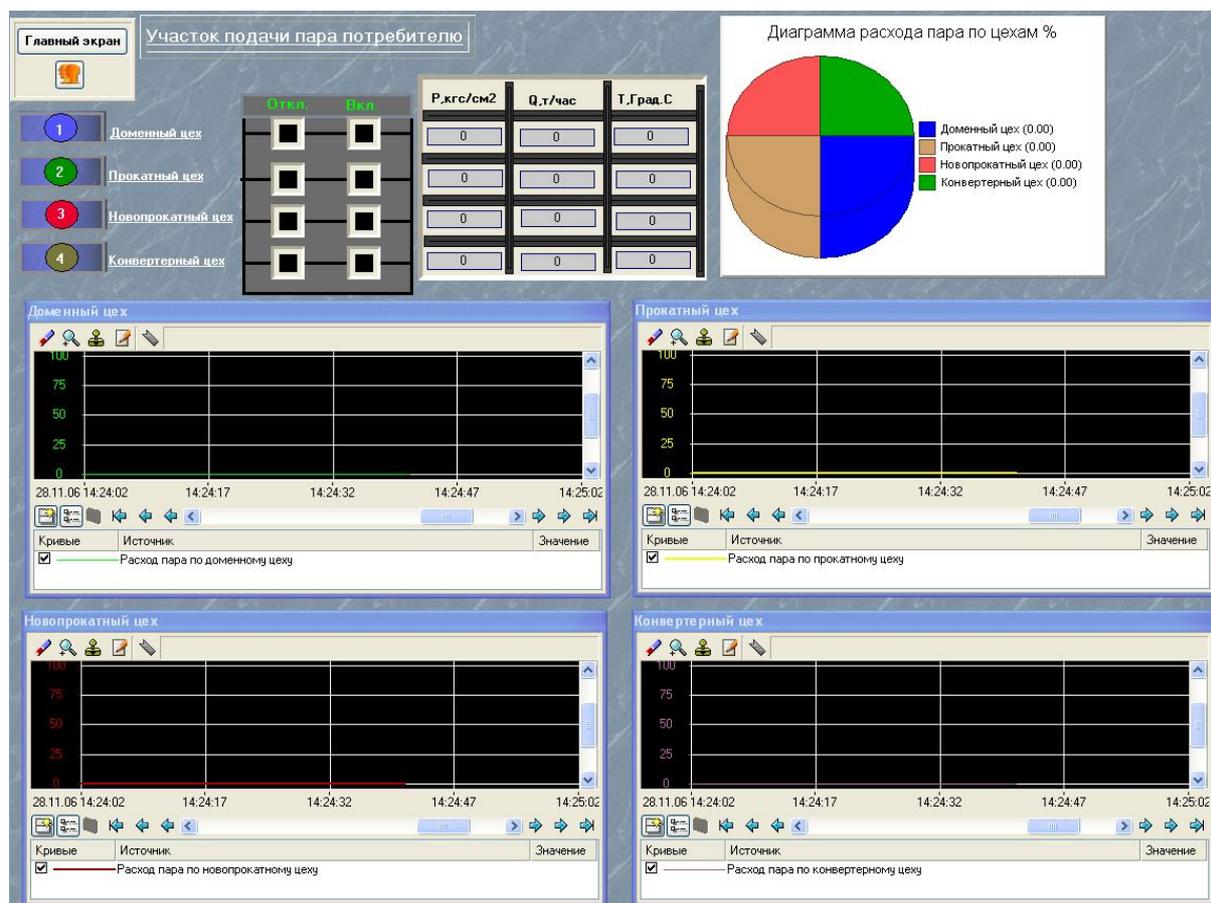


Рисунок 7 – Мнемосхема управления участком подачи пара потребителям

Архивирование данных ведется как в целом по всем потребителям, так и отдельно для каждого из них. Присутствие окон трендов призвано отслеживать обеспечение суточных, сезонных графиков снабжения.

Выводы. Создание графических интерфейсов динамических тренажеров с различными уровнями иерархии для различных технологических процессов и производств по обобщенной схеме проектирования и разработки органично реализуются интегрированными ИСП класса SOFTLOGIC/SCADA/MES/EAM/HRM.

Пример разработки графического интерфейса ДТ котельного агрегата барабанного типа на базе ИСП TRACE MODE подтверждает правомерность идеологии и методологии создания ДТ как подсистемы уровня АСУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комиссарчик В.Ф. Методы оптимизации и оптимального управления: Учебное пособие. – Тверь: ТГТУ, 2000. – 144с.

2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296с.
3. Деменков Н.П. SCADA-системы как инструмент проектирования АСУ ТП: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана.2004. – 328с.

УДК 621.182

РОМЕНСКАЯ Н.А., аспирант,
РОМЕНСКИЙ А.А., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

РЕКОНСТРУКЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА КОГЕНЕРАЦИИ

Наводяться результати якісного аналізу можливих варіантів реконструкції водогрійних котелень з використанням принципу когенерації. Результати аналізу можна використовувати в техніко-економічних розрахунках при виборі оптимального варіанту реконструкції діючих та при проектуванні нових водогрійних котелень.

Излагаются результаты качественного анализа возможных вариантов реконструкции водогрейных котельных с использованием принципа когенерации. Результаты анализа могут быть использованы в технико-экономических расчетах при выборе оптимального варианта реконструкции действующих и проектировании новых водогрейных котельных.

The results of a qualitative analysis of optional variants of renovation of water boiler-houses with usage of a principle cogeneration are presented. The results of the analysis can be used in technical and economic calculations at trade - off of renovation operational and designing new of water boiler-houses.

Введение. Источниками теплоснабжения (ИТ) в коммунальной теплоэнергетике чаще всего являются водогрейные котельные, от которых покрываются два вида разнородных нагрузок: отопление (О) – сезонная нагрузка и горячее водоснабжение (ГВС) – круглогодичная нагрузка. Для работы котельной необходимы два вида энергоресурсов (ЭР) – топливо и электроэнергия. Последняя необходима для обеспечения собственных нужд котельных. Наиболее распространенное топливо в котельных – природный газ (ПГ). Оба вида ЭР покупают, при этом электроэнергия более дорогой по сравнению с ПГ энергоресурс.

Рост цен на ЭР делают актуальной постановку задачи о повышении эффективности использования их в котельных, что позволяет хотя бы частично компенсировать увеличение стоимости услуг теплоснабжения. Одним из известных технических приемов решения поставленной задачи является реконструкция котельных с использованием принципа когенерации [1]. В реконструированных по такому принципу котельных часть ПГ используется в двигателях внешнего сгорания – газовых турбинах (ГТ) или в двигателях внутреннего сгорания – газопоршневых двигателях (ГПД) для выработки электроэнергии, а отработавшие продукты сгорания сбрасывают в водогрейные котлы (ВК) или в утилизационные теплообменники (УТО), включенные в тепловую схему котельной по сетевой воде. В ВК сжигается остальная часть ПГ в количестве, необходи-

мом для покрытия внешних тепловых нагрузок. В итоге котельная превращается в ТЭЦ с газовыми тепловыми двигателями и работает по тепловому графику.

Реконструкция котельной с использованием принципа когенерации позволяет полностью или частично обеспечить работу котельной на собственной электроэнергии, вырабатываемой на тепловом потреблении, а при больших тепловых нагрузках – продавать избыточную электроэнергию в энергосистему. Так как себестоимость вырабатываемой электроэнергии существенно меньше цены покупаемой электроэнергии, то это приводит к некоторому снижению себестоимости вырабатываемой в котельной теплоты. Однако реализация принципа когенерации связана с дополнительными финансовыми затратами на оборудование когенерационной установки (КУ) и на топливо, что приводит к росту себестоимости вырабатываемой теплоты. Поэтому эффективность реконструкции котельной с использованием принципа когенерации зависит от правильности выбора единичной электрической мощности и количества тепловых двигателей (ТД), а также схемы утилизации отработавшей теплоты (сброс в ВК или с использованием УТО). Такая задача решается технико-экономическим расчетом с учетом цены ПГ и электроэнергии, внешних тепловых нагрузок, расхода электроэнергии на собственные нужды, характера изменения тепловых нагрузок и электрических собственных нужд в течение года, а также возможности выдачи избыточной электроэнергии в энергосистему.

Постановка задачи. Для выполнения технико-экономических расчетов необходимо предварительно провести анализ наиболее характерных вариантов совместной работы ВК и ТД. Ниже излагаются результаты такого анализа для отопительного и летнего периодов работы котельной с предвключенными ТД.

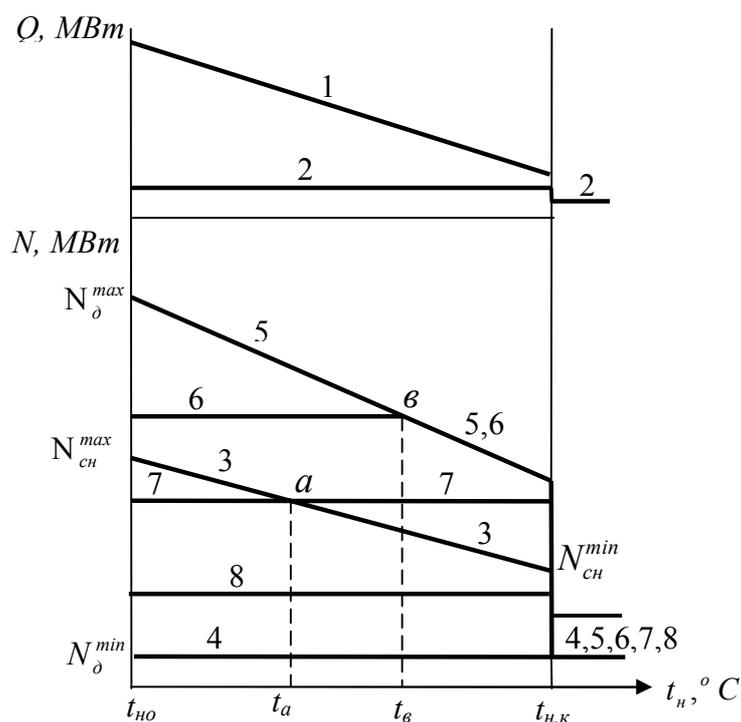


Рисунок 1 – Изменение потоков тепловой и электрической энергии в водогрейной котельной с предвключенными тепловыми двигателями

Результаты работы. На рис.1 показано качественное изменение потоков тепловой и электрической энергии в водогрейной котельной с предвключенными тепловыми двигателями в отопительный и летний периоды года. Линиям 1 и 2 на рис.1 соответствуют тепловые нагрузки отопления и ГВС, линии 3 – расход электроэнергии на собст-

венные нужды котельной, который меняется от максимального значения $N_{сн}^{\max}$ при $t_n = t_{но}$ до минимального – в летний период. Линии 4 соответствует выработка электроэнергии ТД N_{δ}^{\min} при выборе их по минимальной внешней тепловой нагрузке ГВС в летний период, а линии 5 – выработка электроэнергии ТД при выборе их по суммарной расчетной тепловой нагрузке отопления и ГВС. В последнем случае ТД работают с переменной электрической мощностью, изменяющейся от N_{δ}^{\max} при $t_n = t_{но}$ до N_{δ}^{\min} в летний период. Режимы работы ТД по выработке электроэнергии, обозначенные линиями 4 и 5, являются предельными нижним и верхним. Реальным режимам работы ТД соответствует область между этими линиями.

Возможны три зоны режима работы ТД в зависимости от их суммарной мощности.

При $N_{сн}^{\max} < N_{\delta} < N_{\delta}^{\max}$ (линия 6 на рис. 1), котельная работает с отпуском избыточной электроэнергии в энергосистему в течение всего отопительного сезона. При $N_{сн}^{\min} < N_{\delta} < N_{сн}^{\max}$ (линия 7 на рис. 1), котельная потребляет частично электроэнергию из энергосистемы в период отопительного сезона с $t_n < t_a$. В остальной период сезона при $t_n > t_a$ котельная отпускает избыточную электроэнергию в энергосистему. При $N_{\delta}^{\min} < N_{\delta} < N_{сн}^{\min}$ (линия 8 на рис. 1), котельная потребляет частично электроэнергию из энергосистемы в течение всего отопительного сезона. В двух последних режимах ТД работают с полной нагрузкой, а в первом режиме – лишь в период отопительного сезона при $t_n < t_a$.

Изложенный выше анализ характерен для котельных, в которых в течение отопительного сезона $N_{\delta} > N_{сн}$. Если линии мощностей N_{δ} и $N_{сн}$ пересекаются (линии 5 и 3 на рис.1), то ТД не обеспечивают покрытия электрических собственных нужд котельной в течение всего отопительного периода.

Располагаемая тепловая мощность продуктов сгорания после ТД определяется из уравнения энергетического баланса.

$$Q_p = \frac{N_{\delta}}{\eta_{\delta}} \cdot (1 - \eta_{\delta}) - Q_{окр}, \quad (1)$$

где N_{δ} – электрическая мощность ТД;

η_{δ} – абсолютный электрический КПД ТД;

$Q_{окр}$ – потери теплоты от ТД в окружающую среду.

Утилизированная тепловая мощность потока Q_y при сбросе продуктов сгорания в ВК определяется из уравнения:

$$Q_y^{BK} = Q_p \cdot \eta_{BK}. \quad (2)$$

А при сбросе в УТО из уравнения:

$$Q_y^{УТО} = Q_p \cdot \eta_{УТО}, \quad (3)$$

где η_{BK} – КПД ВК;

$\eta_{УТО}$ – коэффициент использования располагаемого тепла в УТО.

Утилизированная тепловая мощность Q_y покрывает частично внешние тепловые нагрузки котельной $Q_{вн} = Q_o + Q_{звс}$. Остальная внешняя тепловая нагрузка $Q_{ост} = Q_{вн} - Q_y$ – за счет сжигания ПГ в ВК.

Расход ПГ после реконструкции котельной B_k^p определяется как сумма расходов ПГ на КУ $B_{КУ}$ и на ВК $B_{ВК}$ по формулам:

$$B_{КУ} = \frac{N_d - Q_e \cdot \eta_d}{Q_n^p \cdot \eta_d}, \quad (4)$$

где Q_e – теплота воздуха, подаваемого в КУ для сгорания ПГ.

$$B_{ВК} = \frac{Q_{ост} + Q_{ном} + Q_{сн}}{Q_n^p \cdot \eta_k}, \quad (5)$$

где $Q_{ном}$ – потери теплоты с утечками и охлаждением воды в тепловой схеме котельной;

$Q_{сн}$ – расход теплоты на собственные нужды котельной;

η_k – КПД котельной.

До реконструкции котельной расход ПГ составляет:

$$B_k = \frac{Q_{вн} + Q_{ном} + Q_{сн}}{Q_n^p \cdot \eta_k}. \quad (6)$$

Сопоставление уравнений (4), (5) и (6) показывает, что расход ПГ после реконструкции котельной увеличивается пропорционально электрической мощности ТД.

Возможны три варианта схем включения УТО в систему теплоснабжения котельной по отношению к ВК: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная (смешанная). Во всех схемах для предотвращения низкотемпературной коррозии трубного пучка УТО сетевая вода на вход в теплообменник должна подаваться после узла рециркуляции котлов, где температура ее t_k постоянная в течение года.

При последовательной схеме (рис.2,а) через УТО пропускают часть сетевой воды G_T , которая утилизирует теплоту выхлопных газов двигателя Q_y и подает ее вновь в обратную линию сети после сетевого насоса (точка В на рис.2,а) или до сетевого насоса (точка С на рис.2,а). При сбросе теплоты Q_y после СН повышается температура воды перед ВК, что негативно отражается на экономичности их работы. При сбросе теплоты Q_y в линию перед СН повышается температура сетевой воды и расход ее через СН. Увеличение температуры позитивно влияет на энергопотребление рециркуляционного насоса (РН), а увеличение расхода – негативно как на РН, так и на СН. При последовательной схеме УТО и ВК работают в стабильном гидравлическом режиме.

При параллельной схеме (рис.2,б) УТО используется как самостоятельный источник теплоснабжения, работающий параллельно с ВК и покрывающий часть нагрузки теплосети. Возможны два варианта реализации этой схемы: со сбросом теплоты Q_y в линию горячей воды после ВК (точка В на рис.2,б) или со сбросом в линию прямой сетевой воды (точка С на рис.2,б). Температура горячей воды после УТО в первом случае должна поддерживаться в соответствии с температурным графиком работы ВК $t'_k = f(t_n)$, а во втором случае – в соответствии с температурой сетевой воды $t'_T = t_{nc}$ согласно графику регулирования отпуска теплоты. Подача горячей воды после УТО с

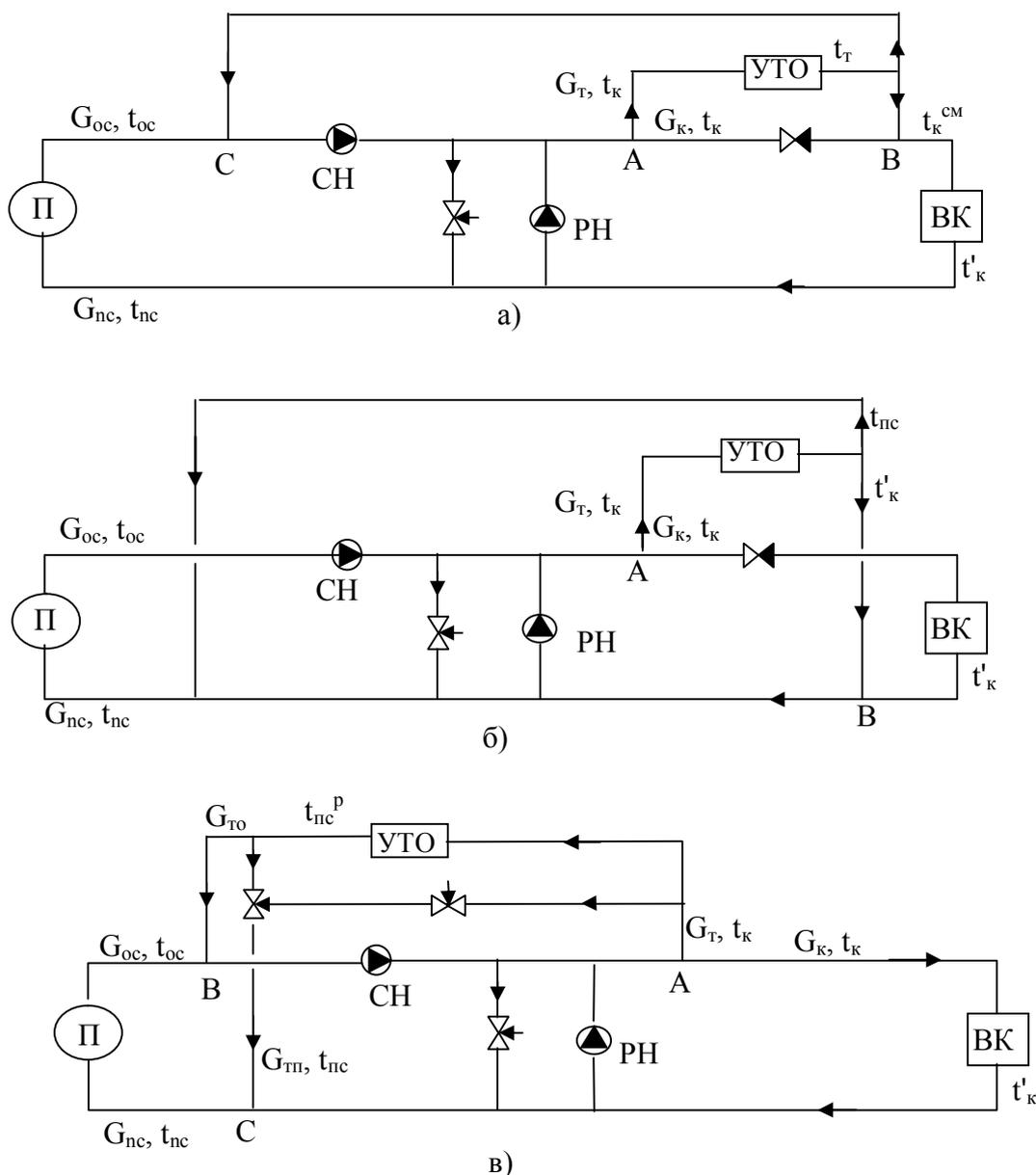


Рисунок 2 – Последовательная (а), параллельная (б) и параллельно-последовательная (в) схемы включения утилизионного теплообменника когенерационной установки в тепловую сеть водогрейной котельной.

$t'_T = t_{nc}$ в линию горячей воды после ВК нецелесообразна, так как это приводит к перегрузке РН. При одинаковой поверхности УТО схема с подачей теплоты в прямую сеть более эффективна по теплопередаче – утилизируется больше теплоты за счет увеличения температурного напора в УТО. Однако, в теплый период отопительного сезона, когда температура наружного воздуха приближается к t_{mu} работа УТО со сбросом теплоты в прямую сеть схемы невозможна, т. к. становятся равными температуры воды t_{nc} и t_K ($t_{nc} = t_K = 70^\circ C$) и расход воды через УТО должен увеличиваться до бесконечности. В этот период работа УТО должна переводиться на режим $t'_T = t'_K = f(t_n)$ со сбросом утилизированной теплоты в точку В. В обоих вариантах параллельной схемы гидравлический режим работы УТО и ВК переменный.

При параллельно-последовательной схеме (рис.2,в) температура воды на выходе из УТО должна поддерживаться на уровне расчетной температуры в подающей линии теплосети $t'_T = t_{nc}^p$ в течение всего отопительного сезона. Часть утилизируемой теплоты Q_{III} с постоянным расходом G_{III} и температурой t_{nc} направляют в подающую линию теплосети (точка С на рис.2,в). Изменение температуры потока G_{III} в соответствии с температурным графиком тепловой сети $t_{nc} = f(t_n)$ обеспечивается линией перепуска G_n , а постоянство расхода – регулятором расхода. Остальной поток утилизируемой теплоты Q_{TO} с переменным расходом G_{TO} направляется в обратную линию теплосети (точка В на рис.2,в). Возможен также вариант схемы при нагреве воды в УТО до t'_k в течение всего отопительного сезона. При параллельно-последовательной схеме УТО, ВК и СН работают в стабильном гидравлическом режиме. Однако такая схема наиболее громоздкая по сравнению с последовательной и параллельной.

Проведенный анализ показал, что каждая из схем имеет преимущества и недостатки. Поэтому выбор оптимальной схемы должен проводиться технико-экономическим расчетом.

Отечественные и зарубежные заводы-изготовители выпускают тепловые двигатели (ГТУ и ГПД) разной номенклатуры по электрической мощности, номинальным параметрам продуктов сгорания перед двигателем и на выхлопе. Поэтому при переборе вариантов реконструкции котельных необходимо иметь в виду, что электрическую мощность двигателя N_d и располагаемую тепловую мощность продуктов сгорания Q_p можно изменять дискретно. При этом связь между мощностями N_d и Q_p жесткая и однозначная. УТО когенерационных установок рассчитывают на определенные условия работы по параметрам и расходу нагреваемой среды, которые не всегда совпадают с таковыми в котельной. В этом случае необходимо выполнять поверочный расчет УТО на фактические условия работы его. Если УТО в КУ отсутствует, то возникает необходимость в конструктивном расчете его с учетом условий работы в схеме котельной. Для получения более точных результатов поверочный и конструктивный расчеты УТО необходимо выполнять не по усредненным параметрам теплоносителей, а по секционным в соответствии с рекомендациями [2].

Выводы. Реконструируемые с использованием принципа когенерации водогрейные котельные относятся к категории сложных технических систем, в которых используются разные по термодинамической ценности энергоресурсы и энергоносители. Поэтому при выборе оптимального варианта реконструкции котельной целесообразно проводить проработку каждого из вариантов с использованием эксергетического метода анализа [3].

Изложенные выше результаты анализа вариантов реконструкции котельных с использованием принципа когенерации можно использовать также при проектировании новых котельных.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Долінський, В. Клименко Когенерація – нові потужності для енергетики / Вісник НАН України, 2002. – №4. – С.26-32.
2. Справочник по теплообменным аппаратам / Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. – М.: Машиностроение, 1989.
3. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. Под ред. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288с.

*Институт предпринимательства “Стратегия”, г. Желтые Воды
Днепродзержинский государственный технический университет

ОДНА СХЕМА УСРЕДНЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ МАЛОГО РАЗМЕРА

Знайдено наближені рівняння гідрогазодинаміки для плинів у вертикальних трубах малого розміру. Математичний аналіз отриманих рівнянь дозволив розкрити фізику нестійкості стаціонарного плин у зосередженому теплопідводі в нижній частині труби.

Найдены приближенные уравнения гидрогазодинамики для течений в вертикальных трубах малого размера. Математический анализ полученных уравнений позволил раскрыть физику неустойчивости стационарного течения при сосредоточенном теплоподводе в нижней части трубы.

The approached equations hydraulic gas dynamics for currents in vertical pipes of the small size are found. The mathematical analysis of the received equations has allowed to open physics of instability of stationary current at concentrated heat supply in the bottom of a pipe.

Введение. Математическое моделирование явлений окружающего нас мира сводится к абстрагированию рассматриваемых объектов. Естественное стремление получить адекватную эксперименту математическую модель приводит к необходимости учета большого числа различных факторов. Поэтому, как правило, все “хорошие” модели имеют сложную математическую структуру и поэтому получается, что, с одной стороны, они являются достаточно точными с логической точки зрения, а с другой стороны, бесполезными, так как их математический анализ очень ограничен.

Метод усреднения, основанный на выделении наиболее существенных факторов и установлении взаимосвязи между ними, является классическим примером “правильного” усреднения исходной математической модели. Не вдаваясь далее подробно в философско-математические рассуждения об усреднении математических моделей, отметим, что вскрыть физику многих гидрогазодинамических явлений удалось лишь после того, как исходная модель была усреднена к некоторой динамической системе с конечномерным фазовым пространством. Ярким примером в этом отношении является усреднение Лоренцем уравнения Бернара, описывающего тепловую конвекцию в подогреваемом снизу горизонтальном слое жидкости [7]. В полученной им динамической системе был найден принципиально новый тип аттрактора (в отличие от предельного цикла), именуемый в честь его открывателя странным аттрактором Лоренца.

В данной работе рассмотрено усреднение основных уравнений гидрогазодинамики для создания приближенной модели движения среды в вертикальной трубе с сосредоточенным в ее нижней части теплоподводом постоянной мощности. Анализ полученной модели позволяет решить проблему неустойчивости стационарного режима в рассматриваемой задаче.

Постановка задачи. Рассматривается следующая задача. В нижней части вертикальной трубы (рис.1) расположен источник подвода теплоты постоянной мощности. За счет естественной конвекции в трубе, называемой в научной литературе трубой Рий-

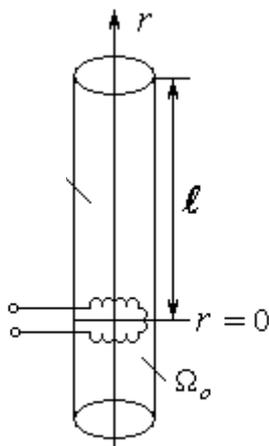


Рисунок 1 – Схема трубы Рийке

реднение основных уравнений: неразрывности и движения. Полученная динамическая система позволит решить описанную выше проблему.

Результаты работы. При выводе основных уравнений будем придерживаться аксиоматики, предложенной Г.Биркгофом в [1]. Далее рассматривается движение сплошной среды относительно некоторой инерциальной системы отсчета в некоторой части пространства. Пусть Ω – выделенный в рассматриваемом течении жидкости неподвижный объем, состоящий из геометрических точек (рис.2,а). Тогда из закона сохранения массы имеем тождество:

$$\frac{dm}{dt} = - \iint_{\Omega} \rho V n d\sigma, \tag{1}$$

где $m(t)$ – масса, находящаяся в области Ω к моменту времени t , $\rho(t, X)$ – плотность жидкости, $V(t, X)$ – вектор скорости жидкости, n – вектор внешней нормали к границе $\partial\Omega$ области Ω , $d\sigma$ – элемент площади поверхности, X – координаты точки в пространстве относительно рассматриваемой системы координат.

Из формулы Гаусса-Остроградского $\iiint_{\Omega} \text{div} \psi d\omega = \iint_{\partial\Omega} \psi \cdot n d\sigma$, где ψ – произвольное

гладкое векторное поле, $d\omega$ – элемент объема, при $\psi = \rho \cdot V$ из (1) имеем:

$$\frac{dm}{dt} = \iiint_{\Omega} \text{div}(\rho V) d\omega, \text{ но } m \equiv \iiint_{\Omega} \rho d\sigma \Rightarrow \frac{dm}{dt} = \iiint_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\omega, \text{ и следовательно } \forall \Omega$$

$$\iiint_{\Omega} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) \right] d\omega = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0. \tag{2}$$

Полученное уравнение (2), как известно, называется уравнением неразрывности, в частности, для несжимаемой среды ($\rho = const$) из него получается уравнение несжимаемости: $\text{div} V = 0$.

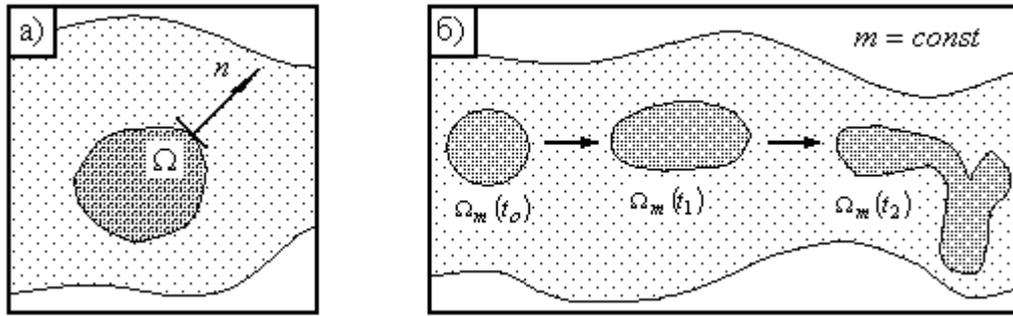


Рисунок 2 – Выделение в движущемся потоке среды: а) постоянного объема Ω ; б) деформирующегося объема $\Omega_m(t)$

Для вывода уравнения движения рассуждаем следующим образом. По второму закону Ньютона, рассматривая мысленно выделенную в потоке движущуюся постоянную массу $m = const$ и соответствующую ей область $\Omega_m(t)$ (рис.2,б) как материальную точку, которая взаимодействует с остальной частью движущейся среды, имеем тождество:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{\Omega_m(t)} \rho V d\omega = \iiint_{\Omega_m(t)} \rho \bar{g} \omega - \iint_{\partial\Omega_m(t)} p \cdot n d\sigma + \iint_{\partial\Omega_m(t)} \bar{\tau} \otimes n d\sigma, \quad (3)$$

где $p(t, X)$ – давление в жидкости, $\bar{\tau}$ – тензор напряжения трения, символом \otimes обозначена операция свертки тензоров.

Исходя из физических рассуждений, или чисто математически можно проверить справедливость формулы:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{\Omega_m(t)} \rho V d\omega = \iiint_{\Omega_m(t)} \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} d\omega + \iint_{\partial\Omega_m(t)} (\rho V) \cdot (Vn) d\sigma. \quad (4)$$

Вновь воспользовавшись формулой Гаусса-Остроградского, получим тождества:

$$\iint_{\partial\Omega_m(t)} p \cdot n d\sigma = \iiint_{\Omega_m(t)} \nabla p d\omega, \quad \iint_{\partial\Omega_m(t)} \bar{\tau} \otimes n d\sigma = \iiint_{\Omega_m(t)} \nabla \otimes \bar{\tau} d\omega.$$

Теперь из формулы Грина $\iiint_{\Omega_m(t)} \frac{\partial u}{\partial x_k} d\omega = \iint_{\partial\Omega_m(t)} u \cdot n_k d\sigma$, верной для любой гладкой функции $u(X)$, где в данном случае: $X = (x_1, x_2, x_3)$ – ортогональные декартовы координаты, $n = (n_1, n_2, n_3)$, $V = (v_1, v_2, v_3)$, при $u = \rho v_k v_i$ имеем:

$$\iint_{\partial\Omega_m(t)} \rho v_k v_i \cdot n_k d\sigma = \iiint_{\Omega_m(t)} \frac{\partial(\rho v_k v_i)}{\partial x_k} d\omega = \iiint_{\Omega_m(t)} \left[v_k \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_k} + \rho v_i \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right] d\omega \Rightarrow$$

$$\iint_{\partial\Omega_m(t)} (\rho V) \cdot (Vn) d\sigma = \iint_{\partial\Omega_m(t)} \rho(v_1, v_2, v_3) \cdot \sum_{k=0}^3 v_k n_k d\sigma = (K_1, K_2, K_3),$$

$$\text{где } K_i = \iint_{\partial\Omega_m(t)} \rho v_i \cdot \sum_{k=0}^3 v_k n_k d\sigma = \sum_{k=0}^3 \iint_{\partial\Omega_m(t)} \rho v_i \cdot v_k n_k d\sigma = \sum_{l=0}^3 \iiint_{\Omega_m(t)} \frac{\partial(\rho v_k v_i)}{\partial x_k} d\omega =$$

$$= \iiint_{\Omega_m(t)} \left[\sum_{k=0}^3 v_k \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_k} + \rho v_i \nabla V \right] d\omega.$$

Итак,

$$\begin{aligned} \iint_{\partial\Omega_m(t)} (\rho V) \cdot (Vn) d\sigma = (K_1, K_2, K_3) &= \left(\iiint_{\Omega_m(t)} \sum_{k=0}^3 v_1 \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_k} d\omega, \sum_{k=0}^3 v_2 \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_k}, \sum_{k=0}^3 v_3 \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_k} \right) + \\ \iiint_{\Omega_m(t)} (\rho V) \operatorname{div} V d\omega &= \sum_{k=0}^3 \iiint_{\Omega_m(t)} v_k \frac{\partial(\rho v_1, \rho v_2, \rho v_3)}{\partial x_k} d\omega + \iiint_{\Omega_m(t)} (\rho V) \operatorname{div} V d\omega = \\ &= \iiint_{\Omega_m(t)} (\nabla \cdot V)(\rho V) d\omega + \iiint_{\Omega_m(t)} (\rho V) \operatorname{div} V d\omega = \iiint_{\Omega_m(t)} \sum_{k=0}^3 \frac{\partial(v_k \rho V)}{\partial x_k} d\omega. \end{aligned}$$

Собирая вместе полученные результаты и подставляя их в (3), получим тождество:

$$\iiint_{\Omega_m(t)} \left[\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + (\nabla \cdot V)(\rho V) + (\rho V) \operatorname{div} V \right] d\omega = \iiint_{\Omega_m(t)} \left[\rho \bar{g} - \nabla p + \nabla \otimes \bar{\tau} \right] d\omega. \quad (5)$$

Замечание. Отметим, что в общем случае вывод о равенстве подынтегральных выражений в (5), вообще говоря, несправедлив. Это связано с тем, что “малая” область $\Omega_m(t_0)$ в начальный момент времени t_0 может при развитом турбулентном течении через достаточный промежуток времени вовсе “рассыпаться” (т.е. стать одномерным множеством, не имеющим объем).

Очевидно, что достаточным условием импликации (5) \Rightarrow (6), где

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + (\nabla \cdot V)(\rho V) + (\rho V) \operatorname{div} V = \rho \bar{g} - \nabla p + \nabla \otimes \bar{\tau}, \quad (6)$$

является выполнение неравенства

$$\operatorname{mes}(\Omega_m(t)) \leq C_m \operatorname{mes}(\Omega_m(t_0)) \quad \forall t \geq t_0, \quad (7)$$

где mes – мера Жордана в пространстве, C_m – константа, не зависящая от времени.

Условие (7), в частности, выполняется для несжимаемой жидкости, так как в этом случае:

$$\begin{aligned} \operatorname{mes}(\Omega_m(t + \Delta t)) - \operatorname{mes}(\Omega_m(t)) &= \iiint_{\Omega_m(t + \Delta t) \setminus \Omega_m(t)} d\omega = \left(\iint_{\partial\Omega_m(t)} (Vn) d\sigma \right) \Delta t + o(\Delta t) \text{ при } \Delta t \rightarrow 0, \text{ но} \\ \iint_{\partial\Omega_m(t)} (Vn) d\sigma &= \iiint_{\Omega_m(t)} \operatorname{div} V d\omega = 0 \Rightarrow \frac{\Delta \operatorname{mes}(\Omega_m(t))}{\Delta t} = o(1) \Rightarrow \operatorname{mes}(\Omega_m(t)) = \operatorname{const} \quad \forall t. \end{aligned}$$

Из полученного уравнения движения (6) элементарно следует классическое уравнение Навье-Стокса для несжимаемой ньютоновской жидкости. Как известно, в этом случае [6] $\nabla \otimes \bar{\tau} = \mu \cdot \operatorname{grad}(\operatorname{div} V) \equiv \mu \cdot \Delta V$, где μ – коэффициент динамической вязкости, и из (6) получаем уравнение:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla \cdot V)(\rho V) + v \cdot \Delta V = \bar{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (8)$$

в котором ν – коэффициент кинематической вязкости.

Приближенная модель движения среды в вертикальных трубах. Схема усреднения. В силу малости размеров трубы естественно считать, что $V(t, X) \equiv v(t, r)$ и, следовательно, в этом случае уравнение движения (6) примет вид:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v^2) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \otimes \bar{\tau}. \quad (9)$$

Оператор усреднения на физическую величину $a(t, X)$ действует следующим образом:

$$a_s(t) \equiv \langle a \rangle_s \equiv \frac{1}{mes(\Omega_s)} \iiint_{\Omega_s} a(t, X) d\omega, \quad s \in \{o, *\}. \quad (10)$$

Отметим, что $\langle a \cdot b \rangle = \langle a \rangle \cdot \langle b \rangle + O(\ell) \approx \langle a \rangle \cdot \langle b \rangle$. Подействовав оператором (10) на уравнение неразрывности (2), получим: $\frac{d\rho_*}{dt} + S(\rho_* v_* - \rho_o v_o) = 0$, или учитывая, что согласно [1] $\frac{d\rho_*}{d\rho_*} = c_*^2$, где c_*^2 – скорость звука в области Ω_* :

$$C_a \frac{dP}{dt} = Q - \varphi(P), \quad (11)$$

где $P = p_o - p_*$, $Q = S \cdot v_*$ – объемный расход, $\varphi(p_o - p_*) = \frac{\rho_o}{\rho_*} Q_o$, $C_a = \frac{S\ell}{\rho_* c_*^2}$ – акустическая гибкость.

Рассмотрим в отдельности действие оператора усреднения на каждое слагаемое уравнения (9):

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v^2) \right\rangle_* &= \frac{1}{mes(\Omega_*)} \left\langle \frac{d(\rho v)}{dt} \right\rangle_* \approx \frac{d(\rho_* v_*)}{dt} \approx \rho_* \frac{dv_*}{dt}, \quad \langle \rho g \rangle_* = \rho_* g, \\ \left\langle \frac{\partial p}{\partial r} \right\rangle_* &= \frac{1}{\ell} \int_0^\ell \frac{\partial p}{\partial r} dr = \frac{1}{\ell} [p(t, \ell) - p(t, 0)], \quad \text{но } p(t, 0) \approx p_*(t), \quad p_o = p(t, \ell) + \rho_o g \ell, \quad \text{поэтому} \\ \left\langle \frac{\partial p}{\partial r} \right\rangle_* &\approx \frac{1}{\ell} (-\rho_o g \ell + p_* - p_o), \quad \iiint_{\Omega_*} \frac{\partial}{\partial r} \otimes \bar{\tau} d\omega = -S \cdot R \Rightarrow \left\langle \frac{\partial}{\partial r} \otimes \bar{\tau} \right\rangle_* = -\frac{R}{\ell}. \end{aligned}$$

Итак, собирая все вместе, получим:

$$L_a \frac{dQ}{dt} = H(Q) - P, \quad (12)$$

где $L_a = \frac{\rho_* \ell}{S}$ – акустическая масса, $H(Q) = g\ell(\rho_o - \rho_*) - R(Q)$ – напорная характеристика.

Полученная система уравнений (11)-(12) представляет математическую модель рассматриваемой задачи. Потеря устойчивости и рождения предельного цикла в системе (11)-(12) обусловлена наличием восходящей ветви напорной характеристики [3], а анализ физических причин (механизмов) ее образования проведен в [4].

Численная реализация полученной математической модели. Используя численный алгоритм, разработанный в [5], была создана прикладная программа, которая по входным данным, занесенным в текстовый файл DATA.TXT (рис.3.), строит предель-

ный цикл и соответствующие ему периодические решения (соответствующие режиму автоколебаний) динамической системы (11)-(12).

Разработка прикладной программы проводилась в среде компилятора Microsoft Visual C++ из пакета MS Visual Studio 6.0. Для разработки интерфейса использовалась библиотека классов MFC. Среда прикладной программы представляет собой многооконное MDI-приложение. Для алгоритмов и компьютерной графики использовался алгоритмический язык C и функции WinAPI. Особенности графики: пиксельные вычисления, графика векторная, для сглаживания использовались линейные сплайны.

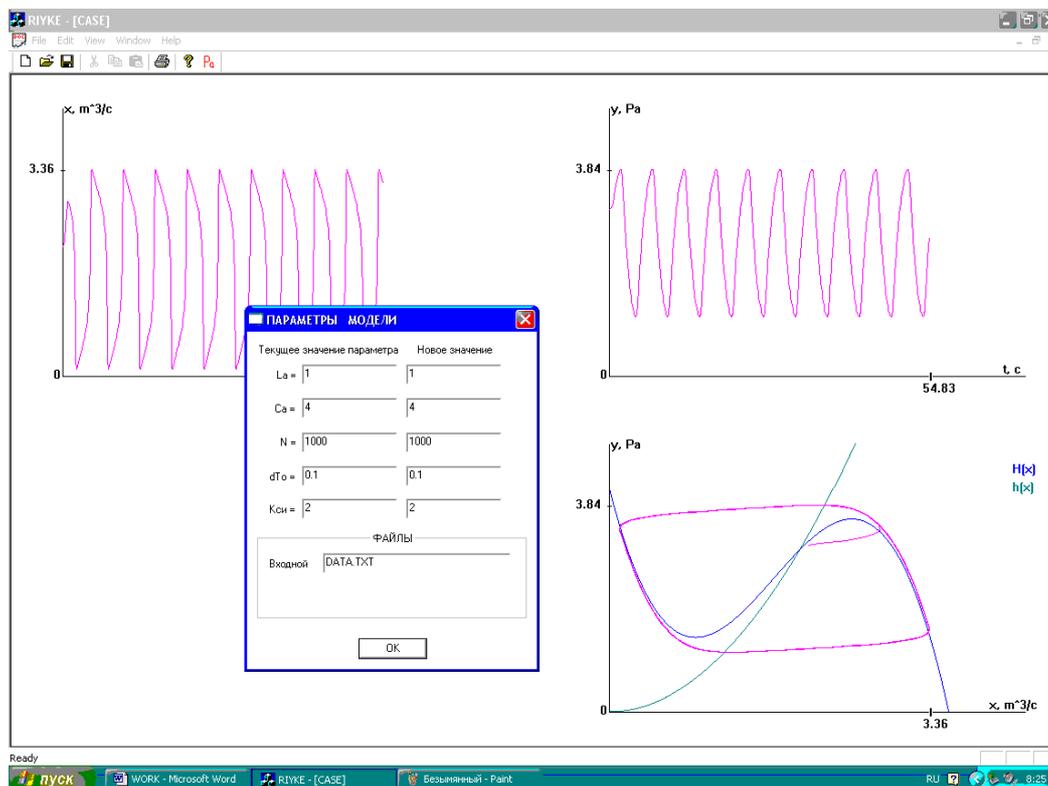


Рисунок 3 – Общий вид интерфейса разработанной прикладной программы

Выводы. Получена приближенная модель движения среды в независимости от его характера (турбулентного или ламинарного) в вертикальной трубе с сосредоточенным теплоподводом в нижней ее части. Анализ найденной динамической системы позволяет установить физические причины рождения устойчивого предельного цикла из неподвижной точки, соответствующей стационарному режиму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биркгоф Г. Гидродинамика. – М.: Изд. Ин. Лит., 1963. – 238с.
2. Гоцуленко В.В., Гоцуленко В.Н. Об одной модели движения вязкой сжимаемой среды // Тезисы докладов на X международной научно-методической конференции “Проблемы математического моделирования”. – Днепропетровск: ДГТУ. – 2006. – С.52-53.
3. Гоцуленко В.В. Математическая модель трубы Рийке и условия ее звучания // Математическое моделирование: Научный журнал. – 2000. – № 5. – С. 39-41.
4. Гоцуленко В.В. Совершенствование генераторов термоакустических колебаний и теплотехнологических агрегатов // Автореферат канд. диссертации. Киев: институт техн. теплофизики НАНУ, 2005.

5. Гоцуленко В.В. Математическое моделирование особенностей феномена Рийке при изменении мощности теплового потока // РАН: Математическое моделирование. – 2004, т. 16, №9. – С.23-28.
6. Курбатова Г.И., Филиппов В.Б. Элементы тензорного исчисления. Основы моделирования движущихся сплошных сред. – С.-П.: Изд. С.-Петербургского университета, 2002. – 241с.
7. Рихтмайер Р. Принципы современной математической физики. – М.: Мир, том 2, 1984. – 375с.

УДК 621.3.011: 621.1. 016

ТУЧИН В.Т.*, инженер
ДОЛГОПОЛОВ И.С., к.т.н., профессор

* ЗАО «Днепровский завод минеральных удобрений»
Днепродзержинский государственный технический университет

ОСНОВЫ ФОРМАЛИЗМА ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Розроблено аксіоматику топологоексергетичних структур зв'язку фізико-технологічних систем (ФТС). Сформульовано топологоексергетичний підхід до моделювання ФТС. Створено базовий алгоритм формування математичної моделі фізико-технологічної системи з використанням топологоексергетичних структур зв'язку.

Разработана аксиоматика топологоексергетических структур связи физико-технологических систем. Сформулирован топологоексергетический подход к моделированию ФТС. Создан основной алгоритм формирования математической модели физико-технологической системы с использованием топологоексергетических структур связи.

The axiomatics of bond structures of physicotecnological systems (FTS) is developed. Topologyexergycal approach to modelling FTS is formulated. The basic algorithm of mathematical physicotecnological system model formation is created with using topologyexergycal bond structures.

Введение. Одной из важнейших характеристик научно-технического прогресса является подход к анализу существующих и принципиально новых ФТС, в которых применяются традиционные и нетрадиционные энергоносители, с позиций энергосбережения. Для анализа энергетического совершенства таких процессов необходимо дальнейшее развитие топологоексергетического метода [1-17]. При этом необходимо разработать теоретические основы анализа возможности сокращения энергопотребления ФТС и их прикладной аспект, так как это приведет к изменению потребности в энергоресурсах как по суммарному объему, так и по структуре.

Постановка задачи. В соответствии с принципами системного анализа ФТС [1, 4, 10], этап синтеза математической модели предполагает использование топологоексергетической техники. Совмещенность в рассматриваемом объеме процессов различной физической природы (гидродинамических, диффузионных, тепловых, химических), нелинейность и распределенность параметров ФТС привели к необходимости дальнейшего развития формализма этого метода. В статье рассматриваются основы формализма топологоексергетического метода, на базе которого создаются новые структуры описания ФТС.

Данный подход основан на структурном представлении ФТС, вытекающем из разложения обобщенной эксергодиссипативной функции системы [6, 7, 9] на обобщенные эксергетические переменные усилия – e^3 и переменные потока – f (табл.1, 2).

Результаты работы. Аксиоматика топологэксергетических структур связи (ТСС).

Топологэксергетическая структура связи состоит из трех основных компонентов:

1. Связей [16], по которым передаются потоки энергии (эксергии). Направление передачи изображается половиной стрелки (рис.1,а). Полная стрелка является признаком активной связи, используемой для изображения операций измерения и управления (рис.1,б).

2. Структур слияния и разделения потоков [15], отражающих специфическую сторону ФТС – характер совмещенности в данной точке или объеме эксергетических явлений и процессов различной физико-химической природы: гидромеханической, химической, диффузионной, тепловой и т.д. (табл.3).

3. Топологэксергетических элементов [17], характеризующихся математическими зависимостями между эксергетическими e^3 - и f - переменными в виде алгебраических, дифференциальных и интегральных уравнений (табл.4).

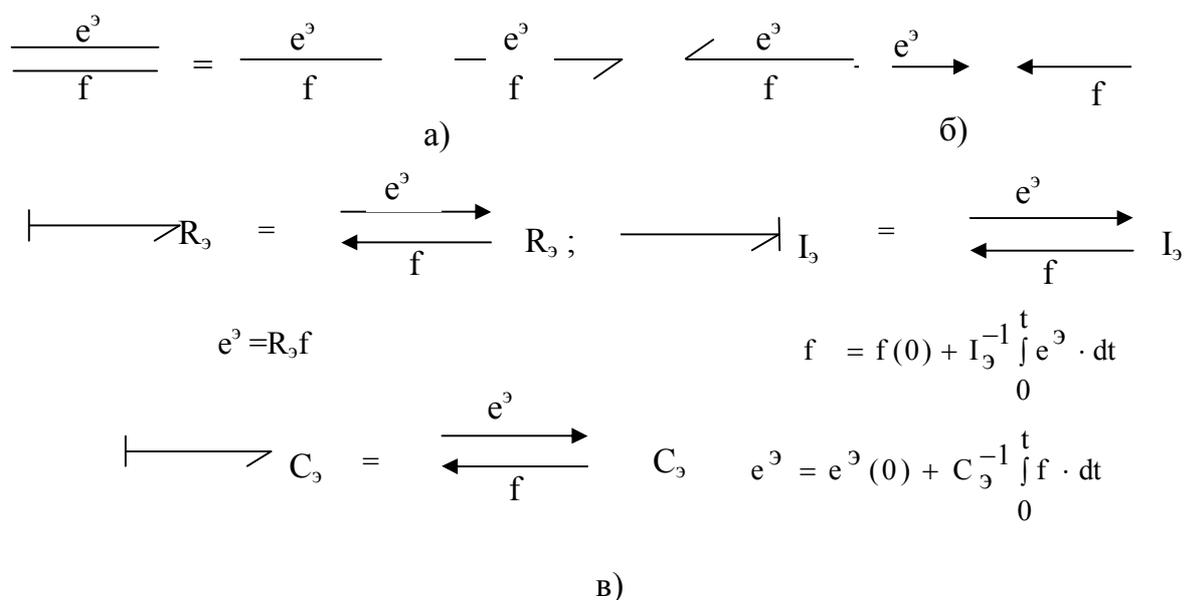
4. Смысловая нагрузка топологэксергетической связи информационно усиливается заданием причинно-следственных отношений с помощью штриха причинности и путем задания направления потока (постулируется правило знаков).

Таблица 1 – Эксергетические переменные для топологэксергетического моделирования механических, гидравлических, термических, химических и электрических систем

Вид системы	Эксергетическая переменная усилия, e	Единица измерения	Переменная потока, f	Единица измерения
Механическая с поступательным перемещением	Сила, F	Н	Скорость, V	м/с
Механическая с вращательным движением	Вращающий момент, M	Нм	Угловая скорость, ω	с ⁻¹
Гидравлическая	Разность давлений, ΔP Давление, P	Н/м ²	Объемный расход, V	м ³ /с
Тепловая: Конвективный поток тепловой энергии	Удельная эксергия, e'	$\frac{Дж}{кг}$	Массовый расход, m	кг/с
Кондуктивный поток тепловой энергии	Фактор Карно, $\eta_k = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$		Тепловой поток, \dot{Q}	Вт
Поток тепловой энергии, передаваемой излучением	ДТ-радиационный фактор, $\eta_{ДТ} = (1 - T_0 T_\phi)$		Тепловой поток, \dot{Q}	Вт
Химическая	Удельная химическая эксергия, e_x	$\frac{Дж}{Моль}$	Мольный расход, m_x	моль/с
Электрическая	Электрическое напряжение, u	В	Электрический ток, i	А

Таблица 2 – Обобщенные эксергетические импульсы и заряды для эксергетических переменных усилия и потока различных видов энергии

Вид энергии	Обобщенный импульс, р	Обобщенный заряд, q
Механическая: -поступательное движение -вращательное движение	Импульс силы p_F , [н·с] Угловой импульс p_m , [н·м·с]	Перемещение l , [м] Угол поворота φ , [рад]
Гидравлическая	Импульс давления P_p [Па·с]	Объем V , [м ³]
Тепловая: конвективный поток кондуктивный поток радиационный поток	Импульс удельной эксергии p_e , $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{с} \right]$ Импульс фактора Карно $p_k = \int_0^\tau \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \cdot d\tau = \int Q \cdot R_k \cdot d\tau$ Импульс ДТ-радиационного фактора $p_r = \int (1 - T_0 T_\phi) \cdot d\tau = \int \dot{Q} \cdot R_r \cdot d\tau$	Масса m , [кг] Количество теплоты Q , [Дж] Количество теплоты Q , [Дж]
Химическая	Импульс удельной эксергии p_{ex} , $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{моль}} \cdot \text{с} \right]$	Количество вещества m_x , [моль]
Электрическая	Потокоцепление Φ , [В·с]	Электрический заряд q_e , [К]



а) эксергетические связи; б) активные связи; в) операционная причинность на топологоэксергетических структурах связи

Рисунок 1 – Аксиоматика топологоэксергетических структур связи

Таблица 4 – Основные топологоэнергетические элементы, используемые в анализе ФТС

1	Название элементов и их топология	Математические зависимости	
		2	3
Сосредоточенные параметры	Диссипатор эксергии $\begin{array}{c} \text{---} \frac{e^3}{f} \text{---} \nearrow R_3 \\ \text{---} \frac{e^3}{f} \text{---} \searrow R_3 \end{array}$	$e^3 = R_3 f$ $f = R_3^{-1} e^3$	$e^3 = F_{R_3}(f)$ $f = F_{R_3}^{-1}(e^3)$
	Эксэнергетическая емкость $\text{---} \frac{e^3}{f} \text{---} \nearrow C_3$	$f = C_3 \frac{de^3}{dt}$ $e^3 = C_3^{-1} q$	$f = \frac{d}{dt} [\psi_{C_3}(e^3)]$ $e^3 = \psi_{C_3}^{-1}(q)$
	Эксэнергетическая инерционность $\text{---} \frac{e^3}{f} \text{---} \searrow I_3$	$e^3 = I_3 \frac{df}{dt}$ $f = I_3^{-1} p^3$	$e^3 = \frac{d}{dt} [\psi_{I_3}(f)]$ $f = \psi_{I_3}^{-1}(p^3)$
	<p>Источники: обобщенного эксэнергетического усилия</p> $S_e^3 \text{---} \frac{e^3}{f} \text{---} \searrow$ <p>обобщенного потока</p> $S_f^3 \text{---} \frac{e^3}{f} \text{---} \nearrow$ <p>обобщенных эксэнергетического усилия и потока</p> $S_{ef}^3 \text{---} \frac{e^3}{f} \text{---} \searrow \parallel$	$e^3 = E^3;$ (f - произвольная) $f = F;$ (e ³ - произвольная) $e^3 = E^3; f = F$	$e^3 = E^3(t);$ (f - произвольная) $f = F(t);$ (e ³ - произвольная) $e^3 = E^3(t);$ $f = F(t)$

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
сосредоточенные параметры	<p>Стоки: обобщенного эксергетического усилия</p> $S_e^{\vartheta} \leftarrow \frac{e^{\vartheta}}{f}$	$e^{\vartheta} = -E^{\vartheta}; (f - \text{произвольная})$	$e^{\vartheta} = -E^{\vartheta}(t); (f - \text{произвольная})$
	<p>обобщенного потока</p> $S_f^{\vartheta} \leftarrow \frac{e^{\vartheta}}{f}$		$f = -F(t); (e^{\vartheta} - \text{произвольная})$
	<p>обобщенных эксергетического усилия и потока</p> $S_{ef}^{\vartheta} \leftarrow \frac{e^{\vartheta}}{f} \parallel$	$f = -F; (e^{\vartheta} - \text{произвольная})$ $e^{\vartheta} = -E^{\vartheta}; f = -F$	$e^{\vartheta} = -E^{\vartheta}(t);$ $f = -F(t)$
	<p>Эксергетические преобразователи:</p>		
	<p>эксергетический трансформатор</p> $\frac{e_1^{\vartheta}}{f_1} \xrightarrow{\text{TF}} \frac{e_2^{\vartheta}}{f_2}$	$e_2^{\vartheta} = m e_1^{\vartheta}; f_1 = m f_2$	
	<p>эксергетический неидеальный проводник</p> $\frac{e_1^{\vartheta}}{f_1} \xrightarrow{\text{TD}} \frac{e_2^{\vartheta}}{f_2}$	$e_2^{\vartheta} = m e_1^{\vartheta}; f_1 = n f_2$	
	<p>эксергетический гиратор</p> $\frac{e_1^{\vartheta}}{f_1} \xrightarrow{\text{GY}} \frac{e_2^{\vartheta}}{f_2}$	$e_1^{\vartheta} = m f_2; e_2^{\vartheta} = m f_1$	
<p>модулированный эксергетический трансформатор</p> $\frac{e_1^{\vartheta}}{f_1} \xrightarrow{\text{MTF}} \frac{e_2^{\vartheta}}{f_2}$ <p style="text-align: center;">↓ $\Phi(x)$</p>	$e_2^{\vartheta} = \Phi(x) e_1^{\vartheta}; f_1 = \Phi(x) f_2$		

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
Сосредоточенные параметры	<p>модулированный эксергетический гиратор</p> <p>модулированный эксергетический неидеальный проводник</p>	$e_1^3 = \Phi(x)f_2 ; e_2^3 = \Phi(x)f_1$	
		$e_1^3 = \Phi_1(x)e_2^3 ;$ $f_2 = \Phi_2(x)f_1$	
Распределенные параметры		$e^3 = C_3^{p-1} \int_0^{\ell} f \cdot dx + e^3(0, t) \text{ или}$ $f = C_3^p \frac{\partial e^3}{\partial t}$	
		$e^3(\ell) = I_3^{p-1} \frac{\partial}{\partial x} \int f \cdot dt ;$ $f = I_3^p \frac{\partial}{\partial t} \int e^3 dx$	
		$f = \int F(x)dx$	$f = \int \varphi_F(x)dx$
		$e^3 = \int E^3(x)dx$	$e^3 = \int \varphi_E^3(x)dx$

Правило знаков: связь является положительной, если она ассоциируется с одинаковым направлением e^3 и f – переменных.

Под распределением операционной причинности на связях понимается разбиение e^3 и f – переменных на независимые (входные) и зависимые (выходные). Структурное изображение причинности сводится к нанесению на связи условного штриха операционных причинно-следственных отношений (рис. 1, в). Назначение причинности позволяет однозначно решить вопрос о зависимых и независимых эксергетических переменных в элементарных уравнениях и сформировать алгоритм получения математической модели ФТС (рис. 2). Информационная насыщенность ТСС, их глубокая смысловая емкость позволяет представить, формировать и неограниченно хранить в памяти ЭВМ, используя эти данные для анализа и синтеза ФТС.

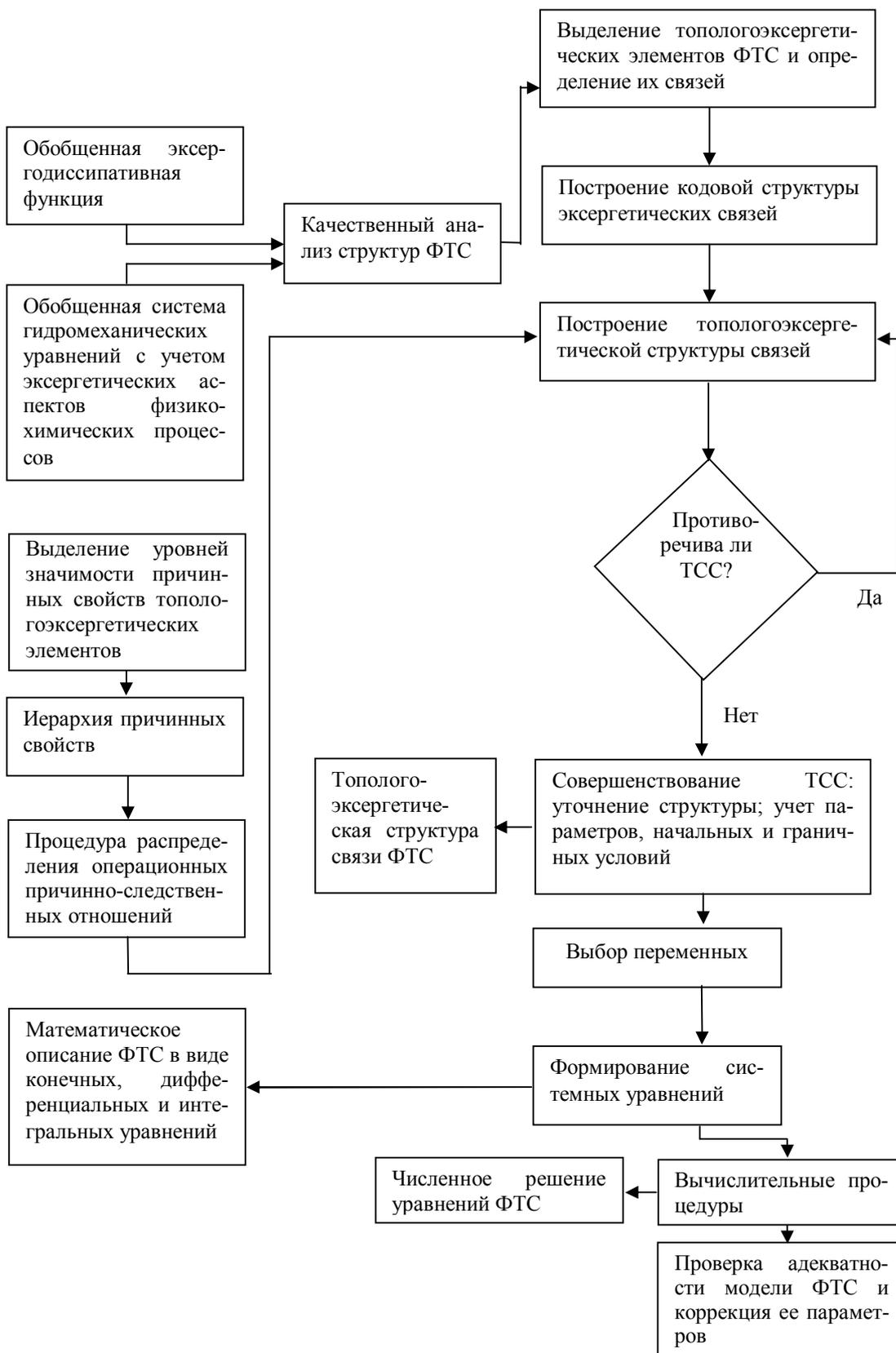


Рисунок 2 – Основной алгоритм формирования математической модели ФТС

- Выводы.** 1. Представлены основы формализма топологоэксергетического подхода моделирования физико-технологических систем.
2. Разработана аксиоматика топологоэксергетических структур связей.
3. Представлены эксергетические переменные для топологоэксергетического моделирования механических, гидравлических, термических, химических и электрических физико-технологических систем.
4. Показаны основные типы структур слияния и разделения, элементная база ТСС.
5. Разработан основной алгоритм формирования математической модели ФТС на основе топологической структуры связей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбацевич Л.Л. и др. Системный подход к моделированию массообменных процессов разложения карбоната свинца в аппарате фонтанирующего слоя // *Материалы второй Всесоюзной научной конференции «Современные машины и аппараты химических производств»*. – Чимкент, 1980. – Т.1. – С.149-152.
2. Дорохов И.Н., Горбацевич Л.Л., Тучин В.Т. Метод автоматизированного учета геометрической информации при топологическом моделировании физико-химических систем. Деп. в ВИНТИ. №1274-78(78). «Депон. рук.» 1978, – 24с. – Б/о №540.
3. Тучин В.Т., Дорохов И.Н. Метод автоматизированного вывода передаточных функций и частотных характеристик физико-химических систем на основе диаграмм связи. Деп. в ВИНТИ. №3296-78(79). «Депон.рук.» 1979, №2 – 25с. – Б/о №219.
4. Тучин В.Т. Системный подход к моделированию газодинамики верхней зоны доменной печи с помощью топологического метода описания физико-химических систем // *Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара «Проблемы автоматизированного управления доменным производством»*. – Киев, 1983 октябрь. – С.15.
5. Тучин В.Т., Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Новый метод моделирования гидродинамики в аппаратах фонтанирующего слоя с помощью диаграмм связи // *Докл. АН СССР*. – 1979. – Т.244, №23. – С.664-668.
6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем // *Промышленная теплотехника*. – 2003. – Т.25, №4. – С.116-118.
7. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксергодиссипативная функция как основа топологоэксергетического анализа физико-технологических систем. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепропетровск: НМетАУ, т.5, 2002. – С.67-71.
8. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. Топологический подход к определению эффективности совмещенных процессов химической реакции и диффузии. Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: НМетАУ, 2001, т.4. – С.20-26.
9. Братута Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико-технологических системах. // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2003, 4. – С.20-27.
10. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Тучина У.Н. Разработка топологоэксергетического метода анализа энергосбережения физико-технологических систем // *Збірник тез доповідей 4-ї Всеукраїнської науково-методичної конференції “Екологія та інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”*. – Дніпродзержинськ, 2002. – С.235-236.
11. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС // *III Всеукраїнська наукова конференція «Матема-*

- тические проблемы технической механики» (материалы конференции). – Днепродзержинск, 2003. – С.49.
12. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братуга Э.Г., Тучина У.Н. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС) – Часть 1// Интегровані технології та енергозбереження. – 2004.-№4. – С.81-89.
 13. Минаева А.С., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический анализ сушильной камеры трубы-сушилки (стационарный режим) // Математичне моделювання. – 2004. – №2 (12). – С.55-61.
 14. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Словиковский П.А., Хандрига Г.С. Топологоэксергетический анализ рекуперативного пластинчатого теплообменника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины – Днепропетровск: «Пороги», 2004, том 10. – С.183-194.
 15. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Шрамко О.А. Новые узлы разделения в топологоэксергетическом методе моделирования физико-технологических систем (ФТС) // Математичне моделювання. – 2003. – № 1(9). – С.56-60.
 16. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Система переменных в топологоэксергетическом методе описания физико-технологических систем (ФТС) // Математичне моделювання – 2003. – № 2 (10). – С.73-78.
 17. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Элементная база топологоэксергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС)// Математичне моделювання. – 2005. – №1(13). – С.29-36.