УДК 338.45.003.13:620.91

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА

Бурдо О.Г., Буйвол С. М.
Одесская национальная академия пищевых технологий,
Бандура В.Н., Винницкий государственный аграрный университет

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы развития энергетических проблем в мире. Обсуждается специфика энергетического обеспечения агропромышленного комплекса и формулируются основы энергетической политики и стратегии в условиях кризиса. Приводится методология энергетического мониторинга и основы экономики энергетического менеджмента. Обосновываются приоритеты при формировании этапов внедрения проектов. Показано, как составлять программы энергоэффективности с привлечением механизмов частичного самофинансирования проектов.

Ключевые слова. Энергетическая стратегия, энергоэффективность, энергомониторинг.

STRATEGIA ENERGETICĂ DE DEZVOLTARE A COMPLEXULUI AGROINDUSTRIAL ÎN CONDIȚIILE DE CRIZĂ

Burdo O.G., Buiwol S. M.
Academia Națională aTehnologiilor de Alimentare din Odesa,
Bandura V.N., Universitatea agrară de stat din Vinița

Rezumat. În articol sunt cercetate întrebările de dezvoltare a problemelor energetice în lume. Se dezbate specifica asigurării energetice a complexului agroindustrial şi sunt formulate bazele politicii energetice şi strategiei în condițiile de criză. Se prezintă metodologia monitoringului energetic şi bazele economiei managementului energetic. Sunt argumentate prioritățile la procesul de formare a etapelor de implementare a proiectelor. Este prezentată metodologia compunerii programelor de eficiența energică cu atragerea autofinanțării parțialre a proiectelor.

Cuvinte cheie. Strategia energetică, eficiență energetică, monitoringul energiei.

POWER STRATEGY OF THE AGRICULTURE DEVELOPMENT IN THE CONDITIONS OF CRISIS

Burdo O.G., Buiwol S. M.
Odessa National Academy of Food Technologies,
Bandura V.N., Vinnitsa State Agrarian University

Abstract. Questions of the development of energetics in the world are examined. Specifics of the energy supply in agriculture are discussed and the basics of energy policy and strategy in crisis conditions are formulated. The methodology of power monitoring and basics of economy of power management are shown. Priorities at formation of stages of projects implementation are proved. Ways of energy efficiency programs creation using partial projects self–financing mechanisms are shown.

Key words. Energy strategy, energy efficiency, energy monitoring.

Развитие энергетических проблем в мире.

Человек на протяжении всей истории развития стремился повысить уровень комфортности своей жизни. Ту степень комфорта, которую достиг человек, практически трудно снизить. Да это и не логично в тенденциях развития человечества. Естественно стремление слаборазвитых стран повысить уровень комфорта до западных стандартов. Естественно желание европейца улучшить жизненные показатели. Однако для этого требуется увеличить расход ресурсов, в первую очередь – энергии. Добыча энергоносителей, их переработка неизбежно оказывают отрицательное влияние на среду обитания человека. Повышение качества жизни приводит к росту нагрузки на

окружающую среду. Парадоксально, но стремление к комфорту неизбежно без ухудшения условий среды обитания. Какой он – разумный баланс, можно ли разумней использовать энергоресурсы? Как расходовать только совершенно необходимое количество энергии при сохранении достигнутого уровня комфорта и, даже, повышать его.

Известно, что 20% населения Земли потребляет 80% добываемого органического топлива, а остальные довольствуются только 20 процентами. Объем промышленного производства в мире удваивается – каждые 15 лет, а энергетическая мощность каждые 12 лет. За последние десятилетия промышленная нагрузка на окружающую среду выросла в 2,5…3 раза. Энергоемкость растет, а запасы органического топлива – снижаются. В связи с растущим дефицитом энергии в мире Базельский манифест, принятый в рамках Всемирного конгресса «Мир и справедливость» (1989 г.), установил ограничение всей первичной энергии на одного жителя 3 тоннами каменного угля, т.е. 88 ГДж. Бурный рост экономик Китая и Индии стремительно выводит эти страны в лидеры мирового производства. Поэтому, неизбежен передел мирового баланса энергопотребления, т.к. эти страны в настоящее время характеризуются низким уровнем энергообеспечения.

Глобализация энергообеспечения, дефицит энергоносителей наиболее остро ощущается странами бывшего СССР. Здесь стоимость энергоносителей выросла практически в 100 раз, а культура энергопользования осталась на прежнем уровне. Если говорить точнее, то исторически сложилось так, что эта культура вообще отсутствует.

В Украине проживает около 1% населения планеты, а экономика страны привыкла потреблять 2,2% энергии, используемой в мире. При этом Украина является энергодефицитной страной, а уровень комфортности нашей жизни соответствует уровню слаборазвитых стран. Имея крайне ограниченную добычу собственного природного газа, украинец лидирует по объему его сжигания, уступая только россиянам, англичанам и американцам (рис.1). До 40% национального бюджета Украины расходуется на закупку энергоносителей, при этом, ощущается острый дефицит топлива в коммунальной сфере, на транспорте, в промышленности. Правительство понимало остроту проблемы энергетического обеспечения страны. Однако, несмотря на то, что одним из первых законов независимой Украины был закон «Об энергосбережении», что была создана специальная, новая структура – Госкомитет по энергосбережению, что все ведомства и регионы имели программы энергосбережения, удельная энергоемкость продолжала расти [1]. Она увеличилась к 1997 г. еще на 40%. В последние годы наметилось некоторое снижение удельной энергоемкости, но, даже, уровень 1990 г. еще не достигнут.

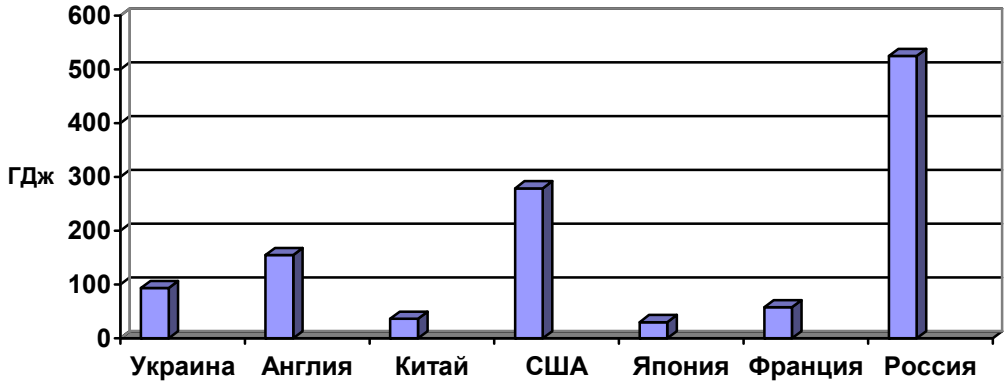


Рис.1 Уровень годового потребления энергии одним человеком.

Валовой продукт, который приходится на одного украинца, в 45 раз ниже, чем в Японии, почти в два раза ниже, чем в Республике Беларусь.

Таблица 1. Энергетическая статистика

Страна	Население, млн. чел.	Энергоемкость ВВП, кг н.э./долю США
Беларусь	9,97	0,35
Германия	82,34	0,18
Дания	5,36	0,14
Россия	144,75	0,67
США	285,91	0.25
Украина	**46,2**	**0,72**
Франция	60,91	0,19
Япония	127,21	0,17

Необходимо отметить, что Беларусь, которая имела одинаковые стартовые условия, имеет сейчас в два раза лучшие показатели удельной энергоемкости экономики (табл.1).

Ситуация осложняется тем, что Украина взяла на себя ряд серьезных международных обязательств в рамках международных энергетических программ [2]. Исходя из этих условий, строится энергетическая политика государства.

Энергетическая ситуация в АПК. В первую очередь вопросы энергообеспечения касаются предприятий АПК. Агропромышленный комплекс в последние годы занимает лидирующее место в Украине по объему потребляемых (до 19%) энергетических ресурсов. При этом, удельные затраты энергии в промышленной сфере выросли за годы независимости почти на 35%. Постоянный рост удельного энергопотребления в отраслях АПК серьезно усугубляет энергетический кризис в стране. Переход на новые экономические условия обозначил острое противоречие на пищевых производствах. Можно выделить три основных общих причины роста удельного энергопотребления. Первая – стремительно достигшие мирового уровня цены при расчете за энергоносители с одной стороны, и отсутствие культуры энергопользования, теплотехнологии, принципиально рассчитанные на потребление дешевых энергетических ресурсов, с другой. Вторая причина – существенное снижение объема выпускаемой на крупных предприятиях продукции, усугубленное ее перераспределением среди многочисленных мини-предприятий отличающихся повышенной энергоемкостью. В результате нарушено соответствие потребности в энергии с производительностью централизованных систем энергоснабжения, их эффективностью. Третья причина – динамичное развитие в Украине теневой экономики, которая выходит на лидирующие позиции в Европе.

Удельные затраты энергии на производство пищевых продуктов в Украине в 2–4 раза выше, чем в среднем в Европе, в 3–6 раз выше, чем во Франции. Поэтому, пищевые продукты, изготовленные в Украине, неконкурентоспособны на мировом рынке. Ясно, что, если не предпринимать экстренных мер, то продукция украинских производителей пищевых продуктов будет вытеснена и с отечественного рынка. Вместе с тем, именно продукция АПК способна быстро наполнять государственный бюджет, она характеризуется постоянным спросом, отечественные технологии и сырье, как правило, гарантируют высокие пищевые качества готовых продуктов. Поэтому, здесь следует

искать экономически выгодные технические и организационнотехнические решения по снижению расхода энергетических ресурсов.

Энергетическая политика в АПК. Принципиально возможны два направления в энергетической политике – энергоэффективная экономика и энергосбережение [2]. Признаки энергосбережения – это нормирование расходов энергии, регламентация потребления и отключения при дефиците. Энергетическая эффективность имеет принципиальные отличия в направлениях развития и подходах энергетического обеспечения государства. Вопрос этот не в терминологии, а в отношении к энергии. Энергосбережение осталось у нас из прошлого, которое было пресыщено дешевыми энергоресурсами. В то, энергообеспеченное время, не могло вырабатываться уважение к «Джоулю» и «Ватту». Энергетическое расточительство не сформировало ни у населения, ни у производителей товаров, ни у первых лиц регионов и государства современной культуры пользования энергией. Не воспитывается новое отношение к энергии и у нового поколения. Мы по-прежнему боремся за энергосбережение. Если задуматься, то цель энергосбережения минимизация расхода энергии. И реализовать по максимуму такую цель не сложно: требуется закрыть задвижку на газопроводе и отключить рубильник на линии электропередачи. В результате потребление энергии снизиться до нуля.

Энергоэффективность предполагает, что энергия – это дорогой ресурс, которым необходимо грамотно и профессионально распорядиться. Вероятно, острый энергетический кризис в стране в значительной степени объясняется тем, что изначально не правильно была сделана ориентация государства на отношения к энергетическим проблемам. Энергия – это товар, эффективное использование которого в производстве и услугах даст прибыль, а расточительное сделает банкротом.

Основы энергетической стратегии. В условиях энергетического кризиса, в котором находится Украина, важно правильно выбрать стратегию развития. Здесь следует помнить, что прошлое Украины в стране пресыщенной дешевыми энергетическими ресурсами. Пока в стране не будет преодолен барьер чрезвычайно низкой культуры энергопользования, никакие программы энергосбережения работать не будут, никакие инвестиции эффективными не станут. Поэтому, одним из приоритетных направлений энергетической политики государства должно стать обучение культуре энергопользования всех слоев населения: от первых лиц регионов, предприятий до студентов и школьников.

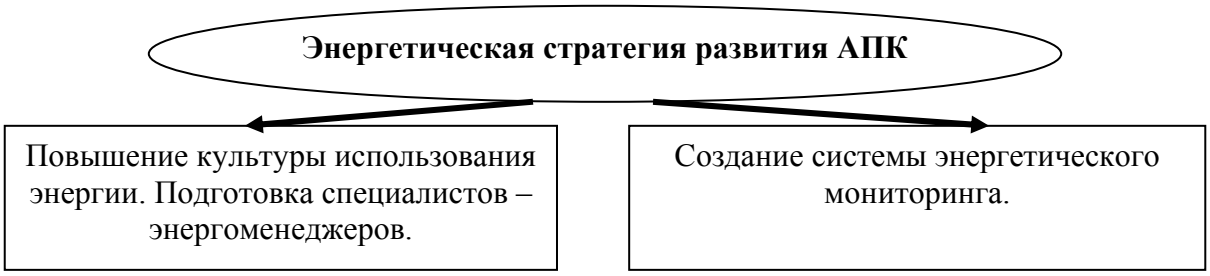


Рис.2 Направления энергетической стратегии.

Второе направление стратегии это система энергетического мониторинга (рис.4). Результатом этих двух направлений должны стать программы повышения эффективности использования энергии на отдельных предприятиях и в отрасли в целом. При проведении энергетического мониторинга и составлении программы следует исходить из прогноза [2], что к 2020г. структура потребления энергоносителей в мире практически не изменится (рис.3). Эффективность программы в значительной

степени определяется корректностью проведенных энергетических исследований объектов.

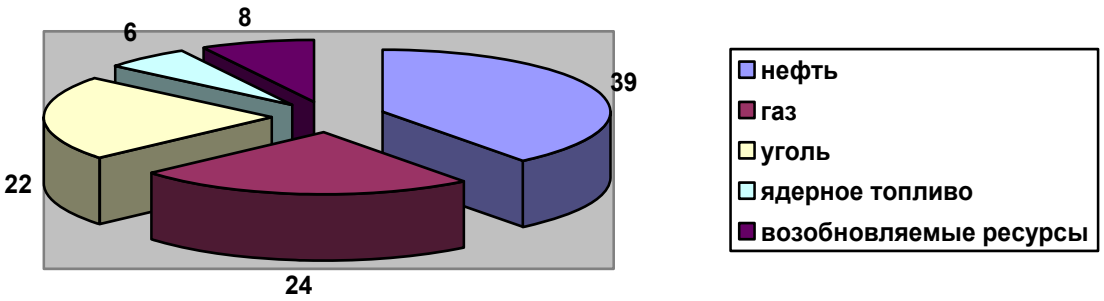


Рис.3. Прогноз структуры потребления энергоносителей в мире в 2020г.

Методология энергетического мониторинга. Представляется, что вопросы энергообеспечения в Украине, в АПК следует рассматривать не в связи с приходом зимы, еженедельно, ежесуточно и оперативно принимать обоснованные решения.

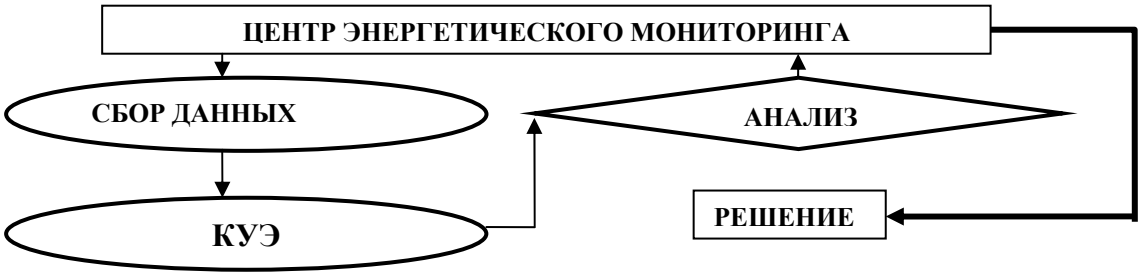


Рис.4. Система энергетического мониторинга.

Для управления энергетической ситуацией целесообразно создание специализированного центра, который на основе коэффициентов удельного энергопотребления (КУЭ) формирует решения (рис. 4).

В сложившейся сложной ситуации нужно внимательно проанализировать мировой опыт. Известно, что острый энергетический кризис охватил развитые страны Европы и США в 70-е годы. Им удалось достаточно быстро решить возникшие проблемы во многом благодаря новому подходу, новой науке – энергетическому менеджменту. В основе этого эффективного инженерного метода – структурный анализ предприятия на принципах системного подхода. Появилась новая профессия – энергоменеджер, задачей которого было установить минимально возможный расход энергии, необходимый для работы предприятия. Многие предприятия привлекали для решения энергетических проблем специализированные консалтинговые фирмы энергетического менеджмента и аудита.

Современные технологии энергомониторинга предполагают организацию центров или групп (рис. 4) и диагностику предприятия по уровню потребления ресурсов. На первом этапе осуществляется энергетическая ревизия, цель которой получить общую информацию об уровне расхода всех видов ресурсов, оценить удельные затраты энергии на выпуск продукции. Такой анализ позволит провести соответствующее ранжирование по энергоемкости, определить имеющийся общий потенциал и оценить

остроту проблемы энергетической эффективности. Результатом такой работы являются нормы потребления энергоресурсов и энергетический паспорт предприятия. На втором этапе проводится энергетическое обследование линии, цеха, предприятия. По сути, это декомпозиция системы, выделение наиболее энергоемких объектов. С помощью комплектов мобильных измерителей проводится регистрация токовых нагрузок, температур, влагосодержания и расходов теплоносителей, температурного поля корпусов оборудования. Анализ пароконденсатных, электрических и тепловых балансов устанавливает структуру энергетических потерь. В результате работы определяется карта потерь энергии и карта возможных потребителей низкопотенциальных тепловых сбросов. Такие карты являются основанием для разработки программы повышения энергетической эффективности предприятия.

Экономика энергоменеджмента. Высокая энергоемкость производства предполагает, что есть огромные резервы по повышению энергоэффективности, есть разнообразные пути решения задач. Общий принцип на этом этапе такой: сделать так, как уже сделали в мире. Чем больше значение потенциала энергосбережения, тем больше есть технических решений, которые при незначительных инвестициях дадут прибыль и имеют малый срок окупаемости. Рекомендуется в программе предусмотреть несколько этапов (рис.5).

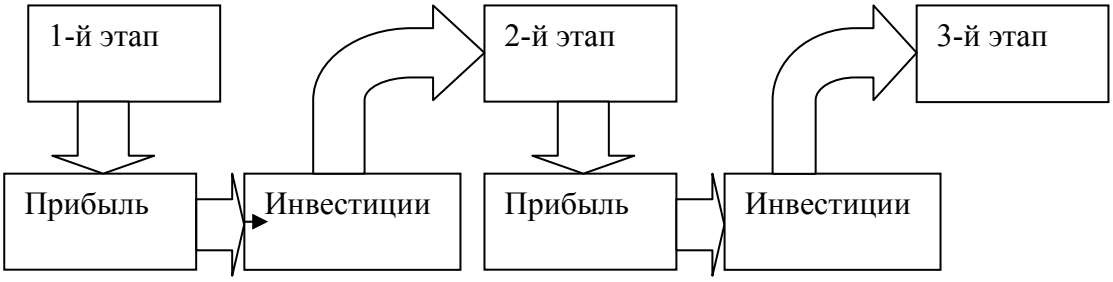


Рис. 5. Этапы программы и механизм частичного самофинансирования.

Сегодня уже очевидно, что единственный путь к конкурентоспособности украинских продуктов на мировом рынке–это повышение энергоэффективности. Инвестиции в энергоэффективность становятся самыми выгодными инвестициями в АПК.

На первом этапе планируется выполнение беззатратных и малозатратных проектов. Во-первых, это ликвидации прямых утечек пара, газа, воды. Эффект от реализации этих простых задач часто бывает неожиданным. Потери ресурсов сокращаются до 80%. Во-вторых, это организационно - технические проекты, из которых на первый план выходят задачи совершенствования режима «разогрев – работа - остановка» и согласование номинальной мощности генерирующих систем с потребителем. Объединяет эти задачи общая причина: сокращение объема выпуска продукции. В результате расход энергии на разогрев оборудования становится ощутимым в общем балансе. А работа парогенераторов на пониженных мощностях приводит к снижению КПД, т.е. к перерасходу топлива.

Важным моментом программы является максимально возможное привлечение механизмов самофинансирования проектов. Доходы от малозатратных проектов первого этапа инвестируются в проекты второго этапа. Здесь планируются работы по установке дополнительных счетчиков расхода ресурсов, модернизация тепловой изоляции, установка теплоутилизаторов и т.п. Естественно, эти проекты требуют материальных затрат. Но, часть из них поступят как прибыль из первого этапа, часть в виде инвестиций. Следовательно, проекты должны быть четко экономически

обоснованы, приоритеты отдаются задачам, гарантирующим большую прибыль при меньшем периоде окупаемости.

Третий этап программы – это серьезные инвестиционные проекты, которые направлены на создание современных систем энергетического мониторинга. Это компьютеризация сбора данных по основным параметрам работы предприятия, анализа большой базы данных. Такие системы дают возможность оперативно влиять на ход производственной деятельности, использовать для выпуска продукции минимально возможное количество ресурсов. Предприятиям АПК следует разобраться в экономической эффективности различных энергоэффективных проектов, представлять приоритетные этапы проектов. Так, проведение энергетических обследований предприятия требует затрат до 1% от стоимости ТЭР, а определяет пути сокращения потерь энергии на 10…80%. Установка счетчиков окупается в пределах 3 месяцев; работы по усилению тепловой изоляции сокращают потери энергии на 8…12%, а установка конденсатоотводчиков – на 10…25%. Использование систем частотного регулирования оборотов привода снижает расход электроэнергии на 5…15%, а установка систем регулирования – до 8%.

Значительный диапазон значений по возможной экономии топливо – энергетических ресурсов (ТЭР) связан с особенностями объектов, их индивидуальностью и подтверждает обязательную необходимость энергетических обследований. Следует отметить, что опыт развитых стран в сфере энергосбережения трудно переоценить, но бездумно копировать мировые тенденции в решении практических задач нельзя. Необходим серьезный численный анализ, который учитывал бы и специфику технологии, и климатические особенности, и экологическую обстановку, и инженерную инфраструктуру предприятия, города.

Представлялось, что резкий скачок цен на энергоносители, который произошел в Украине, должен вызвать понятную реакцию потребителей – экономное расходование энергии. Однако, результат оказался неожиданным. Энергетическая составляющая в себестоимости пищевой продукции выросла в 10…20 раз и в настоящее время в среднем по Украине составляет 25%. Потребленная энергия используется крайне неэффективно.

Поэтапное решение проблем энергоэффективности в АПК позволит высококачественным украинским продуктам стать конкурентоспособными на мировом рынке. Естественно, первоочередными задачами являются образование и повышение культуры энергопользования, формирование новой философии природопользования.

Перевод пищевых технологий на прогрессивные принципы, особенно на нанотехнологии, открывает новые возможности выгодно совершенствовать производство при существенном снижении расхода ресурсов [2, 3]. Именно энергоэффективность является тем направлением, которое стимулирует развитие производства, внедрение прогрессивных технологий и обеспечивает комфортные условия жизни населения в странах бывшего СССР.

Литература

1. Бурдо О.Г. Энергетический консалтинг в АПК Южного региона //Энергосберегающие технологии и автоматизация.–2001.–№1–2.–С.70–74.
2. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
3. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженерно-физический журнал. Минск, т. 78, № 1., 2005. - С.88-93

АКТУАЛЬНОСТЬ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТАРИФНОЙ ПОЛИТИКИ В ЭНЕРГЕТИКЕ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ

В.М. Постолатий
Институт энергетики АН Молдовы

Аннотация: Рассмотрена взаимосвязь энергетики и отраслей экономики Республики Молдова. Отмечены противоречия в ценовой политике между энергетическими предприятиями – поставщиками энергоресурсов и потребителями - отраслями экономики и населением. Предложена модель и рекомендации по координации тарифов на энергоресурсы в интересах как потребителей, так и энергопредприятий, и способствующие росту экономики в целом.
Ключевые слова: тариф, норма прибыли, энергетические ресурсы, топливо – энергетический комплекс, энергоснабжающие организации, потребители топлива и энергии.

ACTUALITATEA PERFECȚIONĂRII POLITICII TARIFARE ÎN ENERGETICĂ ŞI ÎN SECTOARELE ECONOMICE ADIACENTE

V. M. Postolati
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat: Sunt examinate legăturile reciproce între energetică şi sectoarele economice ale Republicii Moldova. Sunt depistate dezacordurile politicii tarifare dintre întreprinderile energetice – furnizoare de energie şi consumatori – sectoarele economice şi populaţia. S-a propus un model şi recomandări privind coordonarea tarifelor pentru resursele energetice atît în interesele consumatorilor, cît şi ale întreprinderilor energetice, care contribuie la creşterea economiei în ansamblu.
Cuvinte–cheie: tarif, narma de profit, resurse energetice, complexul energetic şi de combustibiil, întreprinderi furnizoare de energie, consumatori de combustibil şi energie.

THE ACTUALITY OF IMPROVING THE TARIFF POLICY IN ENERGETICS AND ADJACENT SECTORS OF THE ECONOMY

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

Abstract: Relationships between energy and branches of economy of the Republic of Moldova are considered. Inconsistency of tariff policy between energy companies – suppliers of energy and consumers – branches of economy and households are identified. The model and recommendations on coordination the tariff for energy resources, taking into account the interest of both consumers and energy companies, contributing to economical development, are proposed.
Keywords: tariff, level of income, energy resources, energy and fuel sector, energy supply companies and organizations, consumers of fuel and energy.

Республика Молдова не располагает достаточными собственными энергетическими ресурсами. Основные виды топлива – газ, мазут, уголь, жидкие виды топлива практически полностью импортируются из других стран.

Электроэнергетическая система и система магистральных газопроводов построены во времена единого Союза всех республик. Эти системы в Республике Молдова, как и в других странах СНГ, создавались в интересах общего энергоснабжения всех Республик, а также для решения задач экспорта. Крупные энергетические объекты были построены исходя из общесистемных интересов и критериев оптимального их расположения для обеспечения высокой надежности, живучести и экономичности энергоснабжения всех

потребителей. В комплексе были решены и проблемы адресной поставки первичных топливных ресурсов.

Однако, после того, как Республики стали самостоятельными государствами, оказалось, что созданные системы энергоснабжения не в полной мере отвечают интересам каждой Республики в отдельности. Трудности усугубились и тем, что не все Республики в равной мере располагают собственными достаточными природными энергетическими ресурсами. Несмотря на статус самостоятельных государств, реальной самостоятельности в энергетике не наблюдается, сохраняется большая зависимость друг от друга. Ко всему добавились сложности экономического характера и другие.

Особо остро экономические проблемы переживает Республика Молдова.

Нарушение стабильности в экономике, общий спад производства, допущенные дисбалансы между покупательной способностью потребителей и увеличенными тарифами на топливо и энергию привели к появлению и накоплению больших внутренних и внешних долгов, а соответственно, и нестабильности в энергообеспечении.

В практике работы энергетического комплекса Республики Молдова уже наблюдались перерывы в газоснабжении, в электроснабжении, что приводило к остановке предприятий, сбоям в работе жизненно важных систем и расстройству всего народно–хозяйственного комплекса.

Энергетика и экономика тесно взаимно связаны. Энергетика является базой экономики, но, вместе с тем, она зависима от экономики в финансовых, материальных и организационных вопросах, в объемах выработки энергии и в перспективах развития.

В экономике Республики Молдова, начиная с 1990 г., проводятся значительные структурные преобразования. Существенные изменения за этот период происходили и в энергетике. В 1997-1998 гг. была проведена реструктуризация энергетического комплекса, а в 1999 г. начата приватизация. К настоящему времени приватизированы предприятия распределительных электросетей. Ведется подготовка к приватизации источников электрической и тепловой энергии и остальных объектов энергетики. Организационная и управленческая структура в энергетической отрасли уже претерпели большие изменения. Наряду с государственной собственностью появилась частная собственность.

Результаты начального опыта работы предприятий энергетического комплекса с различными формами собственности выявили зарождающиеся противоречия, осложняющие решение проблем стабильности энергоснабжения, обеспечения энергетической безопасности и учета социальных интересов населения. Суть этих противоречий заключается в том, что приватизированные предприятия осуществляют политику дальнейшего увеличения тарифов на энергию и энергоресурсы для получения собственной прибыли, в противовес тому, что государство пытается сдерживать и регулировать цены и тарифы в интересах населения, принимая во внимание его реальную покупательную способность, а также в интересах производства – для того, чтобы обеспечить его дальнейшее развитие.

Необоснованное повышение тарифов на энергию и энергоресурсы в нынешних условиях состояния экономики приводит к сокращению объемов их потребления, и, соответственно, к уменьшению суммарных доходов энергоснабжающих организаций, из-за того, что потребители и, особенно промышленные предприятия, переживают всё большие трудности, уменьшают объемы производства товарной продукции, оказываются неплатежеспособными и частично прекращают свою деятельность.

Некоторые энергоснабжающие организации руководствуются принципом – раз потребители не платят, их надо отключать, что собственно они и делают, не задумываясь

об истинных причинах такого положения, в том числе, не учитывая пагубного влияния осуществляемого ими повышения тарифов.

В условиях перехода к рыночным отношениям предприятиям энергокомплекса, независимо от форм собственности, в целях увеличения объемов реализации собственной продукции (энергии и энергоносителей) вынужденно придется считаться с интересами и возможностями потребителей, координировать уровни тарифов на энергию и энергоресурсы с общими интересами и условиями развития экономики. Это позволит тем же энергоснабжающим организациям осуществлять постепенное наращивание собственного производства и поставки энергии и энергоресурсов и соответствующее увеличение своих доходов (за счет увеличения объемов реализации энергии, а не за счет роста тарифов).

Эти принципы относятся не только к энергокомплексу, а касаются и всех остальных отраслей материального производства и услуг, участвующих в общем процессе товарного производства.

В товарном производстве участвует материальная, энергетическая, сырьевая и другие составляющие, а также живой труд людей.

Из анализа составляющих затрат на производство различных видов товарной продукции следует, что материальные и энергетические затраты составляют основную часть их себестоимости.

Себестоимость, как известно, является основой при установлении рыночных цен и тарифов, которые, в свою очередь, определяют конкурентоспособность продукции и объемы ее реализации.

При значительно завышенных (по сравнению с себестоимостью) тарифах на энергию, энергоносители и материалы или установлении необоснованно большого уровня зарплаты, а также и закладываемой высокой норме прибыли продукция товарного производства становится неконкурентноспособной с вытекающими отсюда последствиями.

Далеко не к лучшему приводят также неконтролируемые и необоснованные завышения торговых надбавок и других расходов, закладываемых в тарифы и цены на конечные товары организациями и предприятиями, реализующими товарную продукцию.

Нескоординированная ценовая и тарифная политика приводит к ухудшению состояния экономики, и в том числе всех отраслей, включая и энергетику.

Это особо наглядно видно на примере экономики и энергетики Республики Молдова. Основные показатели энергетики по объемам производства электроэнергии, тепловой энергии и поставкам энергоносителей к настоящему времени снизились в 3-5 раз по сравнению с уровнем 1990 г.

Анализ состояния экономики и энергетики, в том числе, а также происходящих процессов на пути к рыночной экономике, показывает, что роль государства должна быть такой, чтобы с одной стороны не препятствовать развитию рыночной экономики (предусматривающей свободную конкуренцию, предпринимательство и др.), а с другой стороны она должна быть усилена в части координации и установлении предельных уровней цен и тарифов (на энергию, материалы, услуги и др. компоненты товарного производства), при которых возможно расширенное воспроизводство и соответствующее развитие экономики, а также рост благосостояния людей.

Ключевым моментом в разработке новой модели экономического развития и функционирования всех отраслей и предприятий, включая и предприятия

энергокомплекса, должно стать установление предельного уровня нормы прибыли (или рентабельности).

В товарном производстве это относится ко всем стадиям и промежуточным этапам, в том числе в энергетическом, топливном и материальном обеспечении. Для товарного производства энергия и энергоносители являются составляющими в себестоимости продукции, а для энергокомплекса товарной продукцией являются энергия и энергоносители.

При производстве и поставке энергии и энергоносителей также есть свои технологические этапы – поставка топлива, его переработка в электрическую и тепловую энергию, передача электроэнергии по высоковольтным линиям и распределение по распределительным сетям, а тепловой энергии - по тепловым сетям и распределительным пунктам. Указанный технологический процесс является единым и неразрывным, хотя в нем могут участвовать совершенно самостоятельные организации, различающиеся по своему статусу и формам собственности.

Совершенно очевидно, что участвующие в едином технологическом процессе производства, поставки и распределения электроэнергии и тепловой энергии энергопредприятия должны координировать свою деятельность, согласовывать цены и промежуточные тарифы с учетом общих интересов производителей энергии по конечным результатам. Не должно быть такого положения, чтобы в общей цепочке задействованных энергопредприятий одно предприятие (или организация) имело большую (порой необоснованную) величину прибыли, а другое было бы убыточным.

Для стабильной работы экономики и предприятий энергокомплекса необходима реализация единой экономической модели с верхним ограничением нормы прибыли.

Интегральным показателем уровня экономики является объем валового внутреннего продукта (ВВП). Анализ показателей экономики Республики Молдова свидетельствует о том, что в общем объеме ВВП прибыль в последние годы составляла на уровне 18-20 %.

В принципе, на эту величину должны быть ориентированы предельные значения нормы прибыли для всех предприятий экономического комплекса, в том числе и предприятий энергетики. Исключения могут иметь место. Однако они должны устанавливаться исходя из тех или иных общих интересов общества и государства.

Экономические механизмы регулирования со стороны государства должны, например, преследовать цель дальнейшего развития энергетики и реализации мероприятий по обеспечению требуемого уровня энергетической безопасности.

Неуправляемый рост тарифов на энергетические и материальные ресурсы и услуги отрицательно сказываются на развитии экономики и уровне социальной обеспеченности населения. Опыт прошлых лет показал, что нескоординированный рост тарифов на газ, тепловую энергию, воду и другие услуги приводил к крайне тяжелым последствиям.

Для обеспечения устойчивого развития экономики и достижения намеченных показателей в производственной и социальной сферах необходимо отслеживать верхний уровень цен и тарифов, допустимый исходя из заданных показателей роста макроэкономических показателей и уровней социальной обеспеченности населения в масштабах страны.

В энергетическом секторе задействованы многочисленные организации, предприятия и учреждения, обеспечивающие весь технологический процесс от получения и поставки первичных энергетических ресурсов их переработки, распределения и потребления.

В условиях Молдовы первичные топливные ресурсы в основном импортируются. Собственные топливные ресурсы, реально используемые в энергетике и в быту, составляют менее 10 % (включая и местные ресурсы и отходы промышленного и сельскохозяйственного производств.

Предприятия энергетического сектора, импортирующие первичные топливные ресурсы, практически лишены возможности влиять на внешние цены.

Однако внутренние цены в значительной мере зависят от них. Анализ официальных данных показывает, что на стадии реализации в отдельные периоды некоторые экономические агенты и предприятия самопроизвольно увеличивали цены на импортируемое топливо в 1,5-2 раза по сравнению с покупными ценами. Обеспечив себе временные выгоды эти организации ставили в крайне трудное экономическое положение другие предприятия, осуществляющие переработку топлива в электрическую и тепловую энергию. Необъективные и не скоординированные тарифы, привели к уменьшению объемов реализации электрической энергии, из-за несоответствия их величин с покупательной способностью потребителей, что в виде обратной связи отразилось на экономическом состоянии электростанций, высоковольтных сетей, и энергетического комплекса в целом.

Нерегулируемое в масштабах страны повышение цен и тарифов на топливо, энергию, транспортные и другие услуги, а также нескоординированность между предприятиями и организациями внутри отрасли в части установления своих составляющих в тарифе пагубно сказывается как на макроэкономических показателях государства, так и на экономическом состоянии самих предприятий. Именно этим объясняется в значительной мере спад экономики республики, а также банкротство и развал ряда энергетических предприятий и организаций.

В связи с изложенным, предлагается следующая схема взаимодействия энергетических и экономических агентов, предприятий и организации, а также руководящих структур государственного уровня в области совершенствования системы установления цен и тарифов на энергетические ресурсы, материалы и услуги.

1. Провести анализ и установить динамику изменения объема прибыли в структуре общего объема ВВП. В период предыдущих лет объем прибыли в общем объеме ВВП составлял 18-20 %.

2. Определить для отраслей экономики Республики Молдова верхний уровень нормы прибыли в процеентах. Естественно, что норма прибыли не должна быть выше, чем объем прибыли. Объем прибыли для предприятий и организаций не должен ограничиваться. Это будет стимулировать предприятия к наращиванию объемов реализации своей продукции.

3. Учитывая специфику энергетической отрасли, характеризующейся неразрывностью (единого) технологического процесса от получения топлива до реализации энергии и оказания услуг норма прибыли для всех структур, независимо от права собственности, должна устанавливаться единой и быть прозрачной по доступной для анализа отчетности.

Отключения в ту или иную сторону должны определяться, исходя из тактических и стратегических целей обеспечения ускоренного развития или модернизации отдельных подсистем и объектов энергетического комплекса, обеспечивающих получение дополнительной прибыли для всех участников энергетического сектора, (например, расширение работ в области возобновляемых источников энергии, доступных технически и выгодных экономически в условиях Республики Молдова, создание межсистемных

высоковольтных линий электропередач, развитие современных источников рассредоточенной когенерации электрической и тепловой энергии и др.).

4. Практическая реализация указанного механизма регулирования верхних (допустимых) уровней тарифов на топливно-энергетические ресурсы, энергию и услуги возможна при помощи новой экономической формации, созданной на базе существующих производственных предприятий и организаций, научных и проектных структур, государственных органов и подразделений, делегирующих своих полномочных участников, представляющих интересы данных организаций и учреждений.

5. Организующее начало данной работы могло бы осуществить Министерство Экономики Республики Молдова, а разработку экономической модели – подразделения Академии наук с участием представителей других заинтересованных организаций и ведомств.

Поступила в редакцию 16.01.2009

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ И ПРИ ПЕРЕДАЧЕ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ И ИРМ

Пацюк В.И.
Институт энергетики АН Молдовы
patsiuk@usm.md

Аннотация. Приведены замкнутые формулы для определения установившихся значений напряжений, токов, активной и реактивной мощности в линии с распределенными и сосредоточенными параметрами. Исследуется влияние шунтирующих реакторов и ИРМ в виде конденсаторных батарей на потери ХХ с различной волновой длиной. Для полуволновой линии найдены оптимальные параметры шунтирующих реакторов, которые позволяют повысить КПД при передаче при передаче натуральной мощности.
Ключевые слова: телеграфные уравнения, полуволновая и четвертьволновая линия, потери активной мощности, шунтирующие реакторы и источники реактивной мощности (ИРМ).

DIMINUAREA PIERDERILOR ÎN LINIILE DE TRANSPORT ALE ENERGIEI ELECTRICE DE CURENT ALTERNATIV LA MERS ÎN GOL ÎN PROCESUL DE TRANSMITERE A PUTERII NATURALE CU AJUTORUL REACTORILOR SHUNT ŞI A SURSELOR DE PUTERE REACTIVĂ

Pațiuc V.I.
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei
Rezumat. Sunt prezentate formule analitice închise pentru determinarea valorilor tensiunilor staționare, a intensităților şi a puterii active şi reactive într-un circuit de transmisie cu constante distribuite şi concentrate. Se studiază influența reactorilor shunt şi a surselor de putere reactivă de forma bateriilor condensatoare asupra pierderilor mers în gol cu lungimi de undă distincte. Pentru circuite cu lungimea de semiundă sunt determinați parametrii reactorilor shunt ce permit să se ridice randamentul în procesul de transmitere a puterii naturale.
Cuvinte-cheie: Ecuațiile telegrafiştilor, linie (circuite) cu lungimea de o doime şi o pătrime de undă, pierderile puterii active, reactori shunt şi surse de putere reactivă.

IDLING AND NATURAL POWER TRANSFER LOSS SAVING IN TRANSMISSION FACILITIES OF ALTERNATING CURRENT BY MEANS OF SHUNT REACTORS AND REACTIVE POWER SOURCES

Patsiuk V.I.
Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova
Abstract. The closed formulas for definition of the steady–state values of voltages, currents, active and reactive power in a line with the distributed and lumped constants are shown. The influence of the shunt reactors and reactive power sources in the form of capacitor banks on losses of idling with various wave lengths is investigated. For the half-wave transmissions line the optimal parameters (which allow increasing of the output during the natural-power transfer) of the shunt reactors were obtained.
Key words: the telegraph equations, half-wave and quarter-wave transmission line, watt loss, shunt reactors and reactive power sources

Введение

У энергетиков с давних времен существует самый настоящий культ борьбы с потерями, на это брошены мощные силы ученых, конструкторов, технологов. Победой считается снижение потерь даже на малые доли процента. Главными факторами, определяющими потери мощности при ее транспортировке переменным или постоянным током, являются активное продольное сопротивление $R(x,t)$ и поперечная проводимость изоляции $G(x,t)$. Однако в сильноточных электрических цепях помимо диссипации волн имеет место и их дисперсия. Именно это обстоятельство и можно использовать для перераспределения составляющих квазиустановившихся электромагнитных процессов: уменьшение мощности магнитного поля в пользу увеличения мощности электрического поля, вследствие чего удается достичь уменьшения потерь ХХ и при передаче натуральной мощности.

1. Установившийся режим однородной линии с сосредоточенными *LC* – цепочками

Рассмотрим включение в линию компенсирующих устройств (КУ) в виде шунтирующих реакторов и конденсаторных батарей (рис. 1.1). Поскольку рассматривается установившийся режим в электрической цепи синусоидального напряжения, то для решения телеграфных уравнений воспользуемся символическим методом [1].

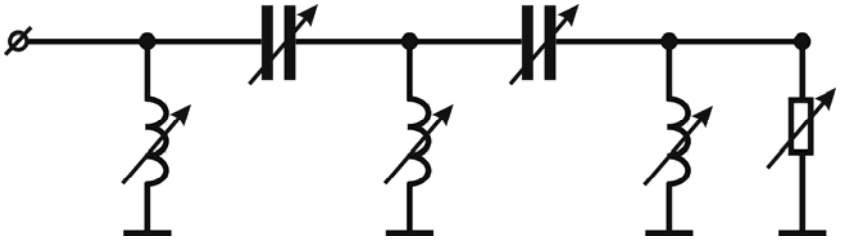


Рис. 1.1. Включение в линию шунтирующих реакторов и ИРМ.

Обозначим комплексные амплитуды напряжений и токов на входе-выходе электрической цепи U_0, I_0, U_N, I_N, а в точках включения сосредоточенных элементов:

$$U_k(x_k-0)=U_k^{(1)},\ U_k(x_k+0)=U_k^{(2)},\ I_k(x_k-0)=I_k^{(1)},\ I_k(x_k+0)=I_k^{(2)},\ k=\overline{1,N-1},$$

$$x_k=\sum_{i=1}^{k} l_i\ ,\ x_1=l_1,\ x_2=l_1+l_2,\ \ldots,\ x_N=l\ .$$

В случае однородной линии с параметрами *L*, *C*, *R*, *G* без включенных сосредоточенных элементов решение задачи на отрезке $x\in[0,l]$ имеет вид

$$U_0=Z_{BX}I_0,\ U_N=Z_S I_N,\ Z_S=R_S, \tag{1.1}$$

$$I_N=-\frac{U_0}{Z_0}\mathrm{sh}(\gamma l)+I_0\mathrm{ch}(\gamma l)=\frac{I_0}{Z_0}\left(Z_0\mathrm{ch}(\gamma l)-Z_{BX}\mathrm{sh}(\gamma l)\right)=$$

$$=\frac{I_0 Z_0}{Z_S\mathrm{sh}(\gamma l)+Z_0\mathrm{ch}(\gamma l)}=\frac{U_0}{Z_S\mathrm{ch}(\gamma l)+Z_0\mathrm{sh}(\gamma l)}, \tag{1.2}$$

$$Z_{BX}=Z_0\frac{Z_S\mathrm{ch}(\gamma l)+Z_0\mathrm{sh}(\gamma l)}{Z_S\mathrm{sh}(\gamma l)+Z_0\mathrm{ch}(\gamma l)}, \tag{1.3}$$

$$Z_0=\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}},\ \gamma=\sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}\ . \tag{1.4}$$

Здесь Z_{BX}, Z_0 – входное и волновое сопротивление линии, γ – постоянная распространения, Z_S – сопротивление нагрузки, $\omega = 2\pi f$, f – частота питающего генератора.

Решение для линии с (N-1) включенными сосредоточенными элементами получим следующим образом. Обозначим сопротивления последовательно включенных ИРМ через $Z_{n1}^{(k)}$, а сопротивления параллельно включенных шунтирующих реакторов через $Z_{n2}^{(k)}$. Тогда условия сопряжения в точках x_k для ИРМ имеют вид

$$U_k^{(1)} - U_k^{(2)} = Z_{n1}^{(k)} I_k^{(1)}, \quad I_k^{(1)} = I_k^{(2)}, \; Z_{n2}^{(k)} = \infty, k = 1,...,N-1 \tag{1.5}$$

и для шунтирующих реакторов

$$U_k^{(1)} = U_k^{(2)}, \quad U_k^{(2)} = Z_{n2}^{(k)}\left(I_k^{(1)} - I_k^{(2)}\right), \; Z_{n1}^{(k)} = 0, k = 1,...,N-1. \tag{1.6}$$

Для решения задачи с условиями сопряжения (1.5) и (1.6) введем понятия входного сопротивления $Z_{BX}^{(k)}$ для частей линии $x \in [x_k, l], k = \overline{1, N-1}$. Тогда комплексы напряжений и токов в точках $x = x_k + 0$ будут связаны соотношениями

$$U_k^{(2)} = Z_{BX}^{(k)} I_k^{(2)}, \tag{1.7}$$

$$Z_{BX}^{(k)} = Z_0 \frac{Z_n^{(k+1)}\mathrm{ch}(\gamma l_{k+1}) + Z_0 \mathrm{sh}(\gamma l_{k+1})}{Z_n^{(k+1)}\mathrm{sh}(\gamma l_{k+1}) + Z_0 \mathrm{ch}(\gamma l_{k+1})}, k = \overline{0, N-1}; Z_n^{(N)} = Z_S. \tag{1.8}$$

В точках $x = x_k - 0$ из (1.5) и(1.6) будем иметь

$$U_k^{(1)} = Z_n^{(k)} I_k^{(1)} \quad k = \overline{1, N-1}, \tag{1.9}$$

где $Z_n^{(k)} = Z_{n1}^{(k)} + Z_{BX}^{(k)}$ для ИРМ и $Z_n^{(k)} = \dfrac{Z_{n2}^{(k)} Z_{BX}^{(k)}}{Z_{n2}^{(k)} + Z_{BX}^{(k)}}$ для шунтирующих реакторов.

Значения токов и напряжений слева и справа от точек x_k и на концах линии связаны рекуррентными соотношениями

$$I_1^{(1)} = \frac{I_0 Z_0}{Z_0 \mathrm{ch}(\gamma l_1) + Z_n^{(1)} \mathrm{sh}(\gamma l_1)}, I_0 = U_0 / Z_{BX}^{(0)}, U_1^{(1)} = Z_n^{(1)} I_1^{(1)}, \tag{1.10}$$

$$U_k^{(2)} = \left(1 - \frac{Z_{n1}^{(k)}}{Z_n^{(k)}}\right) U_k^{(1)}, \; I_k^{(1)} = \left(1 + \frac{Z_{BX}^{(k)}}{Z_{n2}^{(k)}}\right) I_k^{(2)}, \quad k = \overline{1, N-1}, \tag{1.11}$$

$$I_k^{(1)} = \frac{I_{k-1}^{(2)} Z_0}{Z_0 \mathrm{ch}(\gamma l_k) + Z_n^{(k)} \mathrm{sh}(\gamma l_k)}, U_k^{(1)} = Z_n^{(k)} I_k^{(1)}, \quad k = \overline{2, N-1}, \tag{1.12}$$

$$I_N = \frac{I_{N-1}^{(2)} Z_0}{Z_0 \mathrm{ch}(\gamma l_N) + Z_S \mathrm{sh}(\gamma l_N)}, U_N = Z_S I_N . \qquad (1.13)$$

Объединяя формулы (1.10)-(1.13), получим выражение тока на выходе линии через начальное напряжение

$$I_N = \frac{I_0 Z_0^N}{\left[Z_0 \mathrm{ch}(\gamma l_N) + Z_S \mathrm{sh}(\gamma l_N)\right] \prod_{k=1}^{N-1} \left[\left(1 + \frac{Z_{BX}^{(k)}}{Z_{n2}^{(k)}} \right) \left(Z_0 \mathrm{ch}(\gamma l_k) + Z_n^{(k)} \mathrm{sh}(\gamma l_k) \right) \right]}, \qquad (1.14)$$

$$I_0 = \frac{U_0}{Z_{BX}^{(0)}}, \quad Z_{BX}^{(0)} = Z_0 \frac{Z_n^{(1)} \mathrm{ch}(\gamma l_1) + Z_0 \mathrm{sh}(\gamma l_1)}{Z_n^{(1)} \mathrm{sh}(\gamma l_1) + Z_0 \mathrm{ch}(\gamma l_1)} . \qquad (1.15)$$

Мощности генератора и нагрузки вычисляются по формулам

$$P_0 = \frac{1}{2} \mathrm{Re}\left(U_0^* I_0 \right) = \frac{1}{2} \mathrm{Re}\left(U_0 I_0^* \right) = \frac{U_0^2}{2} \mathrm{Re}\left(\frac{1}{Z_{BX}^{(0)}} \right),$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \mathrm{Re}\left(U_N^* I_N \right) = \frac{1}{2} \mathrm{Re}\left(U_N I_N^* \right) = \frac{\left| I_N \right|^2 \mathrm{Re}(Z_S)}{2} = \frac{R_S \left| I_N \right|^2}{2} . \qquad (1.16)$$

Полученные соотношения (1.6)–(1.16) позволяют провести параметрический анализ влияния включения сосредоточенных элементов на распределение напряжений и токов, а также потерь мощности вдоль всей линии

$$\Pi = \frac{P_0 - P_1}{P_H}, \; P_H = \frac{U_0^2}{2 Z_B} .$$

2. Результаты численных экспериментов по минимизации потерь

Рассмотрим однородную без дополнительных присоединений линию с безразмерными параметрами: $C = L = 2P_н = 1$; $R = 0.48$; $G = R/7$ и замкнутую на нагрузку с комплексным сопротивлением Z_S. Построим вначале функциональные зависимости активной и реактивной мощности источника (генератора) от длины разомкнутой линии без потерь $R = G = 0$ (*a*) и с потерями $R = 7G = 0.48$ (*b*). Из графиков, представленных на рис. 2.1 видно, что в окрестности четвертьволновой линии активные потери при отключенной нагрузке ($Z_S = \infty$) достигают максимальных значений, тогда как для полуволновой линии они относительно невелики и составляют 13.58%, если соотносить их с натуральной мощностью $P_н = 0.5$. При работе линии на согласованную нагрузку: $Z_S = Z_0 = 1.0009 - j0.0327$ потери активной мощности равны 24.75%, а когда нагрузка чисто активная: $Z_S = Z_B = 1$ эти потери несколько меньше и составляют 24.65%. Однако, исходя из того, что потери на холостом ходу должны быть как минимум в два раза меньше, чем при передаче натуральной мощности [2-4],

поставим задачу их минимизации с помощью включения в линию компенсирующих устройств в виде ШР или ИРМ.

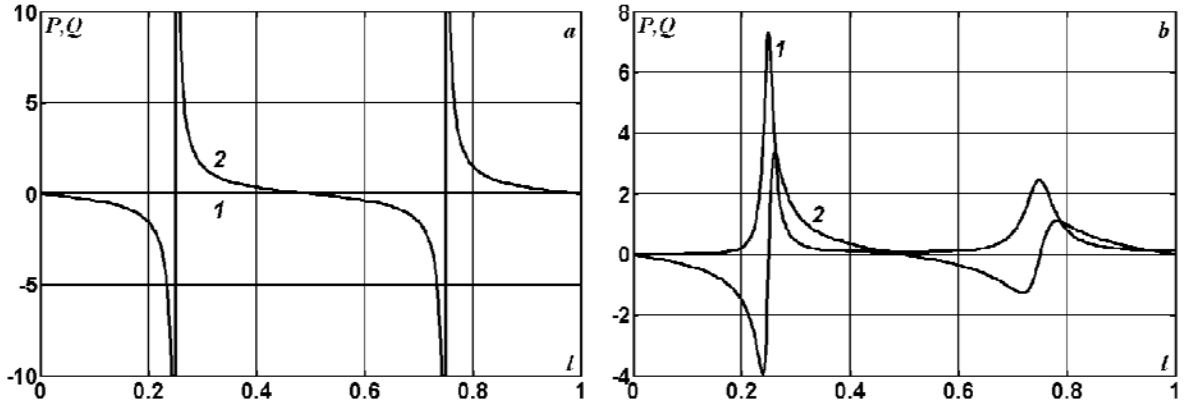


Рис. 2.1. Зависимость активной и реактивной мощности генератора (кривые 1;2) от длины разомкнутой линии при $R = G = 0$ (*a*); $R = 7G = 0.48$ (*b*).

Параллельное подключение к полуволновой линии идеальных ШР позволяет снизить потери ХХ до 2.28%, если индуктивности L_n и их месторасположение выбрать так, как это приведено в таблице 2.1, тогда как последовательное включение в линию конденсаторных батарей с емкостями C_n не дает ощутимого результата. Для линий с волновой длиной 1/4 и 1/8 включение всего двух реакторов приводит к снижению потерь до 1.97% и 0.89% соответственно. Напомним, что безразмерному значению L_n = 1 соответствует L_n = 5.56 Гн, для которого мощность реактора $Q_n = \dfrac{U_0^2}{2\omega L_n} =$ 330.5 МВАр при фазном напряжении $U_0 = 525\sqrt{2/3} = 428.66$ кВ.

Все эти результаты убедительно указывают на очевидные преимущества ШР по сравнению с ИРМ в свете решения задачи уменьшения потерь ХХ и подтверждают выводы, изложенные в работах Г. Н. Александрова [1-3].

В ряде работ [5-7] тем не менее указывается и на ряд нежелательных последствий эксплуатации ВЛ 500…1150 кВ, оснащенных ШР, при нештатных (несимметричных, неполнофазных) режимах. Использование ШР заметно усложняет процессы при коммутациях воздушных линий и способно приводить к резонансным явлениям, обусловленным наличием емкости у линии и индуктивности у реактора. Отсюда появляется потребность в расчете переходных процессов, вызванных кратковременным неполнофазным включением (отключением) ВЛ ВН, чему мы намерены уделить самое пристальное внимание используя точную постановку начально-краевой задачи для телеграфных уравнений. Следует также провести тщательные сравнительные исследования эффективности и управляемости ШР различного конструктивного исполнения: управляемых с помощью подмагничивания магнитопроводов ШР (УШР) и компенсатора трансформаторного типа (УШКТ). Такие исследования позволили бы определить преимущественные ниши использования этих реакторов в воздушных электропередачах высокого напряжения различного назначения и конструктивного исполнения [5-7].

Для большей наглядности представим некоторые из полученных результатов по определению оптимальной мощности и месторасположения ШР в графическом виде. На рис. 2.2. показано распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2)

и реактивной (3;4) мощности (*a*), модулей напряжений (1;2) и токов (кривые 3;4) (*b*) при $R = 7G = 0.48$ для пяти ШР, обеспечивающих минимальное значение потерь ХХ. Кривые 1,3 здесь и в дальнейшем соответствуют однородной линии без дополнительных сосредоточенных элементов.

Физический смысл происходящего на качественном уровне достаточно очевиден. В линии с включенными реакторами происходит выравнивание напряжений вдоль линии и одновременное снижение значений модуля тока, за счет чего и происходит уменьшение мощности магнитного и увеличение мощности электрического поля всей линии. Напомним, что суммарные потери в проводах определяются двумя компонентами: активные (омические) потери Ri^2 и потери, обусловленные утечкой тока через несовершенную изоляцию Gu^2. Поскольку $R > G$, то перераспределение составляющих электромагнитного поля и позволяет добиться минимизации общих потерь. Для неискажающей линии этого эффекта уже нельзя достичь, поскольку для них в безразмерном виде имеем $R = G$. Этот пример сравнительного анализа результатов расчета является хорошей иллюстрацией тех явных преимуществ, которые дает переход к безразмерным переменным [8].

Таблица 2.1. Потери ХХ в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов или ИРМ, включенных в полуволновую линию.

Кол-во КУ	x_k	L_n	$P_0/P_н$, %	x_k	C_n	$P_0/P_н$, %
1	0.25	∞	13.58	0.25	∞	13.58
1	0.22638	0.00245	6.74	0.46029	0.11817	13.53
2	0.15533 0.36912	0.09390 0.04890	4.27	0.45535 0.47161	0.24704 0.15124	13.53
3	0.11292 0.24922 0.41186	0.15969 0.12447 0.10067	3.40	0.00000 0.00000 0.49621	0.57724 0.61198 0.96338	13.43
4	0.08841 0.18948 0.30489 0.43314	0.21997 0.18807 0.16192 0.14649	3.00	0.00000 0.00115 0.48868 0.50000	0.56071 0.67903 0.93410 0.48271	13.49
5	0.07706 0.16118 0.24786 0.34926 0.45146	0.25316 0.25289 0.22467 0.18798 0.21637	2.28	0.00000 0.00001 0.00001 0.00021 0.00052	1.08447 0.45487 1.49851 0.91257 0.39859	13.11

Таблица 2.2. Потери ХХ в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов или ИРМ, включенных в четвертьволновую линию.

Кол-во КУ	x_k	L_n	$P_0/P_н$, %	x_k	C_n	$P_0/P_н$, %
1	0.125	∞	1458.9	0.125	∞	1458.9
1	0.16217	0.10119	2.87	0.00000	0.48387	60.20
2	0.09568 0.19773	0.20777 0.19691	1.97	0.00000 0.00000	1.51370 0.94687	85.52
3	0.06786 0.13912	0.30754 0.29372	1.75	0.03246 0.03246	1.60984 0.00253	0.26

	0.21276	0.28677		0.07716	0.01658	
4	0.05314 0.11014 0.16520 0.22073	0.38617 0.37512 0.41541 0.36984	1.67	0.00000 0.00650 0.00650 0.01499	0.42379 0.02427 0.17994 0.32825	0.13
5	0.04413 0.08972 0.13610 0.18218 0.22719	0.47755 0.48316 0.45735 0.49357 0.47919	1.62	0.00129 0.00129 0.00159 0.01429 0.14792	0.24725 0.16917 0.43684 0.12460 0.01353	0.29

Таблица 2.3. Потери ХХ в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов или ИРМ, включенных в линию с волновой длиной 1/8.

Кол-во КУ	x_k	L_n	$P_0/P_н$, %	x_k	C_n	$P_0/P_н$, %
1	0.06	∞	3.58	0.25	∞	3.58
1	0.08293	0.25119	1.01	0.00000	0.63404	2.29
2	0.04953 0.09976	0.43598 0.43173	0.89	0.00000 0.00000	0.37061 0.41082	1.09
3	0.03527 0.07101 0.10698	0.61837 0.61225 0.60959	0.86	0.00000 0.00000 0.00000	0.33919 0.23981 0.34709	0.53
4	0.02792 0.05573 0.08342 0.11119	0.78128 0.80428 0.78987 0.79797	0.85	0.00431 0.00431 0.00438 0.00459	0.11847 0.19833 0.19509 0.16596	0.18
5	0.02235 0.04433 0.06712 0.09034 0.11338	1.00494 1.00472 0.93802 0.96340 0.95189	0.84	0.00007 0.00008 0.00017 0.00017 0.02523	0.15397 0.12380 0.15445 0.14623 0.17232	0.09

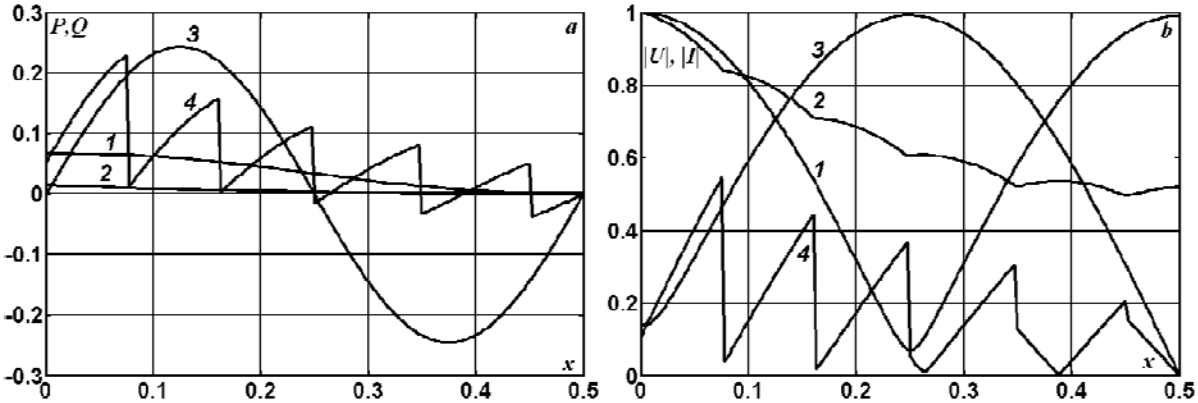


Рис. 2.2. Распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3;4) мощности (***a***), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (***b***) при $R = 7G = 0.48$ и включении пяти шунтирующих реакторов.

Считается, что полуволновая линия обладает таким замечательным свойством как сбалансированность по реактивной мощности, вследствие чего для ее работы отпадает необходимость в установке дополнительных компенсирующих устройств [9-12] . Посмотрим, так ли это на самом деле и можно ли увеличить одновременно и передаваемую мощность и КПД с помощью шунтирующих реакторов, подобрав их мощности и месторасположение оптимальным образом

По вполне понятным причинам задача поиска оптимальных параметров КУ с целью уменьшения потерь в проводах при передаче натуральной мощности является намного сложнее. Здесь и в дальнейшем будем рассматривать полуволновую линию с потерями и замкнутую на чисто активную нагрузку $Z_S = Z_B = 1$, поскольку, как уже отмечалось ранее в этом случае КПД хоть и не на много, но выше, чем в режиме бегущих волн при передаче энергии прямой волной в согласованную нагрузку: $Z_S = Z_0 = 1.0009 - j0.0327$. Целенаправленный поиск будем осуществлять по методу конфигураций в пространстве переменных x_k, L_n не накладывая пока никаких ограничений на месторасположение реакторов или на максимальные напряжения вдоль всей линии, поскольку интересно посмотреть к каким результатам это может привести.

Включение в полуволновую линию 3…4 реакторов позволяет уменьшить активные потери более чем на 3%, если при этом не накладывать ограничений на перепады напряжения вдоль линии (таблица 2.4). Дальнейшее увеличение числа КУ не способствует увеличению КПД.

На рис. 2.3 дано распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3;4) мощности (*a*), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (*b*) при включении четырех шунтирующих реакторов, последний из которых оказывается «прижатым» к приемнику. Как видим из представленных результатов, уменьшение потерь сопровождается, к сожалению, увеличением реактивной мощности во всей линии и в частности, на ее отправном конце. Здесь генератор начинает потреблять реактивную мощность (см. кривую 4), что всегда крайне нежелательно, поскольку приводит к его ускоренному износу.

Ситуация чудесным образом меняется в благоприятную сторону, если ограничить величиной 1.05 максимум модуля напряжения в электрической цепи (таблица 2.5, рис. 2.4). С учетом 5% -го ограничения на превышение напряжения в линии эффект от включения шунтирующих реакторов снижается до 1.8%, но зато первый реактор «прижавшись» к источнику напряжения заставляет генератор уже не потреблять, а отдавать реактивную мощность в линию (Q = 0.04 при $x = 0$). Полученный при этом выигрыш в КПД все равно получается достаточно весомым.

Если предположить, что изоляция полуволновой линии идеальна: $G = 0$, то в такой линии с более сильной дисперсией волн эффект усиливается до 2 % по сравнению с однородной линией (таблица 2.6). Для нагруженной неискажающей линии ($R = G$), где имеет место только диссипация волн, уменьшить потери также невозможно, как и в режиме ХХ.

Таблица 2.4. Максимальные значения передаваемой мощности и КПД в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов.

Кол-во КУ	x_k	L_n	P_1	η, %
1	0.25	∞	0.38000	76.033
1	0.27921	0.35344	0.38618	77.237
2	0.23540	0.28354	0.39166	78.331

	0.43754	0.42204		
3	0.19028 0.32904 0.50000	0.36976 0.34469 0.36019	0.39568	79.136
4	0.17687 0.28016 0.33871 0.49976	0.48660 0.84034 0.49917 0.43407	0.39594	79.188

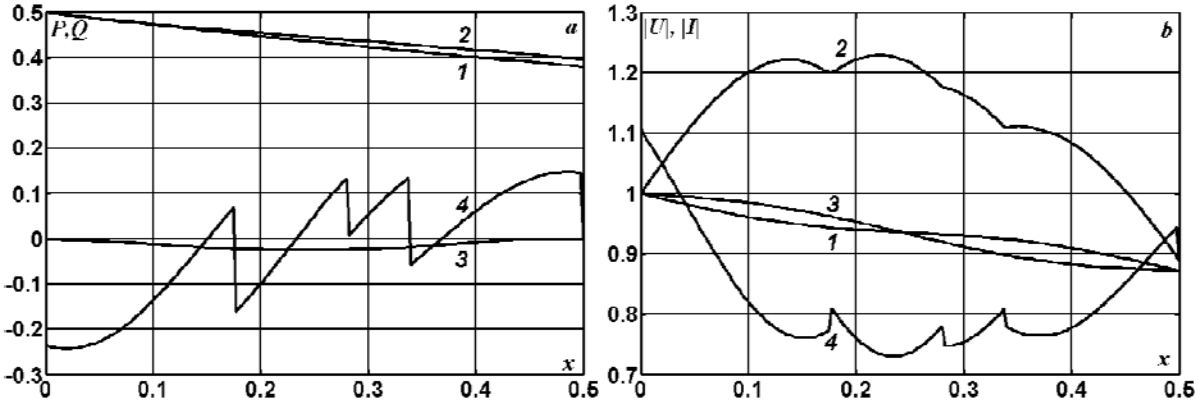


Рис. 2.3. Распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3:4) мощности (*a*), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (*b*) при включении четырех шунтирующих реакторов.

Таблица 2.5. Максимальные значения передаваемой мощности и КПД в зависимости от месторасположения и значений индуктивности четырех шунтирующих реакторов при соблюдении ограничения: $\max\limits_{x\in[0,l]}|U(x)| \le 1.05$.

Кол-во КУ	x_k	L_n	P_1	η, %
1	0.25	∞	0.38000	76.033
4	0.00153 0.16895 0.29023 0.47255	0.61539 0.82961 0.71337 0.78460	0.38912	77.824

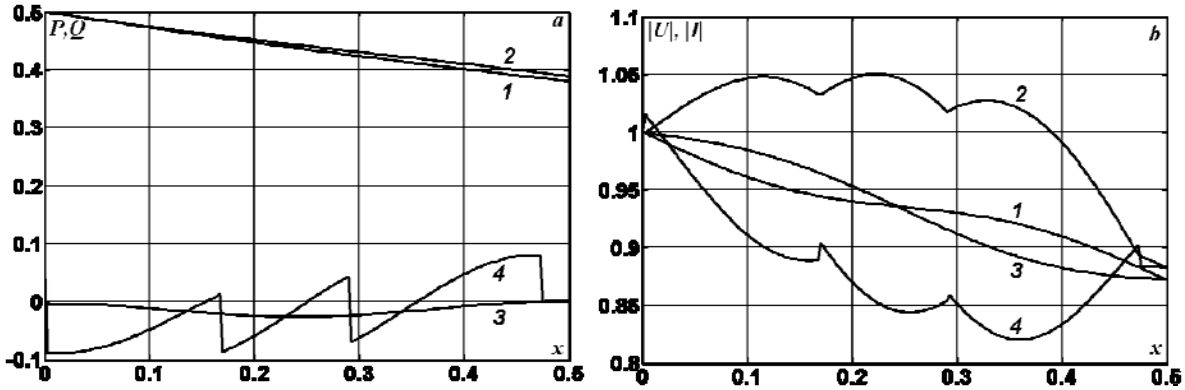


Рис. 2.4. Распределение вдоль линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3,4) мощности (*a*), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (*b*) при включении четырех шунтирующих реакторов и соблюдении ограничения: $\max\limits_{x\in[0,l]}|U(x)| \le 1.05$.

Таблица 2.6. Максимальные значения передаваемой мощности и КПД в зависимости от месторасположения и значений индуктивности четырех шунтирующих реакторов для полуволновой линии с идеальной изоляцией (G = 0) при соблюдении ограничения: $\max\limits_{x\in[0,l]}|U(x)| \le 1.05$.

Кол-во КУ	x_k	L_n	P_1	η, %
1	0.25	∞	0.39326	78.690
4	0.00003 0.15256 0.28372 0.46822	0.92998 0.82858 0.84911 0.73522	0.40340	80.680

Заключение

1. Выведены расчетные соотношения для определения напряжений, токов, активной и реактивной мощности в установившемся режиме цепи переменного напряжения с распределенными и сосредоточенными параметрами. Включение шунтирующих реакторов и ИРМ в виде конденсаторных батарей позволяет снизить потери ХХ в несколько раз для линий с различной волновой длиной.
2. При передаче натуральной мощности по полуволновой линии КПД удается увеличить более чем на 3% при отсутствии ограничений на превышение напряжений и на 1.8%, если таковые ограничить предельным значением в 1.05. Подключение КУ к неискажающей линии не приводит к уменьшению потерь в ней.

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

Литература

1. *Круг К.*А. Основы электротехники. – Л.: ОНТИ, 1936. –888с.
2. Александров Г.Н. Ограничение перенапряжений в электрических сетях. – С.-Петербург: Центр подготовки кадров энергетики. Типография «Светоч», 2003. – 192с.
3. Александров Г. Н. Передача электрической энергии. – С.-П.: Изд-во Политехнического университета, 2007. – 412с.
4. Александров Г.Н., Ле Тхань Бак. Уменьшение потерь мощности в дальних линиях электропередачи с управляемыми реакторами. – Электричество, 2007, №3, с. 8-15.
5. Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И. и др. Волновые явления в неоднородных структурах. Т.5. Теория и методы расчета электрических цепей, электромагнитных полей и защитных оболочек АЭС. – Кишинев: Типография АНМ, 2008. – 664 с.
6. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2004.

7. Евдокунин Г.А., Дмитриев М., Гольдштейн С. и др. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели. – Новости Электротехники, 2008, № 4 (52).
8. Кадомская **К.** Высоковольтные ВЛ. Эффективность и управляемость шунтирующих реакторов. – Новости Электротехники, 2008, № 4(52).
9. Бушуев В.В., Путилова А.Т., Самородов Г.И. Сверхдальние электропередачи. – Известия Академии наук РФ. Энергетика, 1994, № 2, с. 12 – 17.
10. Вершков В.А., Нахапетян К.Т., Ольшевский О.В. и др. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ Европейской части СССР. – Электричество, 1968, № 8, с. 10–16.
11. Дикой В.П., Зильберман С.М., Кучеров Ю.Н. и др. Организация полуволновой связи «Сибирь-Урал» на современном этапе. – Новое в российской электроэнергетике, 2002, № 12, с. 5-15.
12. Справочник по проектированию линий электропередачи. Под ред. М.А. Реута и С.С. Рокотяна. – М.: Энергия , 1980. – 296 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЮЖНОГО РЕГИОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 110 КВ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ВЛ – 400 КВ МГРЭС – ВУЛКАНЕШТЫ

В.М. Постолатий, Е.В. Быкова
Институт энергетики АНМ

Аннотация: Рассмотрены режимы энергосистемы Молдовы при выделении из ее схемы на самостоятельную работу ВЛ-400 кВ Молдавская ГРЭС – Вулканешты для планируемого экспорта электроэнергии частью выделенных энергоблоков Молдавской ГРЭС в энергосистему Румынии.
Ключевые слова: энергосистема, автотрансформатор, генерирующие источники, уровни напряжения.

Cercetarea regimurilor Sectorului de Sud al reţelelor electrice 110 kv la deconectarea LEA-400 kv CTE – Moldovenească – Vulcăneşti

V. M. Postolati, E. V. Bicova
Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat: Au fost cercetate regimurile de funcţionare al sistemului energetic a Moldovei pentru cazul funcţionării în regim independent al LEA – 400 kV „ CTE – Moldovenească – Vulcăneşti ” pentru asigurarea exportului de energie electrică de o parte din blocurile CTE Moldovenească spre sistemul energetic al României.
Cuvinte cheie: sistemul energetic, autotransformator, surse de generare, nivel de tensiune.

Investigation of power regimes of Southern Eectrical Networks of 110 kV in case of disconnecting of the high voltage electric transmission line of 400 kV of Moldavian condenced power plant (MCPP) – Vulcaneshty

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

Abstract: In the research paper it was studied regimes of functioning for the Moldavian Power Systems for situation of independent working of High Voltage Electric Transmission Line of 400 kV „ Moldavian Condenced Power Plant (MCPP) – Vulcaneshty”. Separated unit of MCPP will supply electricity to Power System of Romania.
Keywords: energy system, autotransformer, energy generation sources, level of voltages.

Введение.

Настоящая работа выполнена в связи с постановкой задачи передачи мощности по ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты – Исакча с выделением части энергоблоков Молдавской ГРЭС, работающих на шины 400 кВ, на автономную работу с энергосистемой Румынии,

Выделенные энергоблоки на МГРЭС в данном случае будут работать синхронно с энергосистемой Румынии, остальные энергоблоки МГРЭС останутся работающими параллельно и синхронно с энергосистемой Молдовы и Украины.

Сложность состоит в том, что на транзитной подстанции «Вулканешты» через имеющиеся два автотрансформатора 400/110/35 кВ питается часть нагрузки Юга Республики Молдова, а также Украины.

От шин 110 кВ подстанции Вулканешты 400/110/35 отходит 10 ВЛ-110 кВ (рис. 1), по которым осуществляется электроснабжение по сети 110 кВ потребителей Юга Молдовы, а также части южного региона Украины. По этим же ВЛ-110 кВ через сеть 110 кВ обеспечивается синхронная связь подстанции 400/110 кВ с энергосистемами Молдовы (рис.2) и Украины.

Так как энергосистемы Молдовы и Украины не имеют синхронной связи с энергосистемой Румынии, то для осуществления транзита мощности части выделенных энергоблоков МГРЭС необходимым является условие отключения автотрансформаторов 400/110/35 кВ на подстанции Вулканешты.

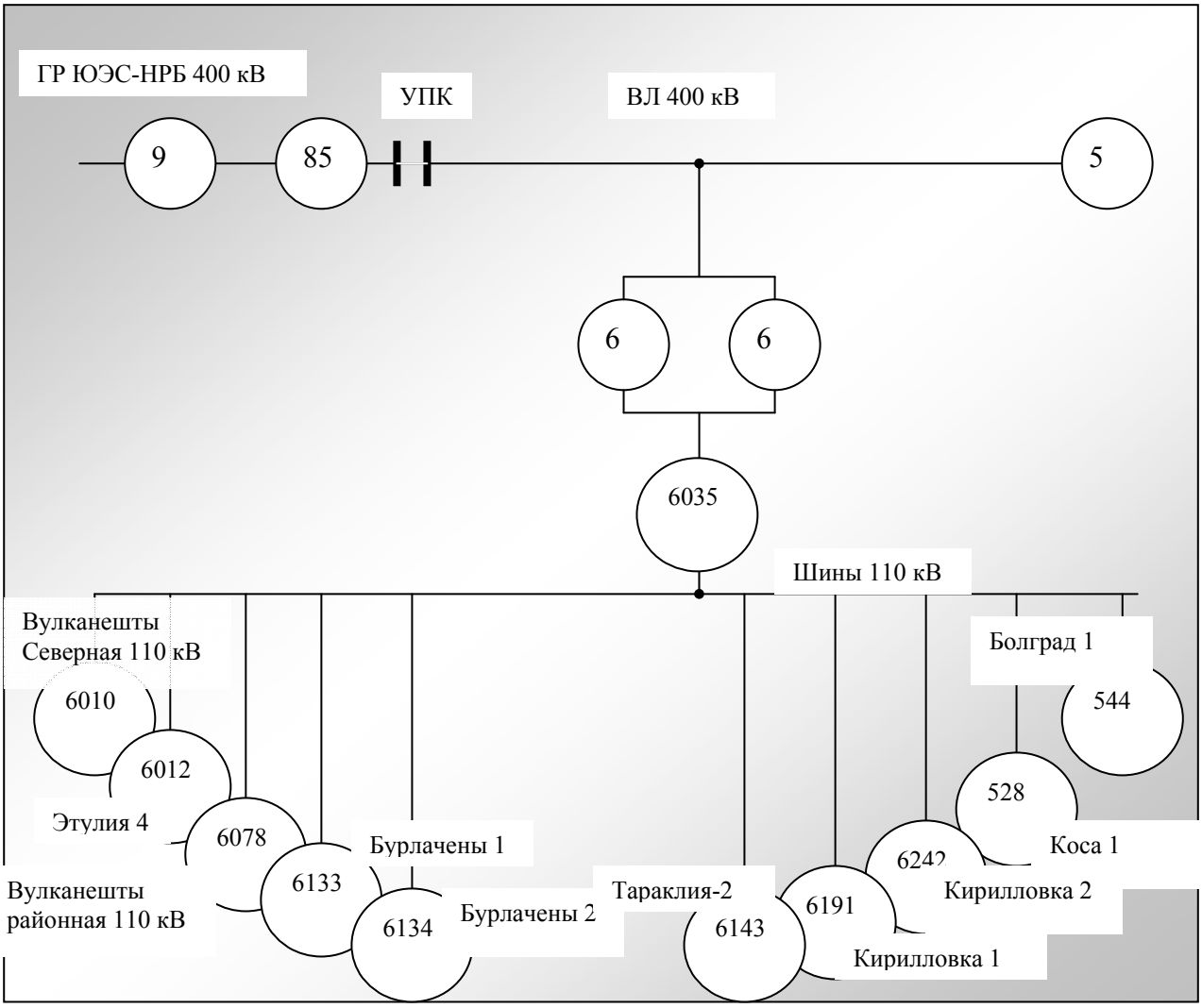


Рис.1. Общая конфигурация присоединений 400, 110 кВ и номера узлов в расчетной схеме подстанции Вулканешты

Для того, чтобы не нарушить режим электроснабжения по ВЛ-110 кВ, отходящих от подстанции 110 кВ Вулканешты, необходимого решение вопроса о поддержании на шинах 110 кВ подстанции Вулканешты необходимого уровня напряжения и соответствующего баланса мощности.

Задача состоит в поиске приемлемого варианта, обеспечивающего указанные требования.

Рассматривается несколько путей решения данной задачи. В качестве возможных основными рассмотрены два варианта:

- строительство новой ВЛ-330 кВ Кишинев – Вулканешты с установкой на подстанции Вулканешты двух автотрансформаторов 330/110 кВ;

- сооружение малых электростанций, присоединенных к шинам 110 кВ подстанции Вулканешты по ВЛ-110 кВ и расположенных вблизи Вулканешт или же в любых других пунктах, находящихся на относительно небольших расстояниях от подстанции Вулканешты.

Основным является требование: изменение схемы и транзит мощности от МГРЭС по ВЛ-400 кВ не должны привести к ухудшению условий электроснабжения потребителей Юга Молдовы и Украины.

Методически работа построена следующим образом.

- Выполнен расчет нормального режима исходной схемы и проведен анализ параметров режима, в т.ч. уровней напряжений в сети 110 кВ Юга Молдовы.

- Для варианта отключения автотрансформаторов 400/110/35 на подстанции Вулканешты и сохранения прежних условий качества электроснабжения и параметров режима сети 110 кВ, связанной с шинами 110 кВ подстанции «Вулканешты», рассмотрен вариант строительства новой ВЛ класса 330 кВ от подстанции 330 «Кишинев» до подстанции 400 кВ «Вулканешты» с установкой автотрансформатора 330/110/35 кВ;

- В качестве другого альтернативного варианта рассмотрено строительства малых электростанций ряде населенных пунктов региона Юга Молдовы, связанных по существующих ВЛ-110 кВ с подстанцией 110 кВ «Вулканешты», которые могли бы обеспечить необходимые режимные требования узла 110 кВ «Вулканешты».

Выполнен анализ результатов и сформулированы рекомендации.

1. Анализ режима исходной схемы электроэнергетической системы Молдовы.

1.1. Общая характеристика исходной схемы энергосистемы Молдовы и данных для расчета режимов.

Энергосистема Молдовы в настоящее время работает параллельно и синхронно с энергосистемами Украины и других стран СНГ. В расчетах режимов объединенной энергосистемы энергосистема Молдовы учитывается в виде высоковольтных линий электропередачи напряжением 400, 330 и 110 кВ, подстанций и генерирующих источников. Ранее энергосистема работала параллельно и синхронно в составе объединенной энергосистемы с энергосистемами Болгарии и Румынии. В настоящее время существуют три ВЛ-110 кВ, которые связывают энергосистему Молдовы с энергосистемой Румынии, однако при отсутствии синхронной связи эти линии могут работать только в режиме питания островов нагрузок. В рабочем состоянии находится и ВЛ-400 кВ Молдавская ГРЭС – Вулканешты – Исакча – Добруджа. УПК на подстанции 400 кВ Вулканешты демонстрировано. На подстанции 400 кВ «Вулканешты» установлены два автотрансформатора. Их тип и параметры указаны в таблице 1.1. Остальные данные приведены в [1].

Таблица 1.1. ***Характеристики автотрансформаторов 400/110/35 кВ на подстанции Вулканешты***

Обозначение	Тип	Мощность, МВА	Напряжение, кВ
1АТ	АТДЦТН-250/400/110	250	400/121±4×2,5/38,5±8×1,33
2АТ	АТДЦТН-250/400/110	250	400/121±11 %/38,5

В качестве исходных данных для расчета нормального режима энергосистемы приняты: Суммарная нагрузка в энергосистеме Молдовы в зимний максимум: активная – 1013 МВт; реактивная – 448,6 МВАр. Суммарная генерация в Молдавской энергосистеме: активной мощности – 800,6 МВт; реактивной мощности – 381,8 МВАр.

Расчетные мощности источников Молдавской энергосистемы приведены в таблице 1.2 (для летнего режима указаны в скобках).

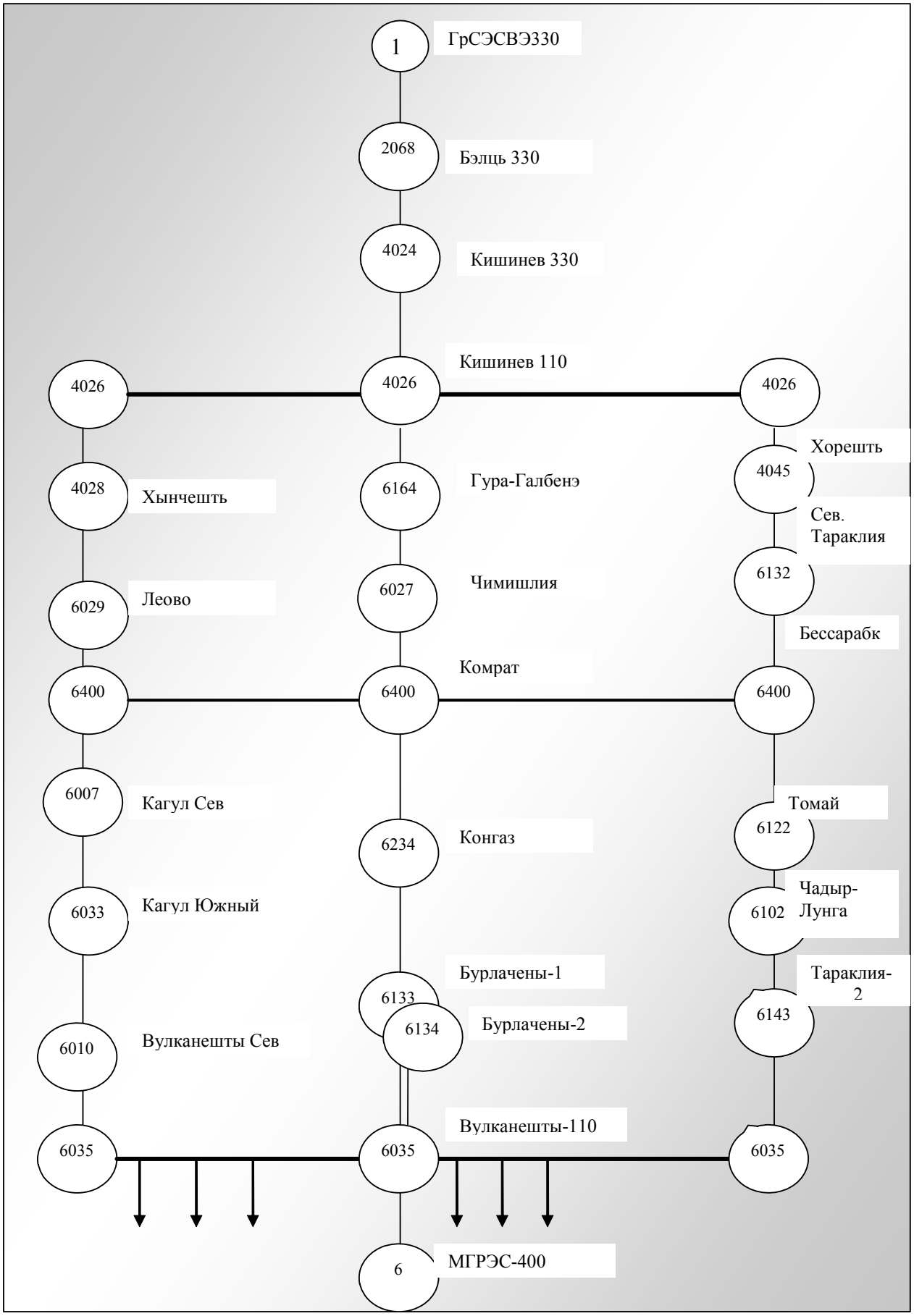


Рис. 2. Схема узлов, связанных с подстанцией Вулканешты-110

Расчетные мощности генерирующих источников Молдавской энергосистемы

Таблица 1.2.

№ узла	Наименование	Рген, МВт	Qген, МВАр
2	МГРЭС 110	140	60
4	МГРЭС 330	191	124
140	Ст.35 – 3АТ	28	14
151	Бл. 11	205	105
1077	Бр. с/з	3,6	2,9
2067	БТЭЦ	17,0 (0)	1,9 (0)
2099	КоГЭС	15,0	2,5
3084	ДГЭС	28,0 (46)	6 (10)
5042	КТЭЦ 1	37 (8)	5,5 (4)
5130	КТЭЦ-2	136 (80)	60 (60)
	Итого	800,6 (716,6)	381,8 (382,4)
	в т.ч. МГРЭС	564 (564)	303 (303)

Расчетные данные по генерирующим источникам Украинской энергосистемы и эквивалента объединенной энергосистемы, а также данные по линиям и подстанциям приведены непосредственно в исходных параметрах расчетной схемы.

1.2. Результаты расчета параметров исходного установившегося режима энергосистемы

Расчеты выполнены с помощью программы “RASTR”. Перечень контролируемых узлов приведен в таблице 1.3., а перечень контролируемых ветвей - в таблице 1.4.

Таблица 1.3. ***Номера и названия контролируемых узлов***

№ узла	Наименование узлов	Класс напряжения, кВ
1	ГрСЭСВЭ 330	330
4110	Стр. 330	330
4024	Киш 330	330
5	МГРЭС 400	400
6	Вул 400	400
6035	Вул 110	110
6010	Вул Сев	110
6143	Тараклия-2	110
2068	Бэлц 330	330
4	МГРЭС 330	330

Таблица 1.4. ***Контролируемые ветви***

Номера узлов		Наименование ветвей	Класс напряжения, кВ
Начало	Конец		
1	2068	ГрСЭСВЭ 330 – Бэлц 330	330
5	6	МГРЭС 400 – Вул 400	400
6	6035	Вул 400 – Вул 110	
6035	6010	Вул 110 – Вул. Сев.	110
6035	6143	Вул 110 – Тараклия 2	110

Анализ результатов расчета исходного нормального режима показывает, что по уровням напряжения во всех узлах рассчитываемый системы режимные требования

выполняются. Для контролируемых узлов и ветвей данные приведены в таблицах 1.3.1. и 1.3.2.

Следующим этапом расчета является отключение автотрансформаторов 400/110/35 кВ на подстанции Вулканешты и анализ происшедших при этом изменений параметров режима.

Таблица 1.3.1. Уровни напряжения в контролируемых узлах в исходном нормальном установившемся режиме (файл norm-r-к. rge)

№ узла	Наименование узла	Напряжение в узлах			Примечание
		Uном, кВ	Uрас, кВ	dU, %	
1	ГрСЭСВЭ 330	321,0	330,2	2,85	
4	МГРЭС 330	340,0	331,4	-2,52	
5	МГРЭС 400	404,0	395,4	-2,13	
6	Вул 400	404,0	395,0	-2,23	
7	ОтпХБК 330-1	337,0	329,3	-2,29	
8	ОтпХБК 330-2	337,0	329,4	-2,27	
2068	Бэлц 330	315,0	324,0	2,87	
4024	Киш. 330	328,0	325,6	-0,72	
6010	Вул. Сев.	117,0	125,0	6,85	
6035	Вул. 110	122,0	125,6	2,92	
6143	Тараклия 2	120,0	124,7	3,88	

Таблица 1.3.2. Перетоки мощности в контролируемых ветвях в исходном нормальном установившемся режиме (файл NORM-R-К. rge)

Номера узлов		Наименование ветвей	Напряжение узла, кВ		Величина перетока мощности МВт, МВАр
начало	конец		начало	конец	
1	2068	ГрСЭСВЭ 330 – Бэлц 330	330,16	324,05	-165-j36,9
5	6	МГРЭС 400 – Вул. 400	395,4	394,4	-150,83+j51,55
6	6035	Вул. 400 – Вул. 110	394,99	125,57	-81,37-j19,39; -81,03-j15,52
6035	6010	Вул. 110 – Вул. Сев.	125,57	125,02	-20,54-j2,98
6035	6143	Вул. 110 – Тараклия	125,57	124,66	-16,56-j2,24
7	4024	Отп ХБК 330-1 – Киш 330	329,2	325,6	-108,73-j15,64
8	4024	ОтпХБК 330-2 – Киш 330	329,37	325,6	-110,33-j25,03

2. Режим энергосистемы Молдовы при отключении ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты и автотрансформаторов 400/110/35 кВ на подстанции Вулканешты.

2.1. Изменения в схеме.

В поставленной задаче предусматривается выделение части энергоблоков МГРЭС для работы на ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты – Исакча в автономном от Молдавской и Украинской энергосистем режиме. При этом также предусматривается отключение двух автотрансформаторов 1АТ и 2АТ 400/110/35 кВ на подстанции 400 кВ «Вулканешты».

Для подготовки расчетной схемы энергосистемы для указанного режима необходимо выполнить следующие изменения в рассмотренной выше (рис. 1) исходной схеме энергосистемы:

- отключить ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты (узлы 5-6);
- отключить 1АТ и 2АТ на подстанции Вулканешты (ветви 6-6035 и 6-6035).

В остальном схема остается без изменений. Не изменяются также заданные величины нагрузок энергосистемы и мощности генерирующих источников.

Измененный вариант схемы энергосистемы обозначен: NORM-R-1.

2.2. Расчет и анализ параметров установившегося режима энергосистемы при отключении ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты и двух автотрансформаторов 1АТ и 2АТ на подстанции «Вулканешты».

Выполнены расчеты параметров режима энергосистемы при отключении ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты и двух автотрансформаторов 1АТ и 2АТ на подстанции «Вулканешты».

Для контролируемых узлов сделана выборка значений напряжений (таблица 2.2.1), а для ветвей – перетоков мощности (таблица 2.2.2).

Из приведенных данных видно, что уровни напряжения в контролируемых узлах сети 110 кВ резко снизились и потери напряжения достигли уровней 21-23 %, что недопустимо.

Таблица 2.2.1

Уровни напряжения в контролируемых узлах энергосистемы в установившемся режиме после отключения ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты и двух автотрансформаторов на подстанции «Вулканешты» (файл NORM-R-1. rge)

№ узла	Наименование узлов	Напряжение в узлах			Примечание
		Uном, кВ	Uрас, кВ	dU, %	
1	ГрСЭСВЭ 330	321,0	320,7	-0,09	
4	МГРЭС 330	340,0	313,5	-7,79	
5	МГРЭС 400	404,0	395,4	-2,13	
6	Вул 400	404,0	395,0	-2,23	
7	ОтпХБК 330-1	337,0	311,7	-7,51	
8	ОтпХБК 330-2	337,0	311,8	-7,48	
2068	Бэлц 330	315,0	312,1	-0,93	
4024	Киш. 330	328,0	309,0	-5,75	
6010	Вул. Сев.	117,0	91,9	-21,46	
6035	Вул. 110	122,0	91,6	-24,96	
6143	Тараклия 2	120,0	93,0	-22,53	

Таблица 2.2.2.

Перетоки мощности в контролируемых ветвях в установившемся режиме после отключения ВЛ-400 кВ (файл NORM-R-1. rge)

Номера узлов		Наименование ветвей	Напряжение узла, кВ		Величина перетока мощности МВт, МВАр
начало	конец		начало	конец	
1	2068	ГрСЭСВЭ 330 – Бэлц 330	320,7	312,06	-(198,95-j62,24
5	6	МГРЭС 400	395,4	394,9	0
6	6035	Вул. 400 – Вул. 110	394,9	91,55	0
6010	6035	Вул. Сев. – Вул. 110	91,89	91,55	-8,97-j1,54
6143	6035	Тараклия 2 - Вул. 110	92,96	91,55	-17,67-j3,94
7	4024	Отп ХБК 330-1 – Киш 330	311,7		-128,2-j06
8	4024	ОтпХБК 330-2 – Киш 330	311,8		-131,5-j10,7

Изменились перетоки мощности в системе. Произошло некоторое увеличение перетока мощности по ВЛ-330 кВ ГрСЭСВЭ 330 – Бэлц 330, ВЛ-330 кВ – МГРЭС – Кишинэу. Баланс мощности обеспечивается за счет увеличения перетока из энергосистемы Украины и Молдавской ГРЭС. Однако режим по напряжению в сети 110 кВ, примыкающей к подстанции 400/110 «Вулканешты», стал недопустимым. Снизились уровни напряжения в узлах подстанции Бэлц, Стрэшень, Кишинэу. Существующие сети 110 кВ не в состоянии обеспечить требуемый режим.

Необходим поиск альтернативных вариантов восстановления требуемого режима в сетях 110, 330 кВ Молдавской энергосистемы.

3. Вариант включения новой ВЛ-330 кВ Кишинэу – Вулканешты с установкой автотрансформатора 330/110/35 кВ на подстанции Вулканешты при отключенной ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты.

3.1. Схемные изменения.

Рассматривается вариант строительства между подстанциями Кишинэу 330 кВ и Вулканешты новой одноцепной ВЛ-330 кВ. Поясняющая схема приведена на рис. 3.

Параметры новой ВЛ-330 кВ Кишинэу – Вулканешты приведены в таблице 3.1.1.

На подстанции «Вулканешты» предусматривается установка нового автотрансформатора 330/110/35 кВ мощностью 200 МВА. Данные автотрансформатора приведены в таблице 3.1.2. Параметры ВЛ-330 кВ и автотрансформатора 330/110/35 кВ рассчитаны с учетом данных [1].

Таблица 3.1.1. Параметры ВЛ-330 кВ Кишинэу – Вулканешты

№ п/п	Параметры ВЛ-330 кВ	Единицы измерения	Значения параметров
1.	Протяженность ВЛ-330 кВ	км	170
2.	Напряжение ВЛ	кВ	330
3.	Провода		2 х АС-300/39
4.	Удельное активное сопротивление	Ом/км	0,048
5.	Удельное индуктивное сопротивление	Ом/км	0,328
6.	Удельная емкостная проводимость	См/км	$3{,}41 \cdot 10^{-6}$
7.	Удельная зарядная мощность	МВАр/км	0,409
8.	Параметры ВЛ-330 170 км: - активное сопротивление - индуктивное сопротивление - емкостная проводимость - емкостная проводимость - зарядная мощность	 Ом Ом См мСм МВАр	 8,16 55,76 $5{,}79 \cdot 10^{-4}$ 579 69,5

Таблица 3.1.2 Параметры автотрансформатора 330/110/35 кВ на подстанции Вулканешты

№ п/п	Параметры автотрансформатора	Единицы измерения	Значения параметров
1.	Тип автотрансформатора		АТДЦТН – 200000/330/110
2.	Номинальная мощность автотрансформатора	МВА	200
3.	Номинальное напряжение обмоток: - высокого напряжения (ВН-1) - среднего напряжения (СН-2) - низкого напряжения (НН-3)	 кВ кВ кВ	 330 115 38,5
4.	Напряжение короткого замыкания (Uk) В-С (1-2) В-Н (1-3) С-Н (2-3)	 % % %	 10 34 22,5
5.	Потери короткого замыкания (ΔР) В-С (1-2)	 кВт	 600
6.	Потери холостого хода (ΔРх)	кВт	180
7.	Ток холостого хода (Iх)	%	0,5
8.	Активное сопротивление обмоток: ВН (1) СН (2) НН (3)	 Ом Ом Ом	 0,8 0,8 2,0

9.	Индуктивное сопротивление ВН (1) СН (2) НН (3)	 Ом Ом Ом	 58,5 0 126,6
10.	Реактивные потери холостого хода (ΔQx)	кВАр	1000
11.	Индуктивная проводимость шунта (Вт)	мк См	9,1
12.	Активная проводимость шунта (Gт)	мк См	1,6
13.	Коэффициент трансформации Uc/Uв	отн. ед.	0,348

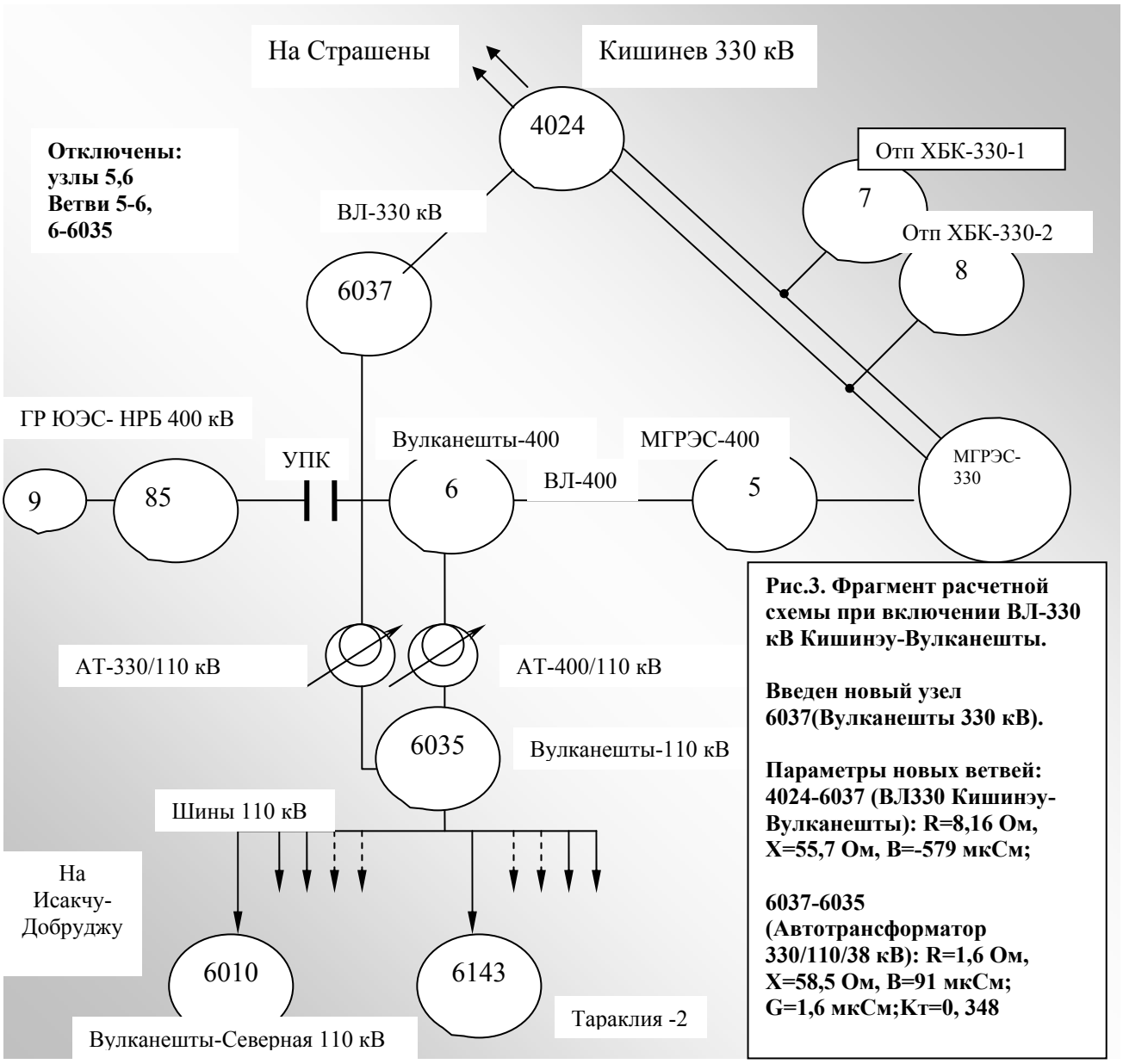


Рис.3. Фрагмент расчетной схемы при включении ВЛ-330 кВ Кишинэу-Вулканешты.

Введен новый узел 6037(Вулканешты 330 кВ).

Параметры новых ветвей: 4024-6037 (ВЛ330 Кишинэу-Вулканешты): R=8,16 Ом, X=55,7 Ом, B=-579 мкСм;

6037-6035 (Автотрансформатор 330/110/38 кВ): R=1,6 Ом, X=58,5 Ом, B=91 мкСм; G=1,6 мкСм;Kт=0, 348

3.2. Результаты расчета и анализ параметров установившегося режима энергосистемы при отключенных ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты, АТ1, АТ2 на подстанции «Вулканешты» и включенной новой ВЛ-330 кВ Кишинэу – Вулканешты с установкой автотрансформатора АТ 330/110/35 кВ на подстанции «Вулканешты».

Результаты расчета нормального установившегося режима для варианта исходных данных (NORM-R-2) приведены в таблицах 3.2.1 и 3.2.2.

Как следует из анализа приведенных данных, при введении в работу новой ВЛ-330 кВ Кишинэу – Вулканешты параметры режима энергосистемы существенно улучшаются. Уровни напряжения в контролируемых узлах находятся в допустимых пределах. В основном определяющем узле 6035 величина напряжения составляет 112 кВ. Переток мощности по ВЛ-330 кВ Кишинэу – Вулканешты составляет (91,8+j5,4) МВА. Баланс мощности в системе покрывается за счет увеличения перетока по линиям 330 кВ Молдавской ГРЭС – Кишинэу и Днестровск – Бельцы – Страшены – Кишинэу.

Вариант строительства ВЛ-330 кВ Кишинэу – Вулканешты с установкой автотрансформаторов 330/110/35 кВ на подстанции Вулканешты позволяет решить проблему обеспечения требуемых параметров режима в сети 110 кВ Южного региона. Дальнейшее рассмотрение данного варианта может быть обосновано на основании технико-экономических сопоставлений с другими вариантами.

Вопрос о строительстве ВЛ-330 кВ целесообразно увязать также с учетом транзитных возможных в перспективе перетоков мощности по цепочке Днестровская ГЭС – Бельцы – Кишинэу – Вулканешты – Румыния – Болгария.

4. Вариант включения новых генерирующих источников электроэнергии в сетях 110 кВ, примыкающих к шинам 110 кВ подстанции «Вулканешты»

Вторым техническим решением восстановления нормальной работы и требуемых параметров режимов рассмотрено включение дополнительных источников (ПГУ или ГТУ) активной и реактивной мощности в ряде узлов сети 110 кВ, примыкающей к подстанции 110 кВ Вулканешты (рис. 4). В качестве таковых выбраны:

- узел 110 кВ Вулканешты Северная;
- узел 110 кВ Тараклия;
- узел 110 кВ Комрат;
- узел 110 кВ Кахул Южный.

Введение дополнительных источников мощности осуществлено ступенчато. Величина реактивной мощности дополнительных источников определена исходя из работы генераторов при $cos\varphi = 0,85$.

Выбор мощности ПГУ (или ГТУ) осуществлен исходя из условия полного использования тепловой энергии отходящих продуктов сгорания газовых турбин для целей теплоснабжения населенных пунктов, где размещены указанные узлы сети 110 кВ.

Возможны и другие варианты ввода мощности в узлах 110 кВ Южной части энергосистемы. Однако их суммарная мощность должна быть не меньше указанной. В качестве альтернативного варианта рассмотрено подключение всей дополнительной генерируемой мощности к шинам 110 кВ подстанции Вулканешты – 110 кВ.

Как показали расчеты и проведенный анализ, варианты введения дополнительных источников мощности обеспечивают восстановление параметров режимов на уровне исходного состояния схемы и способствуют снижению потерь активной мощности в системе до прежнего уровня.

4.1. Описание вариантов введения дополнительных новых генерирующих источников электроэнергии.

В данной работе рассмотрено различное сочетание по мощности и местам размещения дополнительных источников активной и реактивной мощности. Ряд вариантов является промежуточным и использован для получения информации, выявления закономерностей и построения обобщенных характеристик.Наиболее представительные варианты размещения новых ПГУ показаны на рис. 4.

Номера и название контролируемых узлов

Таблица 3.2.1

№ узла	Название ΔU	NORM-R-K. Исходный режим,		NORM-R-1, Отключена ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты		NORM-R-2,. Включена новая ВЛ-330 кВ Кишиннэу - Вулканешты		NORM-R-3. с ПГУ-40,5 МВт на п/ст Вулканешты.110 кВ Сев. и 24 МВт в Тараклии		NORM-R-6. при S=24+j 14 в Кагуле Юж.; S=24+j 14 в Комрате, 40,5 МВт – Вулк.Сев., 24+j14 МВАв Тараклии		NORM-R-7 (аварийный) отключена 6035-6010 Вулк.110 – Вулк. Сев.		NORM-R-8 (аварийный) отключена 6035-6010; ПГУ в Тар., Кагуле, Комрате; ПГУ в Вулканештах - отключена	
		ΔU, %	Up, кВ исх.	ΔU, %	Up, кВ	ΔU, %	Up, кВ	Up, кВ	Up, кВ	ΔU, %	Up, кВ	ΔU, %	Up, кВ	ΔU, %	Up, кВ
1	ГрСЭСВЭ-330	+2,85%	330,2	+0,79	323,5	+2,09	327,7	+2,18	328,0	+3,06	330,8	+2,84	330,1	+2,26	328,3
3	Стр.-330	+0,38%	324,2	-3,16	312,8	-0,83	320,3	-0,84	320,3	+0,65	325,1	+0,26	323,9	-0,7	320,7
4024	Киш.-330	-0,72%	325,6	-4,41	313,5	-1,89	321,8	-2,01	321,4	-0,49	326,4	-0,9	325,1	-1,88	321,8
5	МГРЭС-400	-2,13%	395,4	-5,71	380,9	-3,79	388,7	-3,68	389,1	-2,48	394	-2,86	392,5	-3,63	389,3
6	Вулк.-400	-2,23%	395,0	-2,23	395,0	Отключен		Отключен		Отключен		Отключен		Отключен	
2068	Бэлць-330	+2,87%	324,0	0,09	315,3	+1,87	320,9	+1,93	321,1	+3,12	324,8	2,81	323,9	2,04	321,4
4	МГРЭС-330	-2,52%	331,4	-5,73	320,5	-3,8	327,0	-3,7	327,4	-2,48	331,6	-2,87	330,3	-3,65	327,6
От Кишиневской 110 кВ Левая ветка															
4026	Кишин.110	+5,5%	124,5	0,77	118,9	+3,66	122,3	+3,98	122,7	+6,09	125,2	+5,58	124,6	+4,23	123,0
4028	Хынчешть	+6,47%	123,5	+0,48	116,6	+4,16	120,8	+4,66	121,4	7,24	124,4	+6,67	123,7	+5,0	121,8
6029	Леово	1,54%	121,9	-11,51	106,2	-3,5	115,8	-2,07	117,5	3,27	123,9	+2,36	122,8	-1,14	118,6
6400	Комрат	+6,42%	122,4	-10,74	102,7	-0,3	114,7	+1,78	117,0	8,78	125,1	+7,63	123,8	+3,03	118,5
6007	Кагул Сев.	+7,25%	123,3	-17,03	95,4	-2,56	112,1	+1,28	116,5	+10,83	127,5	**+21,55**	169,8	+7,53	123,7
6033	Кагул Южн.	+3,1%	123,7	-21,17	94,6	-6,75	111,9	-2,84	116,6	6,68	128	**+18,74**	142	+3,88	124,7
6010	Вулкан. Сев.	+6,85%	125,0	-19,9	93,7	-4,17	112,1	+0,41	117,5	+8,74	127,2	**+24,9**	146	6,49	124,6
6035	Вулканеш.-110	+2,92	125,6	-23,44	93,4	-8	112,2	-4,96	115,9	2,58	125,2	-4,94	116	-8,88	111,2
Центральная ветка															
4026	Кишин.-110	+5,5%	124,5	0,77	118,9	+3,66	122,3	+3,98	122,7	+6,09	125,2	+5,58	124,6	+4,23	123
6164	Гура Галбенэ	+1,16%	123,4	-8,21	112,0	-2,44	119,0	-1,55	120,1	2,33	124,8	+1,62	124,0	-0,92	120,9
6027	Чимишлия	+8,69%	122,8	-4,5	107,9	+3,6	117,1	+4,99	118,6	+10,40	124,7	+9,47	123,7	-5,92	119,7
6400	Комрат	+6,42%	122,4	-10,74	102,7	-0,30	114,7	+1,78	117	8,78	125,1	+7,63	123,8	+3,03	118,5
6234	Конгаз	+9,87%	123,1	-11,63	99,0	+1,30	113,5	+3,8	116,3	+11,34	124,7	+7,74	120,7	+3,16	115,3
6133	Бурлачень-1	+7,26%	125,5	-20,08	93,5	-4,06	112,3	-0,9	115,9	6,95	125,1	-0,8	116,1	-4,91	111,3
6134	Бурлачень-2	+7,32%	125,6	-20,17	93,4	-4,07	112,2	-0,9	115,9	6,97	125,2	-0,87	116,0	-4,98	111,2
6035	Вулканеш.-110	+2,92%	125,6	-23,44	93,4	-8,000	112,2	-4,96	115,9	2,58	125,2	-4,94	116	-8,88	111,2
Правая ветка															

4026	Кишин.-110	+5,5%	124,5	0,77	118,9	+3,66	122,3	+3,98	122,7	+6,09	125,2	+5,58	124,6	+4,23	123
4045	Хорешть	+2,5%	124,0	-3,56	116,7	+0,16	121,2	+0,65	121,8	3,26	124,9	+2,70	124,3	+1,01	122,2
4020	Тараклия Сев.	+0,58%	122,7	-10,74	110,7	-3,22	118,1	-2,21	119,3	1,89	124,3	+1,14	123,4	-1,54	120,1
6132	Бесарабка	+3,43%	122,1	-10,40	105,7	-1,096	115,7	-0,29	117,7	5,40	124,4	+4,42	123,2	+0,7	118,8
6400	Комрат	+6,42%	122,4	-9,28	110,7	-0,30	114,7	+1,78	117	8,78	125,1	+7,63	123,8	+3,03	118,5
6122	Томай	+11,45%	122,6	-8,7	100,4	+3,49	113,8	+6,25	116,9	13,74	125,1	+11,21	122,3	+6,49	117,1
6102	Чадыр-Лунга	+9,88%	123,1	-13,39	97,0	+0,54	112,6	+4,24	116,7	11,86	125,3	+7,24	120,1	+2,77	115,1
6143	Тараклия-2	+3,88%	124,7	-21,05	94,7	-6,33	112,4	-1,91	117,7	5,47	126,6	-0,88	118,9	-4,9	114,1
Украинские подстанции															
544	Болград-1			-15,73	92,7	+1,5	111,7	+4,89	115,4	13,30	124,6	+4,92	115,4	+0,53	110,6
528	Коса-110(1)	+9,27%	120,2	-16,43	91,9	-1,23	108,7	+1,73	111,9	9,12	120	+1,91	112,1	-2,0	107,8
549	Рении-110	+13,39	124,7	-16,2	92,2	+1,15	111,3	+4,57	115,0	+13,01	124,3	+4,59	115,1	+0,18	110,2
543	Измаил-1	+4,45	114,9	-15,59	92,9	-3,5	106,2	-1,4	108,5	+4,39	114,8	-0,97	108,9	-4,11	105,5
Новые ЛЭП узлы															
6037	Вулканеш.-330	-	-	-	-	-2,02	323,3	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 3.2.2. Контролируемые ветви

Номера узлов		Наименование ветвей	Файл NORM-R-K Исходный режим	Файл NORM-R-1 Отключены 6-85, 6-6035(1); 6-6035 (2) узел 5 включен	Файл NORM-R-2; включена ВЛ-330 Кишинев – Вулканешты и АТ-330/110 на п/ст Вулканешты; Узел 5 включен	Файл NORM-R-3 включены ПГУ-24 Тараклия; ПГУ-40,5 в Вулканештах; МГРЭС – Вулканешты 400 кВ отключена; Узел 5 включен	Аварийный режим. NORM-R-7 отключена 6035-6010 Вулканешты 110 – Вулканешты Сев.; отключены ПГУ в Тараклии, Комрате, Кагуле по 24 МВт; Вулканешты Сев. – ПГУ-40,5
Начало	Конец						
1	2068	ГрСЭСВЭ-330 – Бэлць-330	-165,5-j36,9	-165,57-j52,21	-173,54-j44,11	-161,97-j46,24	-155,25-j39,5
2068	3	Бэлць-330 – Стрэшень-330	+27+j12,3	-27,77+j8,48	-36,83+j18,82	-23,7+j14,57	-16,46+j21,41
4024	4026	Кишинэу-330 – Кишин-110	-75,6-j39,0	-95,39-j44,8	-80,58-j47,81	-93,34-j40,73	-83,73-j33,49
4024	4026	Кишинэу-330 – Кишин-110	-74,6-j38,3	-96,69-j45,29	-81,77-j48,48	-92,11-j40,23	-84,82-j34,01
4024	8	Кишинэу-330 – Отп.ХБК-2-330	+110,0+j51,4	+138,71+j52,89	+161,24+j38,11	+136,02+j49,29	-127,7+j43,15
4024	7	Кишинэу-330 – Отп.ХБК-1-	+108,2+j41,7	+136,04+j41,36	+156,93+j25,66	+133,2+j38,05	+124,76+j32,64

		330					
4024	3	Киш.-330 – Отп. Стрэш-330	-68,0-j15,9	-82,68-j4,15	-63,12+j17,57	-83,76-j6,37	-83,92-j8,29
4	8	МГРЭС-330 – ХБК-2	-177,0-j76,9	-209,83-j79,58	-230,72-j81,77	-206,91-j75,25	-197,86-j67,85
-4	7	МГРЭС-330 – ХБК-1	-180,1-j69,5	-212,42-j70,07	-231,52-j61,18	-209,31-j66,06	-200,02-j59,44
4026	4028	Кишинэу-110 – Хынчешть	-18-j1,4	-28,91-j2,59	-23,18-j4,25	-26,5-j0,7	-21,3+j1,7
4026	6164	Кишинэу-110 . Гура-Галб.	-18,4-j2,2	-58,8-j13,2	-37,14-j15,86	-50,2-j4,4	-31,2+j7,2
4026	4045	Кишинэу-110 – Хорешть	-15,3-j0,8	-38,2-j4,9	-26,46-j7,37	-32,9-j0,4	-21,8+j5,1
6035	6010	Вулканешты -110 – Вулк.Сев	-20,5-j3,0	+38,3+j19,4	-9,4+j2,4	+34,7+j17,7	Отключена
6035	6143	Вулканешты-110 – Таракл 2	-16,6-j2,2	+8,7-j0,7	-4,1+j4,3	+24+j7,9	37,9+j14,4
6035	6078	Вулканешты-110 – п/ст. Вулканешты районная	-14,1-j3,0	-13,6-j3,2	-13,7-j3,1	-13,8-j3,1	-13,8-j3,1
6035	6134	Вулканешты-110 –Бурлач.-2	-0,3-j0,0	-0,3-j0,0	-0,3-j0,0	-0,3-j0,0	-0,3-j0,0
6035	6191	Вулканешты-110 – Кирил.-1	-2,0+j1,4	-1,9+j1,0	-1,9+j1,1	-1,9+j1,2	-1,9+j1,2
6035	6242	Вулканешты-110 – Кирил.-2	-1,4+j0,5	-1,3+j0,4	-1,3+j0,4	-1,3+j0,4	-1,3+j0,4
6035	6133	Вулканешты-110 – Бурлач.-1	-22,1-j4,4	-14,9-j2,0	-4,0+j5,4	+9,1-j5,5	+29,7+j4,5
6035	6012	Вулканешты-110 – Етулия-4	-7,7-j0,9	-7,6-j1,4	-7,6-j1,2	-7,7-j1,1	-7,6-j1,1
6035	6	Вулканешты -110 – Вулк-400	+68,6+j13,1		отключена	отключена	
6035	6	Вулканешты -110 – Вулк-400	+81,0+j15,5		отключена	отключена	
6035	528	УКРАИНА Вулканешты-110 – Коса-1	-41,8-j17,4	-14,1-j13,7	-26,4-j9,3	19,7-j17,8	-19,6-j16,5
5	6	МГРЭС-400 – Вулканеш-400	-150,8+j51,5	отключена	отключена	Отключена	Отключена
6	5	Вулканеш-400 – МГРЭС-400	150,3+j35,9	отключена	отключена	Отключена	Отключена
6035	544	Вулканешты-110 – Болград-1		-23,1+j0,1	-23,1+j0,2	-23,1+j0,2	-23,1+j0,2
		ВКЛЮЧЕНИЕ НОВЫХ ЛЭП					
4024	6037	Кишинэу-330 – Вулкан.-330 (D-330)	-	-	-92,64+j50,08	Нет связи	Нет связи
6037	6035	Вулканешты-330 – Вулканешты-110 (переток через АТ)	-	-	-91,76-j5,37	Нет связи	Нет связи

4.2. Основные результаты расчетов параметров режимов сетей 110 кВ при включении дополнительных электрических мощностей в нормативном режиме.

Результаты расчетов режимов энергосистемы для различных вариантов введения дополнительных генерирующих источников приведены в таблицах 3.2.1 и 3.2.2

Каждый из рассмотренных вариантов характеризуется своими показателями и значениями параметров режимов.

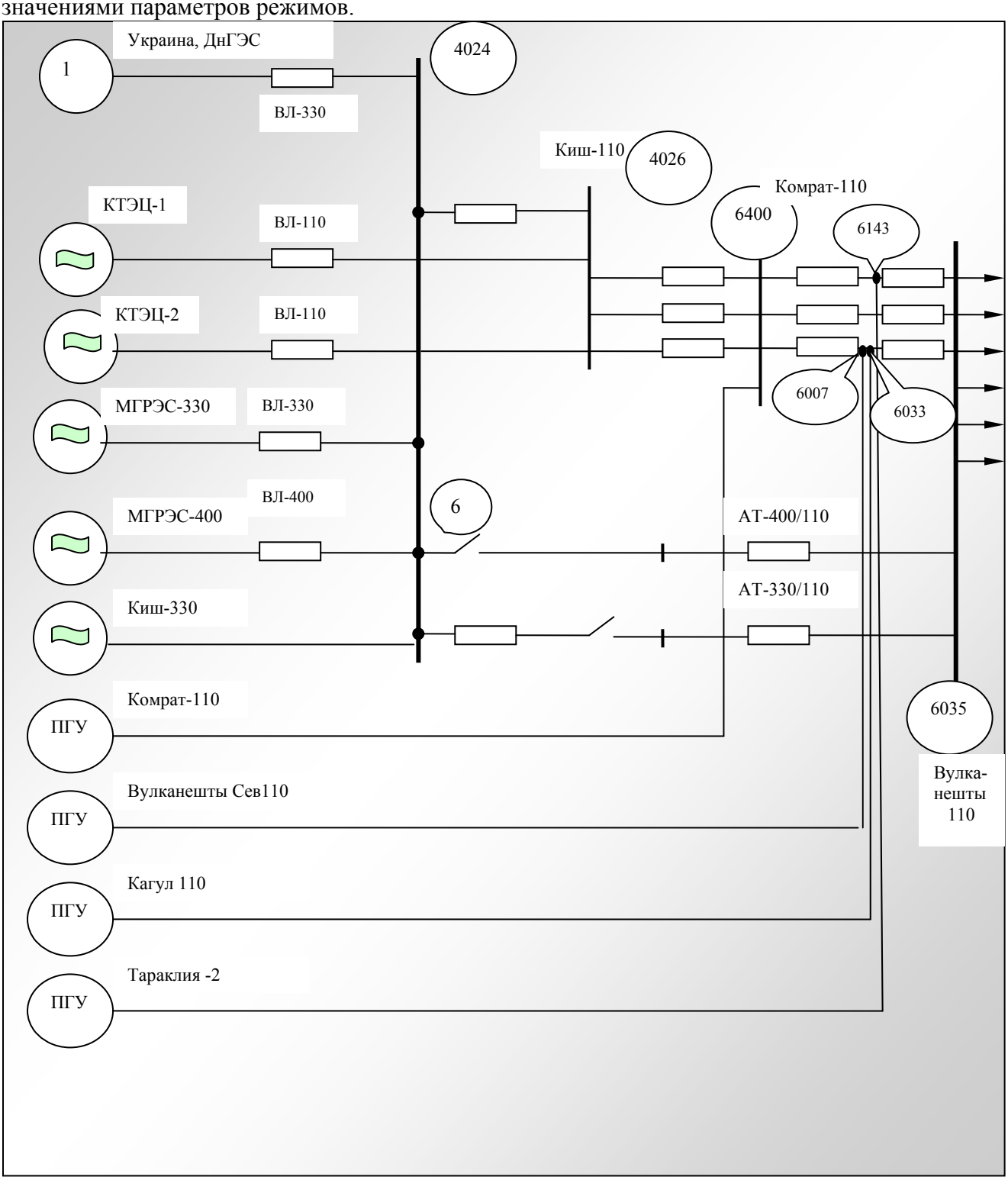
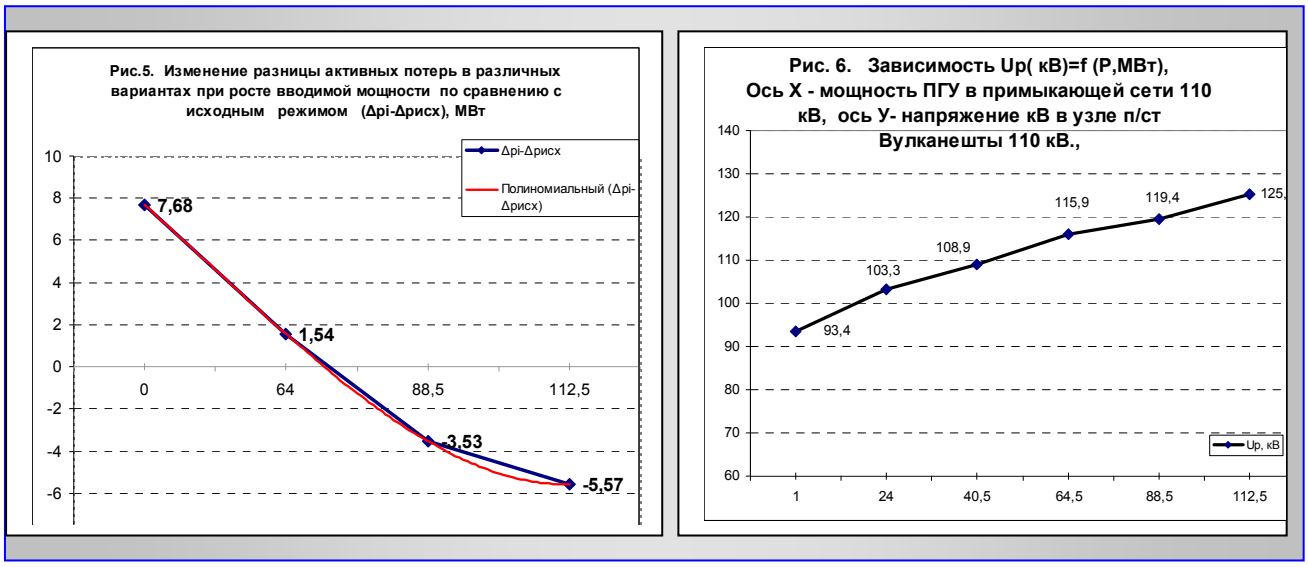


Рис. 4. Структурная схема для оценки индикатора режимной безопасности узла Вулканешты 110 кВ

На основании приведенных расчетов и анализа удалось получить обобщенные зависимости потерь напряжения и потерь мощности в системе в зависимости от величины вводимых дополнительных генерирующих мощностей ПГУ.

В качестве характерного определяющего узла выбран узел 110 кВ подстанции Вулканешты-110 кВ (узел 6035).

В результате были построены зависимости разности величин суммарных потерь в системе по сравнению с исходным режимом (рис.5) и уровня напряжения на шинах 110 кВ подстанции Вулканешты (рис.6) от величины вводимой дополнительной (рассредоточенной) мощности новых источников, суммарная величина которой изменялась от 24 до 112,5 МВт.



Анализ полученных зависимостей показал, что для восстановления параметров режима сети 110 кВ и уровня напряжения в узле 110 кВ подстанции Вулканешты необходимо ввести дополнительные источники суммарной электрической мощностью 88,5 МВт, в том числе:

- 24 МВт в узле 110 кВ в Тараклии;
- 40,5 в узле 110 кВ в Вулканештах Северная;
- 24 МВт в узле 110 кВ подстанции Комрат.

При проведении расчетов был рассмотрен дополнительный вариант сосредоточенного размещения всей мощности ПГУ непосредственно на шинах 110 кВ подстанции Вулканешты. (таблица 4.2.1).

Таблица 4.2.1

Дополнительные режимы при введении всей дополнительной генерирующей мощности только в узле 6035

№ п/п	Файл	Генерация в узле 6035 Вулканешты-110	Напряжение в узле 6035
1	Norm-R31	24+j14	103,3 (-15,29%)
2	Norm-R22	40,5+j24	109,6 (-10,15 %)
3	Norm-R23	64,5+j38	117,2 (-3,96 %)
4	Norm-R24	88,5+j52	123,6 (+1,28 %)

Данный вариант характеризуется большим эффектом по поддержанию уровня напряжения в заданном узле 110 кВ подстанции Вулканешты-110 кВ, о чем можно судить по данным таблиц 4.2.1 и графика, показанного на рис. 6 (зависимость ***Up*** от мощности ПГУ).

Например, при рассредоточенной генерации в сумме 64,5 МВт уровень напряжения в узле 110 кВ Вулканешты составлял 115,9 кВ, а при сосредоточенной генерации 117,2 кВ.

Определенный интерес представляет анализ зависимости величины суммарных потерь мощности в энергосистеме от величины вводимой дополнительной мощности генерации на базе ПГУ. Для удобства и наглядности на рис. 5 построена зависимость разности суммарных потерь мощности в энергосистеме для рассматриваемых вариантов по отношению к базовому (исходному) режиму.

При отключении ВЛ-400 кВ МГРЭС – Вулканешты, как было показано выше, происходит значительное ухудшение режима энергосистемы, при этом потери сетях возрастают на 7,68 МВт по сравнению с исходным режимом.

При введении дополнительной рассредоточенной генерации потери в сети снижаются и при мощности дополнительных ПГУ, равной 64,5 МВт, становятся такими же, как в исходном режиме. При дальнейшем увеличении мощности ПГУ потери мощности снижаются по сравнению с исходной их величиной.

4.3. Анализ ремонтного и аварийного режимов сети 110 кВ (при выводе в ремонт одной ВЛ-110 кВ (при n-1) и аварийном отключении второй ВЛ-110 кВ (при n-2)).

Для моделирования ремонтного и аварийного режимов в сети 110 кВ в качестве исходного варианта был выбран вариант с дополнительной рассредоточенной генерацией мощности при размещении ПГУ в узлах 110 кВ Вулканешты Северная, Тараклия и Комрат.

В ремонтном режиме предполагалась отключенной одна из загруженных ВЛ-110 кВ, а именно, ВЛ Вулканешты-110 – Вулканешты Северная (т.е. моделировался режим при при n-1). Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в этом режиме удается обеспечить требуемые уровни напряжения в узлах при наличии принятых генерирующих источников общей мощностью 88,5 МВт. При этом реактивная мощность ПГУ в узле Вулканешты Северная оказывается избыточной, и ее необходимо снизить до величины 5 МВАр (вместо 24 МВАр в исходном режиме), что является вполне допустимым.

Далее был рассмотрен аварийный режим, при условии нахождения в ремонте указанной выше ВЛ-110 кВ и аварийном отключении второй ВЛ-110 кВ в качестве которой была выбрана ВЛ-110 кВ Кишинев-110 кВ – Гура Галбенэ.

При незначительном регулировании реактивной мощности ПГУ удается обеспечить требуемые параметры режима сети 110 кВ, не выходя за пределы допустимых для аварийного режима. Суммарная мощность ПГУ при этом составляла 88,5 МВт.

4.4. Анализ режимов энергосистемы для условий летнего максимума.

Летний максимум нагрузок характеризуется сниженным их значением до величины 0,7 от значений для зимнего максимума. Расчетные величины мощности генерирующих источников в энергосистеме Молдовы указаны в таблице 1.2.

Выбранные по условиям зимнего максимума дополнительные величины генерирующих источников (ПГУ) в пределах до 88,5 МВт обеспечивают необходимые параметры режимов и для условий летнего максимума.

Выводы

1. Отключение ВЛ-400 кВ «МГРЭС – Вулканешты» приводит к ухудшению режима Южной части энергосистемы Молдовы и Украины, недопустимым потерям напряжения в ряде узлов сети 110 кВ и увеличению суммарных потерь мощности в системе.

2. Восстановить параметры режимов электрических сетей 110 кВ, примыкающих к подстанции 110 кВ Вулканешты, можно за счет одного из двух мероприятий:

- Сооружения новой ВЛ-330 кВ «Кишинэу – Вулканешты» и установки двух автотрансформаторов 330/110/35 кВ на подстанции Вулканешты.

- Введения дополнительных генерирующих источников активной и реактивной мощности в Южном регионе сети 110 кВ энергосистемы суммарной установленной мощностью не менее 88 МВт, с возможным вариантным их размещением:

- В узле 110 кВ подстанции Вулканешты Северная (на уровне 24-40,5 МВт);
- В узле 110 кВ подстанции Тараклия (24 МВт);
- В узле 110 кВ подстанции Комрат (24 МВт).

В качестве рекомендуемого для практической реализации предлагается второй вариант.

Установка дополнительных генерирующих источников в узлах энергосистемы отвечает перспективе развития системы электроснабжения и покрытия баланса электрической мощности в энергосистеме, а также развития систем теплоснабжения крупных населенных пунктов, расположенных вблизи рассматриваемых электрических узлов энергосистемы, за счет утилизации тепловой энергии отработанных продуктов сгорания в ПГУ при комбинированной выработке ими электрической и тепловой энергии.

Литература

1. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов, Л.Я. Рудык, Д.Л. Файбисович, Л.Д. Хабачев, И.М. Шапиро; Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

ДВУХОБМОТОЧНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР В ДВУХФАЗНОМ ИСПОЛНЕНИИ С ЕМКОСТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Берзан В.П., Тыршу М.С., Бырладян А.С.
Институт энергетики АНМ.
e-mail: berzan@cc.acad.md, mtirsu@ie.asm.md

Аннотация. В статье рассматривается двухобмоточный асинхронный генератор в двухфазном исполнении с емкостным возбуждением, выполненный на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Исследования разработанного генератора выполнены по различным схемам соединения обмоток статора. Путём выбора числа витков фаз обмоток статора выполненные на различное напряжение с включением на фазу повышенного напряжения конденсаторов возбуждения, удалось снизить величину емкости и улучшить показатели и характеристики генератора.
Ключевые слова: асинхронный генератор, конденсатор, фаза, обмотка, схема, напряжение, емкость.

GENERATOR ASINCRON BIFAZAT CU EXCITARE CAPACITIVĂ

Berzan V.P., Tîrşu M.S., Bîrladean A.S.
Institutul de Energetică al AŞM

Rezumat. În articol se examinează generatorul asincron cu două înfăşurări realizat bifazat cu excitaţie capacitivă, îndeplinit pe baza motorului asincron cu rotor în scurtcircuit. Cercetările generatorului elaborat s-au înfăptuit cu diferite scheme de conexiuni a înfăşurărilor statorice. Prin alegerea numărului de spire a fazelor infăşurărilor statorice îndeplinite la diferite tensiuni cu cuplarea la faza de tensiune inalta a condensatorilor de excitatiţe a permite micsorarea valorii capacităţii de excitaţie, îmbunătăţirea indicelor şi caracteristicelor generatorului.
Cuvinte - cheie: generator asincron, condensator, fază, înfăşurare, schemă, tensiune, capacitate.

BIPHASIC ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH CONDENSER EXCITATION

Berzan V.P., Tirshu M.S., Birladian A.S.
Institute of Power Engineering of the ASM

Abstract. In article two-winding asynchronous generator in biphasic execution with the capacitor excitation, executed on the basis of the asynchronous engine with a short-circuited rotor is considered. Researches of the developed generator are executed under various schemes of connection of stator windings. Selecting phases wire numbers of stator windings implemented for various voltages with inclusion on a phase of the raised voltage of excitation condensers, allowed decreasing the size of capacity and improving indicators and generator characteristics.
Keywords: asynchronous generator, condenser, phase, winding, scheme, voltage, capacity

Введение

В последние годы наблюдается рост потребности в автономных источниках электроэнергии. К электрическим генераторам подобных источников энергии предъявляются определенные требования, характерные для автономных энергоустановок: минимальные габариты и масса, бесконтактное исполнение, удовлетворительные параметры электрогенератора и его системы возбуждения, требуемое качество внешних характеристик и энергетических показателей, а также стабильный уровень напряжения и частоты переменного тока, достаточно высокие КПД и cos φ.

Тип электрогенератора оказывает решающее влияние на технико-экономические показатели автономного источника энергии, так как он должен обеспечить нагрузку

потребителя стабильным напряжением при изменении нагрузки и ее характера: статический или динамический, активный или реактивный.

Известно, что простейшим в конструктивном отношении электромеханическим преобразователем энергии является асинхронный генератор (АГ), представляющий собой асинхронную машину (АМ) с короткозамкнутым ротором и конденсаторами возбуждения. Кроме того, АГ имеет ряд положительных качеств: бесконтактность, простота конструктивного исполнения, прочность и высокая надежность, сравнительно минимальные параметрами рассеяния контуров статора и ротора; короткозамкнутый и симметричный ротор удовлетворительными демпфирующими свойствами, что очень важно при параллельной работы генератора с сетью и при несимметричных режимах его нагрузки. На эти особые преимущества АГ указывают многие отечественные и зарубежные авторы теоретических и экспериментальных НИР по исследованию АГ с конденсаторным возбуждением.

Вместе с тем, АГ с короткозамкнутым ротором в обычном исполнении обмотки статора, имеет ограниченные возможности при работе, из-за определенных недостатках. Например, при коротких замыканиях на зажимах АГ его напряжение падает до нуля с возможным исчезновением остаточного магнитного потока в АМ, что затрудняет и затягивает во времени процесс восстановления напряжения АГ. Проведённые исследования в [1,2] показали, что имеющиеся недостатки АГ можно успешно устранить, используя многообмоточные АГ, то есть АМ с различным числом обмоток на статоре, соединенные по различным схемам, в том числе и по автотрансформаторной с пространственным сдвигом между обмотками.

В данной работе изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований автономного АГ (ААГ) с двумя обмотками на статоре в двухфазном исполнении с емкостным возбуждением. Представлены результаты испытаний генератора при его работе в различных режимах на статическую активно-индуктивную нагрузку.

1. Многообмоточные асинхронные генераторы

Использование обычных АМ с одной обмоткой на статоре в качестве генераторов, имеет ограниченные возможности из-за перегрузки электрической машины реактивным током [3]. Результаты научно-технических исследований и опытно-конструкторских работ [1,4] подтвердили целесообразность исполнения статора АМ с несколькими обмотками различного функционального назначения для работы в генераторном режиме. Так, АМ с двумя обмотками на статоре, включенными по различным схемам, обеспечивает улучшение технико-экономических показателей ААГ [5]. При этом возникает необходимость электромагнитного перерасчета и перемотки АМ на другие напряжения и/или скорости вращения электромагнитного поля машины. Как правило, в задачу электромагнитного перерасчета входит не только выбор типа обмоток, но и определения электромагнитных нагрузок, в том числе и числа пар полюсов, сечения обмоточного провода и необходимого коэффициента заполнения паза статора и т.д.

Правильный выбор электромагнитных нагрузок и их соотношения, схемы соединения статорных обмоток, величины пространственного и фазового сдвигов между ними, позволяет обеспечить хорошее качество рабочих характеристик и устойчивости работы ААГ в различных режимах.

У обычной АМ с одной статорной обмоткой при работе в режиме ААГ, рост тока нагрузки приводит к уменьшению величины напряжения на конденсаторах возбуждения,

что способствует прогрессивному уменьшению емкостной мощности возбуждения, которая находится в квадратичной зависимости от напряжения. Размещение на статоре ААГ двух обмоток позволяет при заданном напряжении генератора выбрать напряжение его возбуждения любой величины и сделать связь с напряжением рабочей обмотки менее жесткой. При этом следует учесть, что при использовании нескольких обмоток статора АГ, появляется возможность применения повышенного напряжения на конденсаторах возбуждения и соответствующего уменьшения необходимой емкости конденсаторов. Кроме того, при этом целесообразно осуществить соединение статорных обмоток по автотрансформаторной схеме, что позволяет увеличить мощность генератора.

Генератор в двухфазном исполнении обмоток статора, расположенные в пространстве под углом 90 электрических градусов и определенной емкостью в качестве возбуждающего элемента, получается уравновешенный режим с круговым вращающимся магнитным полем. Однако для получения кругового магнитного поля при любой скорости вращения ротора, необходимо изменять величину емкости конденсаторов возбуждения или использовать двухфазные обмотки статора соединенные по автотрансформаторной схеме академика В.С.Кулебякина [6]. Основные схемы соединения статорных обмоток АМ работающие в двигательном или генераторном режимах представлены в [5,6]. Анализ работ [7,8] убедительно показывает, что интересующее нас система «АМ – емкость» в структурном отношении, по принципу действия и свойствам представляет собой типичную автоколебательную систему, которая позволяет получить более эффективные принципы управления самовозбуждения генераторов.

Следовательно, за счёт многообмоточных схем исполнения обмоток статора и регулятора емкостного тока в системе «АМ – емкость» имеется реальная возможность получить более эффективные схемы, принципы самовозбуждения ААГ и улучшить его показатели и характеристики.

2. Самовозбуждение асинхронного генератора

Магнитная характеристика АМ не только позволяет судить о магнитных свойствах электрической машины, но и дает возможность определить величину емкости, необходимой для возбуждения АМ до заданного напряжения при холостом ходе (х.х.) и работе ее в качестве генератора по схеме самовозбуждения.

На рис.1 кривая 2 представляет собой х.х. АМ, а зависимость напряжения от тока х.х. выражается следующим уравнением

$$U_1 = I_c \omega L = f(I_{xp}) \text{ при } f = const,$$

где $I_c = I_{xp} \cdot \sin(\varphi_{x.x.})$., I_{xp} - реактивный ток при х.х.

Зависимость напряжения на зажимах конденсаторов возбуждения от протекающего по ним тока (прямая 1 рис.1) может быть написана следующим образом:

$$U_1 = \frac{I_C}{\omega C} = f(I_C).$$

Процесс самовозбуждения АМ работающая в генераторном режиме продолжается до тех пор пока $(x_1+x_\mu)I_c > x_c I_c$ и заканчивается в точке равновесия «А» рис.1, когда наступает равенство $(x_1+x_\mu)I_c = x_c I_c$.

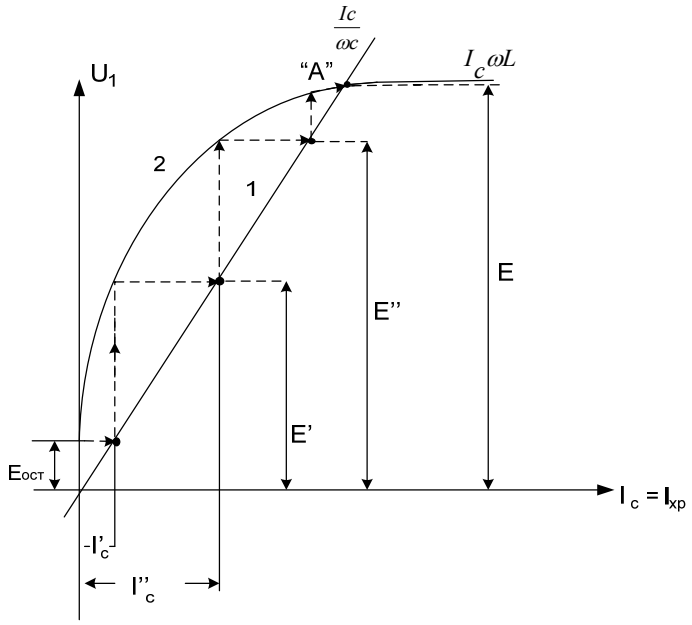


Рис.1. Процесс самовозбуждения АГ

Равновесие в точке «А» дает возможность определить зависимость между полной индуктивностью АГ и емкостью возбуждения при заданной частоте:

$$LC = \frac{1}{(2\pi f)^2} = \frac{1}{\omega^2}.$$

Величина реактивной составляющей тока $I_{xp} \cdot sin\varphi_{xx}$ может быть определена для заданного напряжения U_{XX} АМ по магнитной характеристике машины, а величину фазной емкости батареи конденсаторов, необходимой для самовозбуждения ААГ до заданного напряжения при данном числе оборотов ротора можно определить расчетным путем по следующему выражению

$$C_{\phi} = \frac{I_x \sin\varphi \cdot 10^6}{\omega U_{xx}} \text{ [мкф].}$$

Как видно из рис.1 самовозбуждение ААГ осуществляется обычно при х.х. и возможно лишь в тех случаях, когда линия "1" зависимости напряжения на конденсаторах возбуждения от протекающего по ним тока пересекает кривую х.х."2" генератора и если при этом имеется остаточное магнитное поле ротора. Согласно [1] процесс самовозбуждения ААГ во многом аналогичен процессу самовозбуждения генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

В литературе имеют место различные трактовки процесса самовозбуждения [9] имеющие определенную физическую природу, в том числе и как автоколебательная система [10]. Интересующее нас система «АМ – емкость» имеет определенную обратную связь, а начальное ее состояние оказывает существенное влияние на процесс возбуждения ААГ [7]. Анализ работ [8, 9] убедительно показывает, что система «АМ – емкость» в структурном отношении, по принципу действия и свойствам представляет собой типичную автоколебательную систему.

Таким образом, вопрос емкостного самовозбуждения ААГ представляет определенный интерес, как с эксплуатационной точки зрения, так и с точки зрения теоретического и экспериментального исследования работы автономных АГ в различных режимах.

3. Схемы замещения и векторные диаграммы

Анализ рабочего режима АГ проводится на основе его эквивалентной схемы замещения с вынесенным на зажимах намагничивающим контуром [11]. Полная схема замещения АГ при вращающимся роторе отличается от схемы замещения АМ работающей в двигательном режиме наличием в цепи статора емкости возбуждения. Схема замещения позволяет определить токи, потери мощности и падение напряжения в АГ при условии предварительного расчета её параметров согласно [12]. Схема замещения АГ с параллельным возбуждением и вынесенным на зажимы намагничивающим контуром представлена на рис.2.

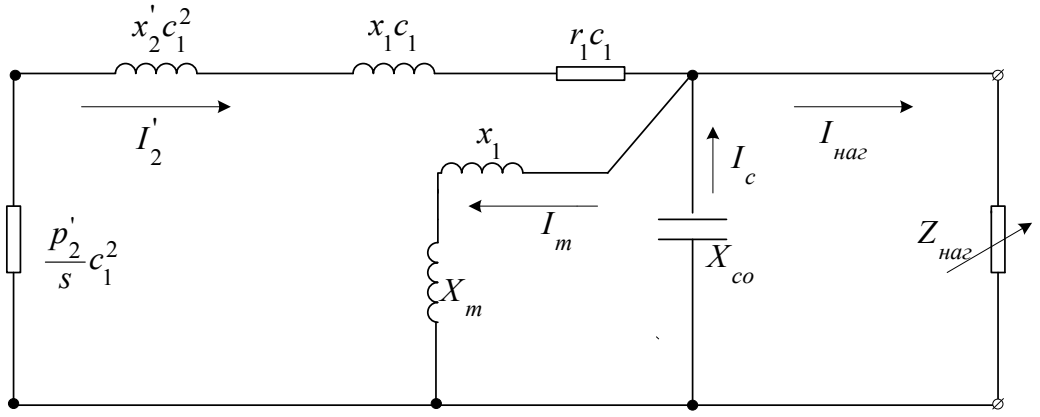


Рис.2. Схема замещения АГ с параллельным возбуждением

Параметры схемы замещения можно представить в следующем виде:

$r_1c_1 = R_1$ и $\frac{r_2'}{s}c_1^2 = R_2$ – активные сопротивления,

$x_1c_1 + x_2'c_1^2 = x_s$ – суммарное реактивное сопротивление рабочей цепи,

где $c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}$,

$x_{co}=1/\omega_o c_o$ – реактивное сопротивление емкости возбуждения фазы,

$z_{наг}= R_{наг}+jX_{наг}$ и $tg\varphi_{наг}=X_{наг}/ R_{наг}$ – соответственно, полное сопротивление и фаза нагрузки генератора.

Следует отметить, что параметры обмотки статора r_1 и x_1 считаем постоянными, ротора - $r_2'(S)$ и $x_2'(S)$ рассчитываются предварительно по определенной методике изложенной в специальной литературе [12].

На основании представленной выше схемы замещения АГ могут быть определены все соотношения и величины, характеризующие статический режим работы генератора,

кроме того, на основе баланса реактивных мощностей, можно определить необходимую реактивную мощность и емкость конденсаторов возбуждения.

В то же время необходимо учесть, что АГ с двумя обмотками на статоре, соединенные по различным схемам, имеющие или не имеющие электрическую связь при определенном пространственном сдвиге между ними, позволяет более простыми средствами обеспечить высокое качество рабочих характеристик АГ при хорошей устойчивости его работы.

В связи с этим возникла необходимость рассмотреть некоторые теоретические аспекты работы двухобмоточного (ДО) АГ на основе схемы замещения приведённой на рис.3, в которой: 1 – рабочая обмотка статора, 2 – обмотка к.з. ротора, 3 – обмотка статора с конденсатором возбуждения. При этом, первичной обмоткой можно считать роторную – 2, а вторичными – обмотку возбуждения – 3 и рабочую обмотку – 1 статора.

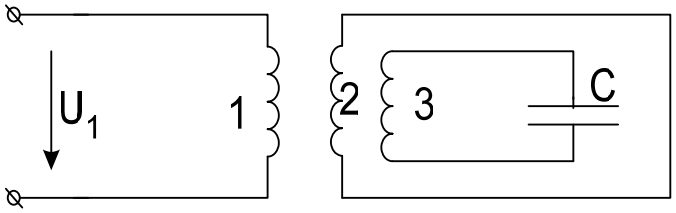


Рис.3. Схема замещения ДО - АГ

Уравнения магнитодвижущих сил (м.д.с.) ДО-АГ в общем виде повторяет уравнение м.д.с. трехобмоточного трансформатора [13].

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 + \dot{I}_3 W_3 = \dot{I}_m W ,$$

где $\dot{I}_m$ - намагничивающий ток ДО-АГ.

Выполнив приведение токов обмоток ротора и возбуждения к обмотке статора, получим:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' + \dot{I}_3' = \dot{I}_m ,$$

где $\dot{I}_2' = \dfrac{I_2}{K_{12}}$, $\dot{I}_3' = \dfrac{I_3}{K_{13}}$, $K_{12} = \dfrac{W_1}{W_2}$ и $K_{13} = \dfrac{W_1}{W_3}$.

Вследствие того, что при х.х. $\dot{I}_1 \approx 0$ предыдущее уравнение принимает вид

$$\dot{I}_3' = \dot{I}_m - \dot{I}_2' .$$

Пользуясь методикой принятой для АМ, можем построить векторную диаграмму ДО-АГ, которая представлена на рис.4.

Учитывая, что в генераторе существует основное поле и соответствующий поток – $\Phi_м$ уравнение баланса напряжений для обмотки статора будет

$$\dot{U}_1 = E_1 - j\dot{I}_1 x_1 - \dot{I}_1 r_1 ,$$

а для обмоток ротора и возбуждения уравнения баланса напряжений будут

$$0 = E_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' \frac{r_2'}{S} = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2 \frac{1-s}{s} ,$$

$$\dot{U}_3 = \dot{E}_3' - j\dot{I}_3 x_3' - \dot{I}_3' r_3' .$$

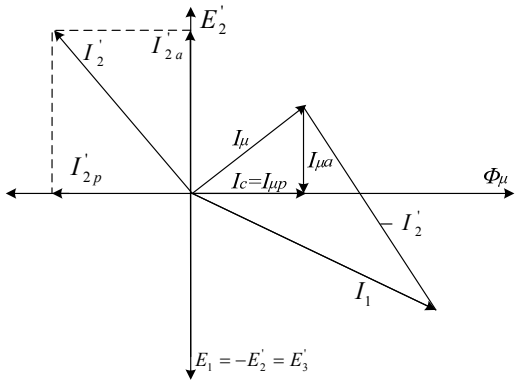


Рис. 4. Векторная диаграмма ДО-АГ на холостом ходу

По вышеизложенным уравнениям можно установить, что ДО-АГ эквивалентен трехобмоточному трансформатору, а его принципиальная векторная диаграмма при нагрузочном режиме представлена на рис.5. Анализ векторной диаграммы показывает, что генератор может работать только при опережении тока I_1 э.д.с. E_1.

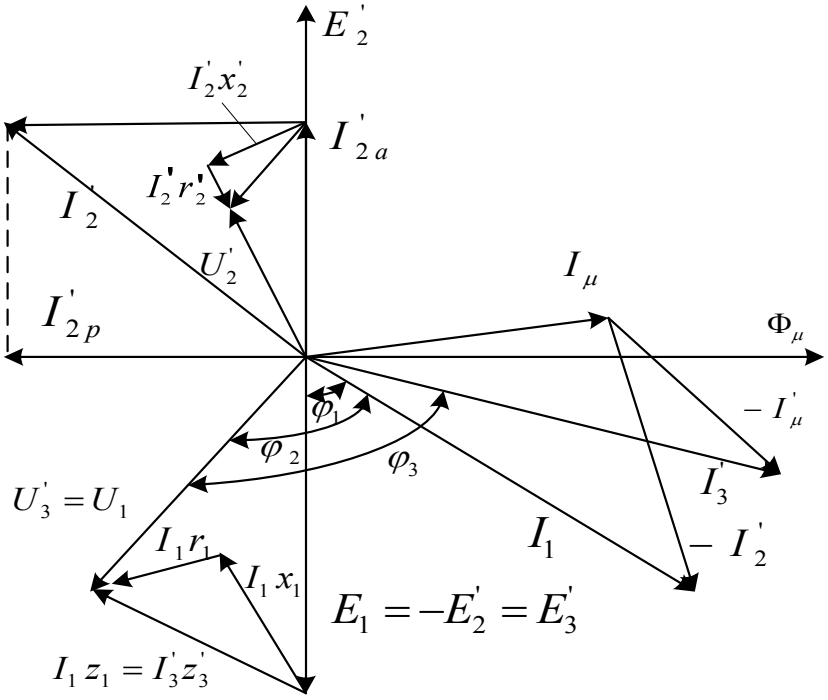


Рис. 5. Векторная диаграмма ДО-АГ при нагрузке

Такой режим создают конденсаторы возбуждения. Угол $\varphi_2 \approx 0$, т.е. ток I_2' совпадает по фазе с напряжением U_2'. Если обозначить $I_2' r_2' \frac{1-s}{s} = U_2'$, тогда для обмотки ротора уравнение напряжений примет следующий вид:

$$\dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2' = U_2'.$$

В данном случае мощность в цепи ротора напишется в следующем виде:

$$P_{эм}' = m_1 U_2' I_2 = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s},$$

где m_1 – число фаз.

Эта мощность является чисто активной и соответствует механической мощности ротора, так как

$$P_{мех} = (1-S)P_{эм}, \text{ где } P_{эм} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{S}.$$

Следовательно, преобразование механической энергии в электрическую, отдаваемую в автономную сеть, связано с потерями в различных частях АГ, которые предоставлены на энергетической диаграмме, рис. 6.

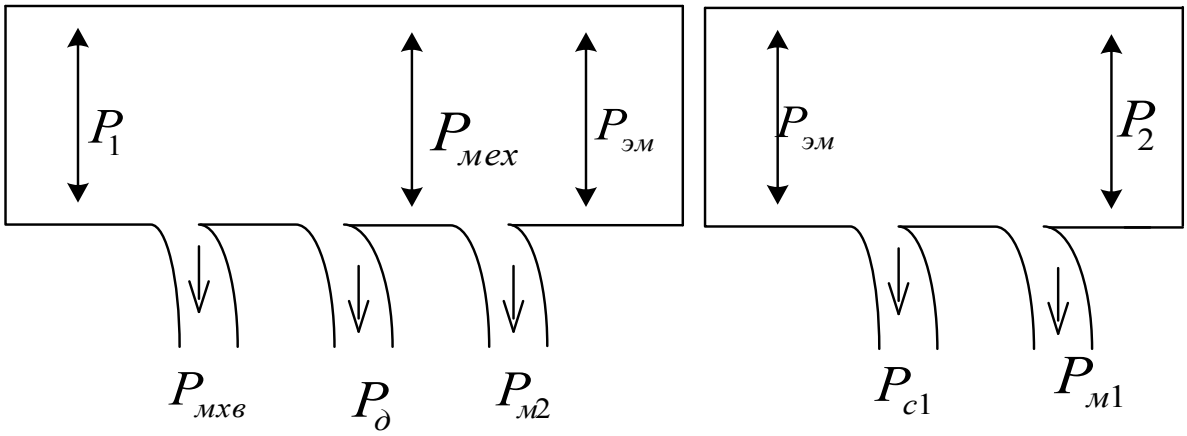


Рис.6. Энергетическая диаграмма АГ

P_1 – полная механическая мощность подводимая к валу АГ;
$P_{мхв}$ – потери механические и вентиляционные;
$P_д$ – добавочные потери;
$P_{мех}$ – полная механическая мощность;
$P_{м2}$ – потери в меди обмотки ротора;
$P_{эм}$ – электромагнитная мощность, передаваемая с ротора на статор генератора;
$P_с$ – потери в стали статора;
$P_{м1}$ – потери в меди статора;
P_2 – отдаваемая генератором электрическая мощность в сеть.

Таким образом, зная подводимую мощность к валу АГ, все потери и полезную мощность генератора, к.п.д. подсчитывают по следующей формуле

$$\eta[\%] = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100.$$

Следует отметить, что ДО-АГ должен рассматриваться как трехобмоточный трансформатор, но при неизменном напряжении на его зажимах. В этом случае схема

замещения должна быть видоизменена и представлена как уточненная Г-образная схема замещения ДО-АГ представленная на рис. 7 с вынесенным на зажимы первичной цепи намагничивающего контура и возбуждения, что позволяет теоретически определить все параметры и рабочие характеристики генератора.

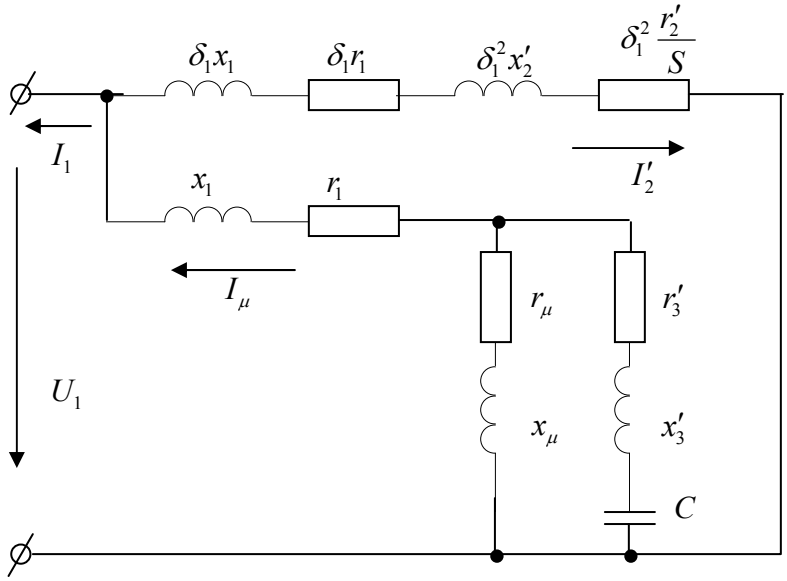


Рис.7. Уточненная Г-образная схема замещения ДО-АГ

Из Г-образной схемы замещения следует, что при $U_1=const$, ток цепи намагничивающего контура I_m при изменении скольжения S можно считать постоянным, а переменным является лишь ток главной цепи I_1.

4. Экспериментальные исследования

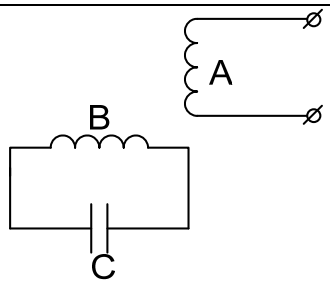
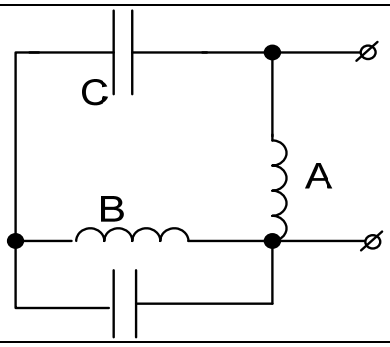
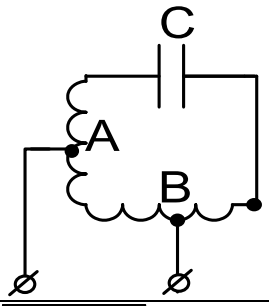
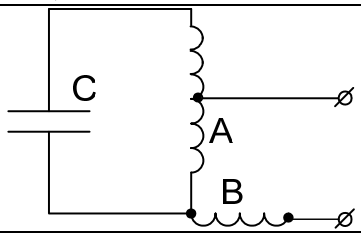
Для разработки и изготовления двухобмоточого и двухфазного АГ (ДО-2ФАГ) использована трехфазная АМ с короткозамкнутым ротором после ее электромагнитного перерасчета и перемотки статора. В пазы статора АМ уложены две обмотки – возбуждения и рабочая, выполненные на разные уровни напряжения с пространственным сдвигом на 90 электрических градусов.

Исследования ДО-2ФАГ проводятся по различным схемам, но из 7-ми предложенных схем испытаны четыре варианта схем типа IV-VII, приведенных на рис.8.

С Х Е М Ы
соединения статорных обмоток ДО-2ФАГ различного типа

Сложность основных аналитических соотношений не позволяет получить некоторые важные зависимости. Поэтому, для изучения характеристик двухобмоточного двухфазного АГ использован и экспериментальный метод исследования. Опытное исследование представляет значительный интерес, так как на основании экспериментальных данных облегчается анализ особенностей работы ДО-2ФАГ при различных схемах соединения обмоток и конденсаторов возбуждения. При этом основное внимание уделялось определению различных характеристик (внешней, нагрузочной и т.д.) в области нормальных нагрузок, так как эти характеристики дают интегральную оценку

выбора электромагнитных величин и соотношений между ними. Так называемая вольтамперная характеристика – ВАХ, выявляет влияние изменения нагрузки на выходное напряжение АГ без или с регулированием реактивного тока АМ.

	Рис.8. Электрически несвязанная, тип IV
	Рис.8. Электрически связанная, тип V
	Рис.8. Автотрансформаторная с междуфазной емкостью, тип VI
	Рис.8. Автотрансформаторная с фазной емкостью, тип VII

В заключение отметим, что совершенствование многообмоточных генераторов с конденсаторным возбуждением еще не закончено, необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, направленные на совершенствование их исполнения, повышение технико-экономических показателей, особенно при работе ААГ на двигательную нагрузку.

5.Анализ результатов и выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований ДО-2ФАГ при различных схемах соединения обмоток и конденсаторов возбуждения показывают, что определенные

технические показатели и характеристики генератора требуют предварительного изучения и проведения оптимизационных расчетов параметров АМ используемой в качестве генератора. Например, изучение влияния степени насыщения магнитной цепи, рассеяния контуров статора и ротора АМ на показатели и характеристики ААГ. Весьма важным является и выбор схемы соединения обмоток и конденсаторов возбуждения генератора, влияющий на разработку простой и надежной схемы автоматического регулирования реактивной мощностью ААГ. Выполненные исследования показывают, что предложенные и испытанные варианты схем обмоток ДО-2ФАГ с емкостным возбуждением обеспечивают дальнейшее улучшение качества показателей и характеристик ААГ в различных режимах работы.

Оценивая результаты теоретических и экспериментальных данных приведенных в таблицах Приложений 1, 2 и 3 можно сформулировать следующие выводы относительно рассматриваемого ДО-2ФАГ:

- подтверждена целесообразность применения двухобмоточного двухфазного АГ в качестве автономного источника электроэнергии;
- сравнение технических показателей ДО-2ФАГ по схемам различного типа в том числе IV÷VII типа, показало, что схема соединения обмоток и конденсатора возбуждения типа VII имеет повышенные энергетические и эксплуатационные показатели. Такое исполнение ДО-2ФАГ обеспечивает достаточно надежную работу с необходимой стабильностью выходного напряжения генератора;
- исполнение ДО-2ФАГ по схеме типа VII повышает его нагрузочную мощность, обладает высоким КПД и коэффициентом мощности при его загрузке от 30 до 120% от номинальной установленной мощности АМ;
- в разработанном генераторе уменьшается величина емкости конденсаторов возбуждения, подключаемых к обмотке повышенного напряжения генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая преимущества и перспективность применения самовозбуждающегося ААГ, а также его двухфазное исполнение с выходным напряжением 220В, возникла необходимость разработки и исследования ДО-2ФАГ с конденсаторным возбуждением. При этом были учтены требования предъявляемые к ААГ, работающему на активно-индуктивную нагрузку: это стабильность выходного напряжения генератора и устойчивость его работы в различных режимах. Следует отметить, что проведенные исследования разработанного генератора по различным схемам соединения обмоток статора с конденсатором возбуждением, позволяют считать работу АГ с расщепленной двухфазной обмоткой статора более эффективной. При этом габаритная мощность АМ используется наилучшим образом, а рост нагрузки не приводит к столь резкому снижению выходного напряжения. Кроме того, величина емкости конденсаторной батареи двухфазного АГ значительно меньше по сравнению с трехфазным исполнением АГ.

Результаты настоящей работы показывают, что имеется реальная возможность существенно улучшить характеристики и технико-экономические показатели ААГ, используя двухобмоточное двухфазное исполнение генератора по схеме типа VII с емкостной системой возбуждения и автоматического регулирования его выходного напряжения. Очевидно, что такое исполнение АГ перспективно и полезно для многих автономных источников электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехника, 1990, № 10, С.55-58.
2. Техническая электродинамика, 1990, №5, С. 70-77.
3. Электричество, 1994, №6.
4. Известия ВУЗ'ов "Электромеханика", 1990,№10, С. 12-20 и С. 66-69.
5. Техническая электродинамика, 1995, №4, С. 42-45.
6. Адаменко А.И. Однофазные конденсаторные двигатели. АНУкр., Киев, 1960, 247с.
7. Электричество, 1972, №4 , С.43-47.
8. Электричество, 1978, №8 , С.47-54.
9. Известия ВУЗов «Электромеханика», 1981, №6, с.612-617.
10. Известия ВУЗов «Электромеханика», 1977, №5, с.500-505.
11. Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. Киев, "Наукова думка", 1984, 167 с.
12. Данилевич Я.Б. и др. Параметры электрических машин переменного тока. М.-Л. "Наука", 1965, 339с.
13. Техническая электродинамика, 1983, №3, С. 53-58.
14. Важнов А.И. Электрические машины. Л., «Энергия», 1969, 768 с.

Приложение 1.

Сопоставительные показатели ДО-2ФАГ по схемам различного типа

Таблица 1 – 1

№ п/п	$U_Г^Ф$, V	$I_Г^Ф$, A	$P_Г$, W	n, об/мин	M, кГсм	$P_{мех}$, W	η	cosφ	Тип схемы, емкость возбуж.
1	220	0,93	**206**	1430	36	**529**	**0,390**	1,00	Тип IV, 30 мкФ
2	220	0,95	**204**	1320	55	**746**	**0,290**	1,00	Тип IV, 40 мкФ
3	220	0,94	**204**	1330	36	**492**	**0,415**	1,00	Тип V, 20 мкФ
4	220	0,94	**204**	1170	51	**613**	**0,330**	1,00	Тип V, 30 мкФ
5	220	0,94	**208**	1140	33	**384**	**0,537**	1,00	Тип VI, 20/20 мкФ
6	220	0,94	**208**	1070	37	**407**	**0,511**	1,00	Тип VI, 20/30 мкФ
7	220	0,93	**204**	1020	60	**629**	**0,324**	1,00	Тип VI, 30/30 мкФ
8	220	0,93	**200**	1000	50	**500**	**0,400**	1,00	Тип VI, 30/40 мкФ
9	220	0,94	**208**	1400	21	**302**	**0,688**	1,00	Тип VII, 30 мкФ
10	220	0,94	**208**	1250	34	**437**	**0,476**	1,00	Тип VII, 40 мкФ

Таблица 1 – 2

1	220	1,40	**310**	1450	49	**730**	**0,420**	1,00	Тип IV, 30 мкФ
2	220	1,40	**310**	1450	49	**730**	**0,420**	1,00	Тип IV, 40 мкФ
3	220	1,40	**310**	1430	41	**603**	**0,514**	1,00	Тип V, 20 мкФ
4	220	1,40	**300**	1250	65	**835**	**0,360**	1,00	Тип V, 30 мкФ
5	220	1,45	**320**	1190	50	**612**	**0,523**	1,00	Тип VI, 20/20 мкФ
6	220	1,45	**300**	1110	46	**525**	**0,571**	1,00	Тип VI, 20/30 мкФ
7	220	1,40	**300**	1050	66	**712**	**0,321**	1,00	Тип VI, 30/30 мкФ
8	220	1,45	**310**	1040	62	**663**	**0,467**	1,00	Тип VI, 30/40 мкФ
9	220	1,45	**310**	1440	31	**459**	**0,675**	1,00	Тип VII, 30 мкФ
10	220	1,40	**310**	1300	37	**494**	**0,627**	1,00	Тип VII, 40 мкФ

Приложение 1.

Таблица 1 – 3

№ п/п	$U_Г^Ф$, V	$I_Г^Ф$, A	$P_Г$, W	n, об/мин	M, кГсм	$P_{мех}$, W	η	cosφ	Тип схемы, емкость возбуж.
1	202	1,95	**400**	1480	52	**791**	**0,50**	1,00	Тип IV, 30 мкФ
2	202	1,95	**400**	1480	52	**791**	**0,50**	1,00	Тип IV, 40 мкФ
3	-	-	**-**	-	-	**-**	**-**	-	Тип V, 20 мкФ
4	-	-	**-**	-	-	**-**	**-**	-	Тип V, 30 мкФ
5	220	2,1	**460**	1300	63	**842**	**0,546**	1,00	Тип VI, 20/20 мкФ
6	220	2,1	**460**	1210	68	**846**	**0,544**	1,00	Тип VI, 20/30 мкФ
7	220	2,2	**460**	1170	82	**986**	**0,466**	1,00	Тип VI, 30/30 мкФ
8	220	2,15	**470**	1100	78	**858**	**0,548**	1,00	Тип VI, 30/40 мкФ
9	**220**	**1,40**	**410**	**1460**	**31**	**465**	**0,880**	**1,00**	**Тип VII, 30 мкФ**
10	220	2,15	**480**	1400	50	**720**	**0,666**	1,00	Тип VII, 40 мкФ

Приложение 2.

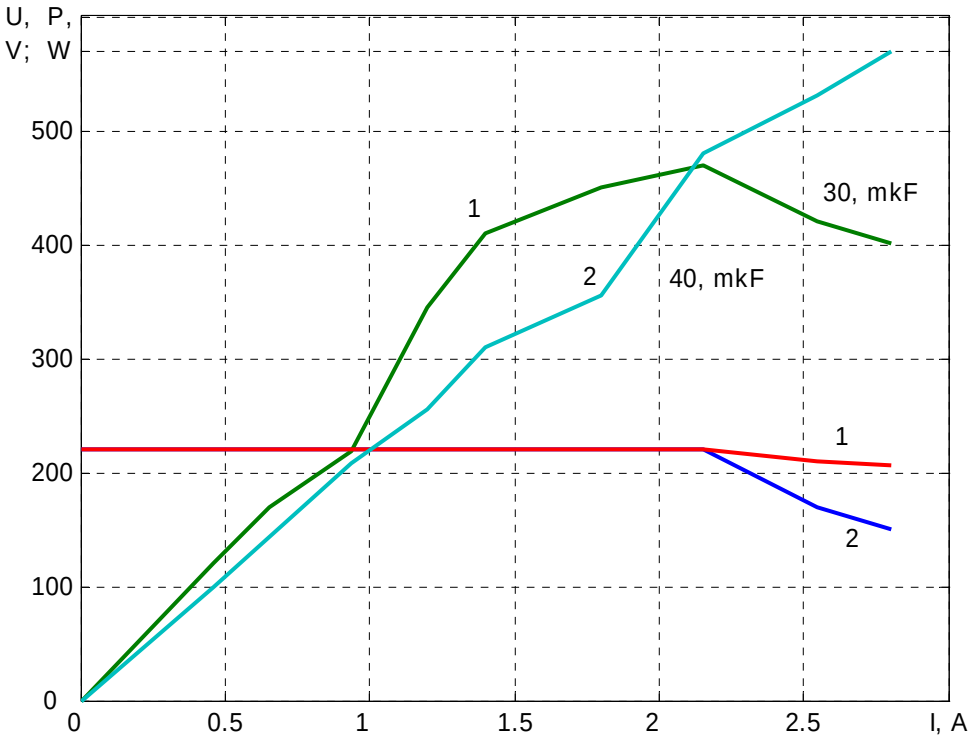
Технические показатели ДО-2ФАГ по схеме типа VII

Таблица 2 – 1

№ п/п	$U_Г^Ф$, V	$I_Г^Ф$, A	$P_Г$, W	n, об/мин	M, кГсм	$P_{мех}$, W	η	cosφ	Примечание
1	220	-	**-**	1330	9	**123**	**-**	-	$C_{воз}$=30 мкФ, х.х.
2	220	0,46	**120**	1360	18	**252**	**0,476**	1,00	Нагрузочный режим
3	220	0,65	**170**	1380	19	**293**	**0,588**	1,00	Нагрузочный режим
4	220	0,94	**218**	1400	21	**302**	**0,688**	1,00	Нагрузочный режим
5	220	1,20	**345**	1430	27	**405**	**0,851**	1,00	Нагрузочный режим
6	**220**	**1,40**	**410**	**1460**	**31**	**465**	**0,880**	**1,00**	**Нагрузочный режим**
7	220	1,80	450	1510	33	515	0,870	1,00	Нагрузочный режим
8	220	2,15	**470**	1570	36	**581**	**0,808**	1,00	Нагрузочный режим
9	170	2,55	**420**	1620	35	**587**	**0,715**	1,00	Нагрузочный режим
10	150	2,80	**400**	1700	34	**596**	**0,683**	1,00	Нагрузочный режим
1	220	-	**-**	1180	17	**206**	**-**	-	$C_{воз}$=40 мкФ, х.х.
2	220	0,46	**100**	1210	20	**249**	**0,400**	1,00	Нагрузочный режим
3	220	0,94	**208**	1250	34	**437**	**0,476**	1,00	Нагрузочный режим
4	220	1,20	**255**	1270	35	**454**	**0,549**	1,00	Нагрузочный режим
5	220	1,40	**310**	1300	37	**494**	**0,627**	1,00	Нагрузочный режим
6	220	1,80	**355**	1360	43	**545**	**0,651**	1,00	Нагрузочный режим
7	220	2,15	**480**	1400	50	**720**	**0,666**	1,00	Нагрузочный режим
8	210	2,55	**530**	1450	53	**794**	**0,674**	1,00	Нагрузочный режим
9	206	2,80	**570**	1500	54	**833**	**0,684**	1,00	Нагрузочный режим

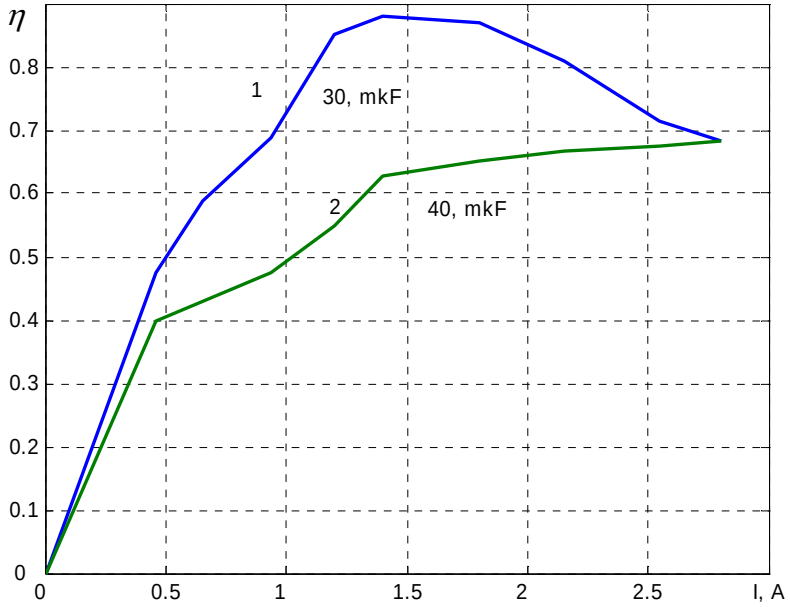
Приложение 3

График 3-1



Внешняя и нагрузочная характеристики ДО-2ФАГ (схема тип VII).

График 3-2



Коэффициент полезного действия ДО-2ФАГ (схема тип VII).

SYNCHRONOUS BALANCED OPERATION OF OPEN-END WINDING MOTOR DRIVE WITH TWO ISOLATED DC-SOURCES

V. Oleschuk, G. Griva, R. Prudeak, A. Sizov

Abstract. Novel method of synchronized pulsewidth modulation (PWM) has been applied for balanced control of dual inverter-fed drive with an open-end-winding induction motor, supplied by two isolated dc-sources. Simulations give the behavior of dual inverter-fed systems with continuous and discontinuous versions of synchronized PWM.

Keywords: cascaded voltage source inverters, open-end winding induction motor, synchronized pulse-width modulation, dc-voltage sources, power balancing.

FUNCȚIONARE ECHILIBRATĂ A ACȚIONĂRILOR ELECTRICE CU MOTOR CU ÎNFĂŞURĂRILE ÎN GOL ŞI DOUĂ SURSE IZOLATE DE CURENT CONTINUU

V. Olesciuk, G. Griva, R. Prudeak, A. Sizov

Rezumat. Noua metodă a modulării în durate a impulsurilor (PWM) sincronizate a fost aplicată pentru controlul echilibrat de acționar electric pe bază de motorul asincron cu înfăşurările în gol, acesta fiind alimentat de două surse izolate de curent continuu (CC). Sunt prezentate rezultatele simulărilor sistemului cu varianta continuă si discontinuă a PWM sincronizate.

Cuvinte-cheie: invertoare de tensiune in serie, motor asincron cu înfăşurări în gol, modularea în durate a impulsurilor sincronizate, surse de tensiune continuă, echilibrarea puterilor.

СИНХРОННОЕ СБАЛАНСИРОВАННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ С РАЗОМКНУТЫМИ ОБМОТКАМИ И С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В. Олещук, Дж. Грива, Р. Прудяк, А. Сизов

Аннотация. Новый метод синхронной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) использован для сбалансированного управления электроприводом на базе двигателя с разомкнутыми обмотками, регулируемого при помощи двух инверторов напряжения, связанных с двумя изолированными источниками электропитания. Приведены результаты моделирования системы с непрерывной и прерывистой разновидностями синхронной векторной ШИМ.

Ключевые слова: каскадно-соединенные инверторы напряжения, электродвигатель с разомкнутыми обмотками, синхронная широтно-импульсная модуляция, баланс мощностей источников электропитания.

I. INTRODUCTION

Multilevel and multiphase converters and drives are a subject of increasing interest in the last years due to some advantages compared with conventional three-phase systems. Cascaded (dual) two-level converters which utilize two standard three-phase voltage source inverters are now perspective topology for different high power applications [1]-[3].

The structure of the adjustable speed drive system based on cascaded converter is constructed by splitting the neutral connection of the induction motor and connecting both ends of each phase coil to a two-level inverter. In this case cascaded converters are capable of producing voltages which are identical to those of three-level and four-level converters [3].

Dual two-level inverter-fed open-end winding motor drives have some advantages such as redundancy of the space-vector combinations and the absence of neutral point fluctuations [4]. These new drive topologies provide also the best possible use of different types of semiconductor switches [3]-[5]. So, between perspective fields of application of these systems

there are high power/high current traction drives, like ship propulsion, locomotive, electrical vehicles, etc. In particular, flexible PWM control of dual two-level inverters can provide increased effectiveness of these traction systems.

Different modulation techniques are used for control of dual inverter-fed adjustable speed drives. In particular, phase-shift carrier-based PWM was used for multilevel output voltage generation in [1]. Also some typical schemes of conventional space-vector modulation have been applied to basic topologies of cascaded converters consisting of two standard two-level voltage source inverters [4]-[7].

Almost all versions of conventional space-vector PWM are based on the asynchronous principle, which results in sub-harmonics (of the fundamental frequency) in the spectrum of the output voltage of converters, that are very undesirable in most medium/high power applications [8],[9]. In order to provide synchronous phase voltage control in dual inverter-fed drives, allowing to avoid of undesirable even harmonics and sub-harmonics in the output voltage of the drive systems with increased power rating, a novel method of synchronized modulation has been applied for control of dual inverter-fed open-end winding motor drives with single dc voltage source [10], and with two separate dc sources (without power balancing between sources) [11].

This paper is focused on investigation of dual inverter-fed drives with algorithms of synchronized PWM, providing continuous control of power sharing between two separate dc sources, in dependence with the magnitudes of its voltages and the required power ratio between the dc-link sources.

II. TOPOLOGY OF A DUAL INVERTER-FED OPEN-END WINDING DRIVE

Fig. 1 presents the basic structure of a dual inverter-fed open-end winding induction motor drive with two standard voltage source inverters with pulsewidth modulation, which are supplied by two separate dc-link sources with voltages V_{dc1} and V_{dc2} [3]. Separate dc supply is used for each inverter to block the flow of third harmonic currents.

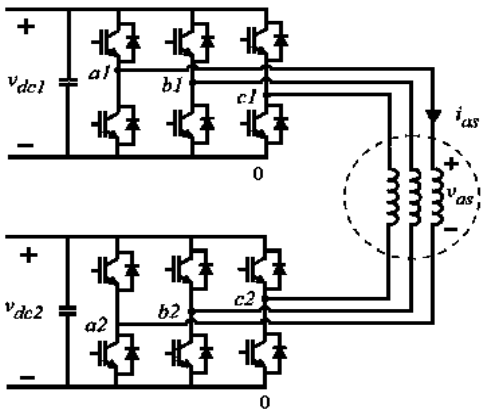


Fig. 1. Basic topology of dual inverter-fed open-end winding motor drive with two dc-links

III. PROPERTIES OF THE METHOD OF SYNCHRONIZED PWM

In order to avoid asynchronism of conventional space-vector modulation, a novel method of synchronized PWM [12],[13] can be used for control of each inverter in dual inverter-fed drives with open-end winding of induction motor.. In particular, this method of synchronized PWM is based on continuous synchronization of the positions of all central switch-on signals in the centres of the 60^0-clock-intervals (to fix positions of these signals in the centres of the 60^0-cycles), and then – to generate symmetrically around the centres of the 60^0-clock-intervals all other active control signals.

Table 1 presents generalized properties and basic control correlations for the proposed

method of synchronized PWM. It is also compared here with conventional asynchronous space-vector modulation. Basic control functions are available for both undermodulation and overmodulation control zones in this case. A more detailed description of laws and algorithms of synchronized PWM based on either algebraic or trigonometric control functions is in [12], [13].

Table 1. Basic parameters of PWM methods

Control (modulation) parameter	Conventional schemes of vector PWM	Proposed method of modulation	
Operating and max parameter	Operating & max voltage V and V_m	Operating & maximum fundamental frequency F and F_m	
Modulation index m	V / V_m	F / F_m	
Duration of sub-cycles	T	τ	
Center of the k-signal	α_k (angles/degr.)	$\tau(k-1)$ (sec)	
		Algebraic PWM	Trigonometric PWM
Switch-on durations	$T_{ak} = 1.1mT[\sin(60^0 - \alpha_k) + \sin\alpha_k]$ $t_{ak} = 1.1mT\sin\alpha_k$ $t_{bk} = 1.1mT \times \sin(60^0 - \alpha_k)$	$\beta_k = \beta_1[1 - A \times (k-1)\tau F K_{ov1}]$ $\gamma_k = \beta_{i-k+1}[0.5 - 6(i-k)\tau F]K_{ov2}$ $\beta_k - \gamma_k$	$\beta_k = \beta_1 \times \cos[(k-1)\tau K_{ov1}]$ $\gamma_k = \beta_{i-k+1}[0.5 - 0.9tn(i-k)\tau]K_{ov2}$ $\beta_k - \gamma_k$
Switch-off states (zero voltage)	$t_{0k} = T - t_{ak} - t_{bk}$	$\lambda_k = \tau - \beta_k$	
Special parameters providing synchronization of the process of PWM		$\beta'' = \beta_1[1 - A \times (k-1)\tau F K_{ov1}]K_s$ $\lambda' = (\tau - \beta'') \times K_{ov1}K_s$	$\beta'' = \beta_1 \times \cos[(k-1)\tau K_{ov1}]K_s$ $\lambda' = (\tau - \beta'') \times K_{ov1}K_s$

IV. SYNCHRONOUS BALANCED CONTROL OF DUAL INVERTER-FED DRIVE

Synchronous symmetrical control of the output voltage of each inverter of the dual inverter-fed drive system in accordance with algorithms of synchronized PWM provides synchronous symmetrical regulation of voltage in the induction machine phase windings. Rational phase shift between output voltage waveforms of the two inverters is equal in this case to one half of the switching interval (sub-cycle) τ [1].

In the case, when the two dc-link voltage sources have the same voltage ($V_{dc2} = V_{dc1}$), the resulting voltage space-vectors are equal to the space-vector patterns of conventional three-level inverter [1],[3],[7]. The phase voltage V_{as} of the dual inverter-fed drive with two insulated dc-link sources (Fig. 1) is calculated in accordance with (1)-(2) [4]:

$$V_0 = 0.333(V_{a1} + V_{b1} + V_{c1} + V_{a2} + V_{b2} + V_{c2}) \quad (1)$$

$$V_{as} = V_{a1} + V_{a2} - V_0 \quad (2)$$

where V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}, V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} are the corresponding pole voltages of each three-phase inverter, V_0 is the zero sequence (triplen harmonic components) voltage.

In order to provide the rated ratio P_1/P_2 between the powers of two dc sources with equal dc-link voltages for standard scalar V/F control of dual inverter-fed drives, it is necessary to provide a simple correlation between modulation indices m_1 and m_2 of the two inverters and

the rated power ratio in accordance with (3):

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{P_1}{P_2} \tag{3}$$

As an illustration, Fig. 2 and Fig. 3 present the pole voltages V_{a1}, V_{a2}, line-to-line voltages V_{a1b1}, V_{a2b2} of the two inverters, and the phase voltage V_{as} (with its spectrum) of the dual inverter-fed drive with equal power distribution ($P_1 = P_2$) between the two dc sources with equal voltages. Continuous (Fig. 2) and discontinuous (Fig. 3) schemes of synchronized PWM have been used for control of the two inverters with low average switching frequency equal to *900 Hz*. The fundamental frequency is *F=35Hz* (modulation indices $m_1=m_2=0.7$).

In the case of unequal power distribution between the dc-link sources, the modulation indices of the two inverters have to be controlled in accordance with (3). In particular, if $P_1 = 0.5P_2$, $m_1 = 0.5m_2$. Figs. 4 – 5 show the corresponding voltage waveforms for this control mode, together with the spectrum of the phase voltage V_{as}, for the dual inverter-fed drive system (with unequal power balancing between dc sources) with synchronized continuous (Fig. 4) and discontinuous (Fig. 5) PWM.

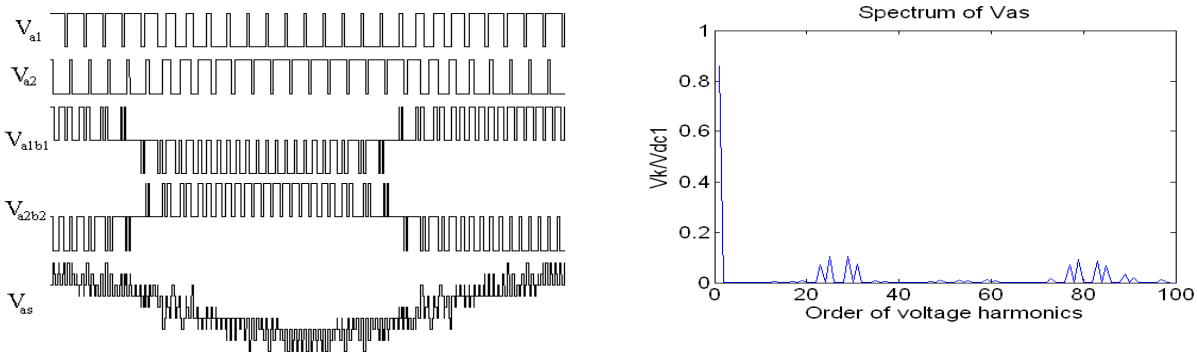


Fig. 2. Pole voltages V_{a1} and V_{a2}, line voltages V_{a1b1} and V_{a2b2}, and phase voltage V_{as} (with its spectrum) for dual inverter-fed drive with continuous synchronized PWM ($P_1=P_2$).

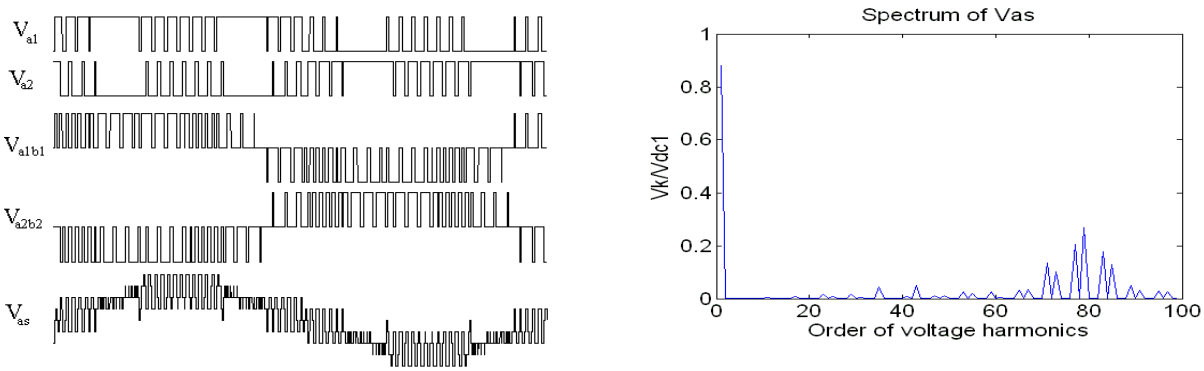


Fig. 3. Pole voltages V_{a1} and V_{a2}, line voltages V_{a1b1} and V_{a2b2}, and phase voltage V_{as} (with its spectrum) for dual inverter-fed drive with discontinuous synchronized PWM ($P_1=P_2$)

Algorithms of synchronized PWM provide continuous synchronization of the motor phase voltage V_{as} of dual inverter-fed drives with both balanced and unbalanced power of two dc sources, and its spectra do not include even harmonics and sub-harmonics, which is especially important for high power drives.

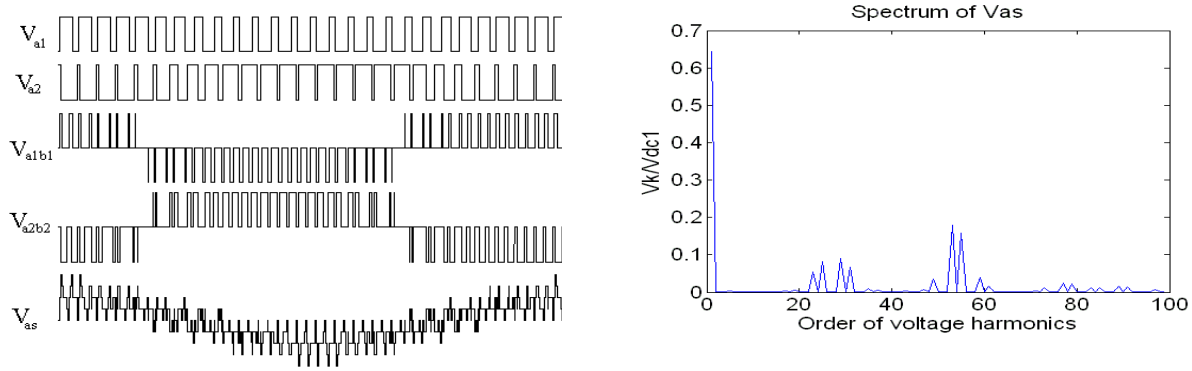


Fig. 4. Pole voltages V_{a1} and V_{a2}, line voltages V_{a1b1} and V_{a2b2}, and phase voltage V_{as} (with its spectrum) for dual inverter-fed drive with continuous synchronized PWM ($P_1=0.5P_2$)

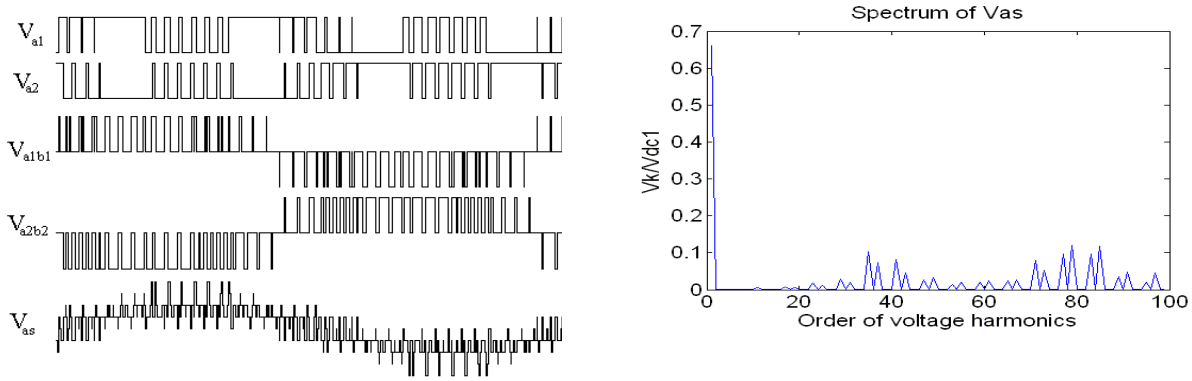


Fig. 5. Pole voltages V_{a1} and V_{a2}, line voltages V_{a1b1} and V_{a2b2}, and phase voltage V_{as} (with its spectrum) for dual inverter-fed drive with discontinuous synchronized PWM ($P_1=0.5P_2$).

Fig. 6 presents the calculation results of the Weighted Total Harmonic Distortion factor (*WTHD*) for the phase voltage V_{as} (averaged values of $WTHD = (1/V_1)\sqrt{\sum_{i=2}^{1000}(V_i/i)^2}$) in dual inverter-fed drive with continuous (CPWM) and discontinuous (DPWM) synchronized PWM for the systems with both equal ($P_1=P_2$) and unequal ($P_1=0.5P_2$) power distribution between the two dc sources with the same voltage magnitude ($V_{dc1}=V_{dc2}$). The average switching frequency for each inverter is *900 Hz*, the control mode corresponds to standard *V/F* control. The results presented in Fig. 6 show that discontinuous scheme of synchronized PWM provides better spectral composition of the phase voltage at higher modulation indices for the systems with both balanced and unbalanced power sharing between two dc sources.

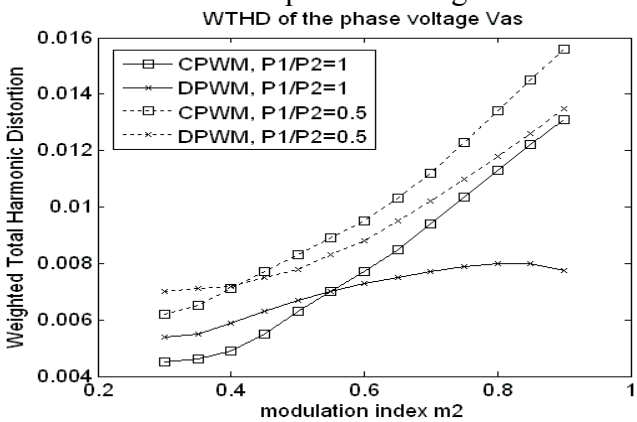


Fig. 6. Averaged *WTHD* factor of the phase voltage versus modulation index m_2

For the dual inverter-fed drive with different voltages of the dc-links, in order to provide the rated power ratio P_1/P_2 between two power sources (for scalar *V/F* control mode), it is necessary to provide the corresponding correlations between magnitudes of dc voltages, modulation indices of the two inverters and the rated power ratio in accordance with (4):

$$\frac{m_1 V_{dc1}}{m_2 V_{dc2}} = \frac{P_1}{P_2} \tag{4}$$

In particular, in the case of equal power distribution between two dc sources ($P_1=P_2$), it is necessary to provide a simple linear correlation between magnitudes of dc voltages and modulation indices of the two inverters:

$$m_1 V_{dc1} = m_2 V_{dc2} \tag{5}$$

If, as an example, $V_{dc1} = 0.6V_{dc2}$, in this case $m_2 = 0.6m_1$.

In the case of unbalanced power distribution between the two dc voltage sources with different voltages, (4) should be used for determination of the ratio of modulation indices of the two inverters of the dual inverter-fed drive system. If, as an example, $V_{dc1}=0.6V_{dc2}$ and $P_1/P_2=0.5$, in this case $m_1=0.833m_2$. For illustration of this control mode, Fig. 7 and Fig. 8 present the pole voltages V_{a1}, V_{a2}, line-to-line voltages V_{a1b1}, V_{a2b2} of the two inverters, and the phase voltage V_{as} (with its spectrum) of the dual inverter-fed drive with unequal power distribution ($P_1=0.5P_2$) between the two dc sources with different voltages ($V_{dc1} = 0.6V_{dc2}$). Curves in Fig. 7 correspond to continuous version of synchronized PWM, and curves in Fig. 8 correspond to discontinuous synchronized PWM. The average switching frequency is *900 Hz*, and the fundamental frequency *F=35Hz*. Modulation indices of the two inverters in accordance with (4) are (for scalar *V/F* control): $m_2=0.7$ and $m_1=0.58$.

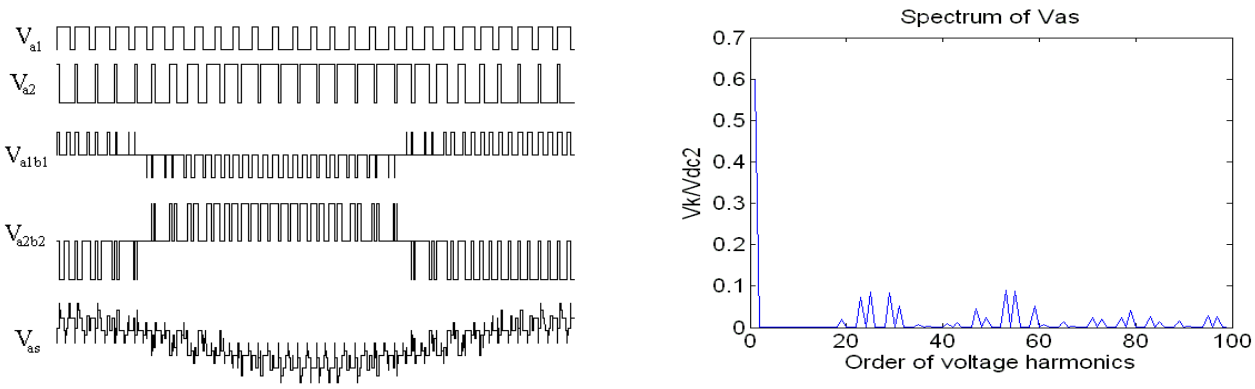


Fig. 7. Pole voltages V_{a1} and V_{a2}, line voltages V_{a1b1} and V_{a2b2}, and phase voltage V_{as} (with its spectrum) for dual inverter-fed drive with continuous synchronized PWM ($V_{dc1} =0.6V_{dc2}$, $P_1=0.5P_2$)

Analysis of spectral characteristics of the phase voltage of the dual inverter-fed drive show, that due to the algorithms of synchronized PWM the spectra of the phase voltage do not contain even harmonics and sub-harmonics for any control regime of the drives, with both equal and different voltages of the two dc sources, for any power ratio between the power sources. It is especially important for power conversion systems with increased power ratings. Voltage synchronization in the system is provided continuously for any ratio between the switching and fundamental frequencies. In particular, phase voltage spectral compositions in Fig. 9 and Fig. 10 present the calculation results of the Weighted Total Harmonic Distortion

factor (*WTHD*) for the phase voltage V_{as} of the dual inverter-fed drive with continuous (CPWM) and discontinuous (DPWM) schemes of synchronized PWM for the system with different dc-link voltages (V_{dc1} $=0.6V_{dc2}$) with both equal power distribution between dc sources (Fig. 9: $P_1=P_2$,) and unequal power of dc-links (Fig. 10: $P_1/P_2=0.5$). Figs. 2 - 5 and Figs. 7 - 8 correspond to a fractional ratio of these frequencies (*900Hz/35Hz=25.7*).

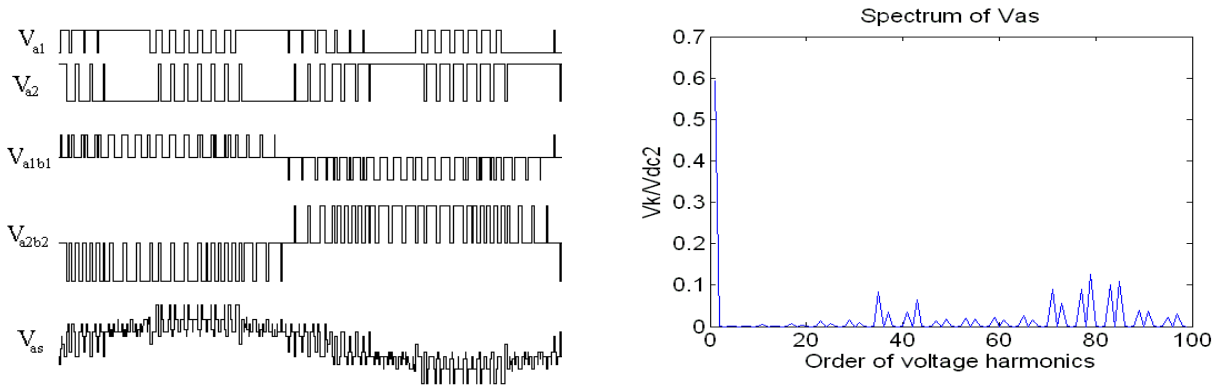


Fig. 8. Pole voltages V_{a1} and V_{a2}, line voltages V_{a1b1} and V_{a2b2}, and phase voltage V_{as} (with its spectrum) for dual inverter-fed drive with discontinuous synchronized PWM ($V_{dc1}=0.6V_{dc2}$, $P_1=0.5P_2$)

In accordance with (4)-(5), $m_2=0.6m_1$ for the first case, and $m_1=0.833m_2$ for the second case. The average switching frequency of each modulated inverter is *900 Hz*, control mode corresponds to standard scalar *V/F* control.

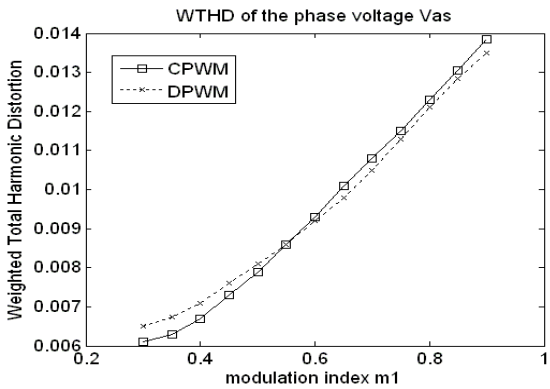


Fig. 9. Averaged *WTHD* factor of the phase voltage versus modulation index m_1 ($V_{dc1}= 0.6V_{dc2}$, $P_{1=}P_2$)

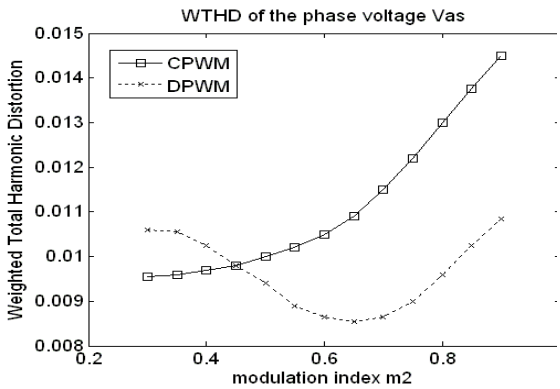


Fig. 10. Averaged *WTHD* factor of the phase voltage versus modulation index m_2 ($V_{dc1}=0.6V_{dc2}$, $P_1=0.5P_2$)

Analysis of the simulation results for dual inverter-fed drives shows that the choice of the rational PWM scheme is in strong dependence from magnitudes of dc voltages and required power balancing between dc-links. In particular, for the system where $V_{dc1}=0.6V_{dc2}$ and $P_1=P_2$ (see Fig. 9), both continuous and discontinuous versions of synchronized pulsewidth modulation provide almost the same quality of the phase voltage. And, as an example, for other operating conditions, when $V_{dc1}=0.6V_{dc2}$ and $P_1=0.5P_2$ (see Fig. 10), discontinuous scheme of synchronized PWM provide better spectral composition of the phase voltage at medium and higher modulation indices.

Method of synchronized modulation, applied to dual inverter-fed drives, is well suited for synchronous control of the motor phase voltage of the drive system during overmodulation. In particular, basic control correlations of this method (see Table I) include two special linear

functions (coefficients) of overmodulation K_{ov1} and K_{ov2} [14]. Both in the undermodulation and overmodulation control zones, the spectra of the phase voltage of an open-end winding motor drive with synchronized PWM contain only odd harmonics (without triplen harmonics), for any ratios (integral or fractional) between the switching and fundamental frequencies of dual inverters. The proposed PWM techniques provide also smooth shock-less pulses-ratio changing in cascaded inverters of balanced ac drive system during the whole control range.

V. CONCLUSION

Algorithms of synchronized PWM, applied for control of dual inverter-fed drives with two isolated dc-links and based on simple phase-shift technique of signals of dual inverters, provide both continuous phase voltage synchronization and required sharing of the output power between two dc sources during the whole control range, including the zone of overmodulation.

Regulated power sharing between two dc sources is provided in dual inverter-fed drives with synchronized PWM in accordance with simple linear correlations between the rated power ratio of the dc-links, the magnitudes of the dc voltages and modulation indices of the two inverters. The spectra of the motor phase voltage of the drive systems with synchronized pulsewidth modulation do not contain even harmonics and sub-harmonics for any ratio between the switching frequency and fundamental frequency, and for any variations of voltage amplitudes and power distribution between dc sources, which is especially important for the medium power and high power systems.

REFERENCES

[1] H. Stemmler and P. Guggenbach, “Configurations of high power voltage source inverter drives”, *Proc. of the European Power Electr. Conf. (EPE’93)*, pp. 7-12.

[2] H. Stemmler, “High-power industrial drives”, *IEEE Proc.,* vol. 82, no. 8, 1994, pp. 1266-1286.

[3] K.A. Corzine, S.D. Sudhoff and C.A. Whitcomb, “Performance characteristics of a cascaded two-level converter”, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, 1999, pp. 433-439.

[4] E.G. Shivakumar, K. Gopakumar, S.K. Sinha, A. Pittet and V.T. Ranganathan, “Space vector PWM control of dual inverter fed open-end winding induction motor drive”, *Proc. of the IEEE Appl. Power Electr. Conf (APEC’2001),* pp. 399-405.

[5] E.G. Shivakumar, V.T. Somasekhar, K.K. Mohapatra, K. Gopakumar, L. Umanand and S.K. Sinha, “A multi level space phasor based PWM strategy for an open-end winding induction motor drive using two inverters with different dc-link voltages”, *Proc. of the IEEE Power Electr. and Drive Syst. Conf. (PEDS’2001)*, pp. 169-175.

[6] M.R. Baiju, K.A. Mohapatra, R.S. Kanchan and K. Gopakumar, “A dual two-level inverter scheme with common mode voltage elimination for an induction motor drive”, *IEEE Trans. Power Electr.,* vol. 19, no. 3, 2004, pp. 794-805.

[7] G. Grandi, C. Rossi, A. Lega and D. Casadei, “Multilevel operation of a dual two-level inverter with power balancing capability”, *CD-ROM Proc. of the IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. (IAS’2006)*, 8 p.

[8] J. Holtz, “Pulsewidth modulation – a survey”, *IEEE Trans. Ind. Electr.*, vol. 39, no. 5, 1992, pp. 410-420.

[9] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, *Power Electronics*, 3rd ed. - John Wiley & Sons, 2003.

[10] V. Oleschuk, F. Profumo, G. Griva, R. Bojoi and A.M. Stankovic, "Analysis and comparison of basic schemes of synchronized PWM for dual inverter-fed drives", *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Ind. Electr. (ISIE'2006)*, pp. 2455-2461.
[11] V. Oleschuk, A. Sizov, F. Profumo, A. Tenconi and A.M. Stankovic, "Multilevel dual inverter-fed drives with synchronized PWM", *CD-ROM Proc. of the Power Electr. Spec. Conf. (PESC'2006),* 7 p.
[12] V. Oleschuk and F. Blaabjerg, "Direct synchronized PWM techniques with linear control functions for adjustable speed drives", *Proc. of the IEEE Appl. Power Electr. Conf. (APEC'2002)*, pp. 76-82.
[13] V. Oleschuk, F. Blaabjerg and B.K. Bose, "Triphase cascaded converters with direct synchronous pulsewidth modulation", *Automatika*, vol. 44, no. 1-2, 2003, pp. 27-33.
[14] V. Oleschuk, V. Ermuratski and E.M. Chekhet, "Drive converters with synchronized pulsewidth modulation during overmodulation", *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Ind. Electr. (ISIE'2004)*, pp. 1339-1344.

Valentin Oleschuk, D.Sc. is Director of the Research Laboratory of the Power Engineering Institute of the Academy of Sciences of Moldova. He is author and co-author of two books and more than 210 publications in the area of power electronics and electric drives, including more than 60 publications in the IEEE transactions and proceedings. He is also the author of 89 patents and authors certificates in this field. His research interests include control and modulation strategies for perspective topologies of power converters and drives.

Giovanni Griva, PhD, is Associate Professor of the Politecnico di Torino, Turin, Italy. He is author and co-author of more than 90 technical papers published in international journals and proceedings of international conferences. His scientific interests regard power conversion systems, adjustable speed electric drives and non conventional actuators.

Roman Prudeak is PhD Student of the Power Engineering Institute of the Academy of Sciences of Moldova. He is author of several technical papers in the field of power electronics and electric Drives. His research interests include both feedforward and feedback control methods and techniques for power converters and drives.

Alexandr Sizov is Scientific Collaborator of the Laboratory of Automated Electric Drives of the Power Engineering Institute of the Academy of Sciences of Moldova. He is author and co-author of more than 50 publications and 10 patents and authors certificates. His research interests include elaboration, modelling and simulation of control algorithms and control systems for power electronic converters and drive systems.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНВАРИАНТНЫХ СВОЙСТВ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.А. Пенин
Институт инженерной электроники и промышленных технологий академии наук Молдовы

Аннотация. Определяются значения параметров режимов относительно характерных значений регулировочной характеристики импульсного регулятора напряжения. Изменение режима и соответствие между различными параметрами режима рассматривается как геометрическое (проективное) преобразование. Это позволяет обосновать определение режимов, ограничить область их изменений на восходящем участке регулировочной характеристики, провести линеаризацию этой характеристики, сравнить разные импульсные регуляторы напряжения.
Ключевые слова: импульсные регуляторы напряжения, преобразователи напряжения, режимы работы, проективные преобразования.

ANALIZA REGIMURILOR REGULATOARELOR DE TENSIUNE DE IMPULS ÎN BAZA PROPRIETĂȚILOR INVARIANTE ALE CARACTERISTICILOR DE REGLARE

A.A. Penin
Institutul de Inginerie Electronică şi Tehnologii Industriale al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. Se determină valorile parametrilor regimurilor relativ valorilor inerente ale caracteristicii de reglare a regulatorului cu impuls.. Variaţia regimului şi concordanţa între diferiţi parametri ai regimului este precăutată ca o convertizare geometrică (proiectivă). Aceasta permite întemeierea definiţiei regimurilor, limitarea zonei lor de variaţie pe sectorul de creştere a caracteristicii de reglare, realizarea linearizării acestei caracteristici, compararea diferitor tipuri de regulatoare de impuls.
Cuvinte-cheie: regulatoarele şi convertizoarele cu impuls, caracteristici de reglare, stabilirea şi compararea regimurilor, convertizare proiectiva.

REGIMES ANALYSIS OF THE VOLTAGE PULSE REGULATORS ON THE BASIC OF THE INVARIANCE PROPERTY OF THE CONTROL CHARACTERISTICS

A.A. Penin
Institute of the engineering electronics and industrial technologies of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. Regime characteristic values are determined relative to character values of regulation curve of switching regulator. Regime changing and the correspondence between various regime parameters are examined as a geometric (projective) transformation. This makes possible to validate the regime definition, to restrict the range of their variation on the rising area of the control characteristic, to realize the linearization of this characteristic, to compare different pulse regulators.
Keywords: solar energy, switching boost and buck-boost regulators and voltage converters, control characteristics, regime determination and comparison, projective transformations, hyperbolic metric.

Постановка задачи

В системах электропитания на основе, например, солнечных батарей удобно использовать импульсные регуляторы повышающего типа [1]. Это позволяет максимально использовать напряжение солнечной батареи, которое изменяется в широких пределах (изменение освещенности, затемнение или отказ отдельных ячеек самой батареи). В устройствах управления такими регуляторами или преобразователями напряжения все в большей степени используются средства

микропроцессорной техники [2], что не только повышает функциональные возможности (контроль, защита, функции наблюдения), но и качество управления. В частности, прямое цифровое или программное управление, основанное на прогнозирующих расчетах длительности импульсов управления силовых ключей, позволяет улучшить качество стабилизации напряжения нагрузки [3]. В этом случае структура системы управления и алгоритм управления не сводятся просто к цифровой реализации аналоговой системы с контуром обратной связи. Также системы управления выполняются с отслеживанием предельно допустимых значений отклонений контролируемого параметра режима. Поэтому удается предотвратить развитие аварийного процесса и нежелательные переходные процессы еще до достижения контролируемым параметром граничных значений допуска [4,5].

Повышающие, инвертирующие импульсные регуляторы и, соответственно, обратно-ходовые преобразователи напряжения обладают нелинейной и двузначной регулировочной характеристикой. Поэтому используется только ее восходящий участок и принимаются меры для исключения захода рабочей точки при регулировании за точку максимального напряжения нагрузки. Также усложняется задача обеспечения точности и устойчивости регулятора с контуром обратной связи [6].

В связи с этим возникает необходимость в сопоставлении или задании режима регулятора относительно максимально допустимых значений длительности импульсов управления, напряжения управления и напряжения нагрузки, т.е. в обоснованном определении относительных значений параметров режима. Это позволит оценить, например, запас по напряжению регулирования, напряжению нагрузки, сопоставить разные по параметрам преобразователи (эквивалентность или равенство изменяемых в широком диапазоне режимов в смысле теории подобия [7]), использовать эти данные в расчетах прямого цифрового управления, осуществить линеаризацию регулировочной характеристики в широком диапазоне изменения напряжения нагрузки.

Относительные значения по сложившейся практике в «процентах» или «разах» составляются с помощью только одного характерного или максимального значения (как масштаба или базового значения) соответствующего параметра режима. Поэтому можно непосредственно применить к понижающему регулятору, который обладает однозначной и линейной регулировочной характеристикой.

Такой подход является одним из возможных видов определения в геометрии такого понятия как расстояния между точками прямой (кривой) или длины отрезка. Если таких характерных значений больше, то естественно использовать известные, более общие определения расстояния, что дает необходимое обоснование относительным выражениям и исключает возможные противоречия при применении. В таком плане автором проведен анализ системы электропитания, содержащей источник питания ограниченной мощности (источник напряжения с внутренним сопротивлением) и идеализированный регулируемый преобразователь напряжения [8]. Такая система характеризуется также двузначной регулировочной характеристикой. Полученные выражения для относительных значений параметров режима инвариантно (независимо) выражаются через коэффициент передачи по напряжению (коэффициент трансформации) n преобразователя и напряжение нагрузки U_H. На этой основе обоснованны определения изменений по n и U_H, которые согласованы между собой по структуре выражений. Предложенные выражения для относительных значений параметров режима и их изменений обладают групповыми свойствами, что делает удобным перерасчет последующих изменений режима и гарантированно обеспечивает работу на заданном участке характеристики. Учитывая, что выражение для регулировочной характеристики рассмотренной системы совпадает с выражением для статической характеристики повышающего регулятора в режиме непрерывного тока

дросселя, то представляет интерес применить полученные результаты к поставленной выше задаче. Методически будет целесообразно изложить сначала определения режима для понижающего регулятора (как наиболее простого случая) строго в соответствии с геометрическими представлениями о понятии движения точки и длины отрезка.

1. Сравнительный анализ выражений режимов для понижающего и повышающего регуляторов

Выражение для статической регулировочной характеристики $U_H(\gamma)$ понижающего регулятора в режиме непрерывного тока дросселя с источником питания U_0, нагрузкой R_H, потерями дросселя R имеет следующий вид [9]:

$$U_H = \frac{U_0}{1+\frac{R}{R_H}}\gamma = \frac{U_0}{1+\sigma^2}\gamma, \qquad (1.1)$$

где $\gamma = \frac{t}{T}$ - относительная длительность импульсов управления или коэффициент заполнения, t - фактическая длительность импульсов управления, T - период повторения, как базовая величина, σ^2 - относительное значение потерь.

В данном случае γ является просто числом в виде уже упомянутых процентах или «разах». Далее ставим вопрос – как выразить соотношение (1.1) в относительном виде, чтобы сопоставить режимы разных по параметрам регуляторов и обеспечить, к примеру, эквивалентность самих режимов и их изменения.

Возникают следующие варианты. Можно ввести величину $\overline{U}_H = \frac{U_H}{U_0}$, где U_0 принято за базовую величину. Тогда

$$\overline{U}_H = \frac{1}{1+\sigma^2}\gamma. \qquad (1.2)$$

Это выражение содержит параметр σ, разный для сравниваемых регуляторов. Поэтому нет критерия для сравнения самих режимов. Теперь рассмотрим изменение режима $\gamma^1 \to \gamma^2$ и выразим изменение режима в виде отношения $\frac{\overline{U}_H^2}{\overline{U}_H^1} = \frac{\gamma^2}{\gamma^1}$.

Видно, что такое определение изменения режима не зависит от параметров сравниваемых регуляторов. Таким образом, уже есть инвариант или величина, которая одинаковым образом выражается через разные переменные типа $\overline{U}_H, \gamma$. Поэтому такой инвариант естественно использовать в качестве величины изменения режима. Обычно изменение режима задаётся через приращение. Пусть последующее значение $\gamma^2 = \gamma^1 + \gamma^{21}$. Тогда приращение напряжения нагрузки $\overline{U}_H^{21}$ зависит от параметра регулятора.

Следующий очевидный вариант. Можно ввести

$$\hat{U}_H = \frac{U_H}{U_{HM}} = \gamma, \qquad (1.3)$$

где $U_{HM} = \dfrac{U_0}{1+\sigma^2}$ – максимальное значение напряжения нагрузки. Получаем критерий равенства режимов: $\gamma_1 = \gamma_2, \hat{U}_{H1} = \hat{U}_{H2}$, а изменения самих режимов тогда выражаются через отношение или приращение величин $\hat{U}_H$. Если исходное выражение типа (1.1) более сложное, то непосредственно и обоснованно составить чисто относительное выражение (1.3) также будет сложно. Поэтому будет полезным дать геометрическую интерпретацию приведенным рассуждениям. Выражение (1.2) определяет преобразование подобия (частный случай аффинного преобразования), которое устанавливает соответствие точек $\gamma \to \overline{U}_H$ [10,11,12]. Аффинное преобразование обладает инвариантом – простое отношение трех точек:

$$m^1 = (\,0\;\;\gamma^1\;\;1\,) = \frac{\gamma^1 - 0}{1-\gamma^1} = (\,0\;\;\overline{U}_H^1\;\;\frac{1}{1+\sigma^2}\,) = \frac{\overline{U}_H^1}{\dfrac{1}{1+\sigma^2} - \overline{U}_H^1} = \frac{p^1}{1-p^1}. \qquad (1.4)$$

Для его составления используются текущая точка и две базовые точки характерных режимов. Возможны и другие комбинации этих трех чисел. Пусть будет

$$p^1 = (\;\gamma^1\;\;0\;\;1\,) = \frac{\gamma^1 - 0}{1-0} = \gamma^1 = (\;\overline{U}_H^1\;\;0\;\;\frac{1}{1+\sigma^2}\,) = \overline{U}_H^1(1+\sigma^2). \qquad (1.5)$$

Простое отношение, таким образом, задает пропорцию или значение координаты текущей точки относительно базовых точек. Эта координата будет одинакова для сравниваемых регуляторов. Теперь рассмотрим изменение режима $\gamma^1 \to \gamma^2$. Простое отношение для последующего режима имеет вид:

$$m^2 = (\,0\;\;\gamma^2\;\;1\,) = \frac{\gamma^2 - 0}{1-\gamma^2} = (\,0\;\;\overline{U}_H^2\;\;\frac{1}{1+\sigma^2}\,) = \frac{p^2}{1-p^2}.$$

Чтобы выразить изменение режима m^{21}, можем использовать уже сложное отношение четырех точек:

$$m^{21} = (\,0\;\;\gamma^2\;\;\gamma^1\;\;1\,) = \frac{\gamma^2 - 0}{\gamma^2 - 1} \div \frac{\gamma^1}{\gamma^1 - 1} = m^2 \div m^1. \qquad (1.6)$$

Сложное отношение определяет своего рода «длину» отрезка $\gamma^1\gamma^2$ относительно базовых или крайних значений и является инвариантом уже проективных преобразований, характерных для соответствующей проективной геометрии.

Величины m^2, m^1 для унификации записи можно выразить виде сложного отношения, используя четвертую точку. Учитывая, что нет физически характерной такой точки, можно использовать просто точку 0,5 для переменной γ как начальную или единичную. Тогда $m^1 = (\,0\;\;\gamma^1\;\;0{,}5\;\;1\,) = \dfrac{\gamma^1 - 0}{\gamma^1 - 1} \div \dfrac{0{,}5}{0{,}5 - 1}$.

Аналогично получается выражение для m^2 и выполняется соотношение (1.6).

Таким образом, удобство использования сложного отношения состоит в том, что становится возможным формализованным образом выразить режим и изменение режима, если имеется две или три точки характерных режимов, которые принимаем за

базовые и начальную точку, что далее и будет показано. Рассмотрим теперь повышающий регулятор. Выражение статической регулировочной характеристики в режиме непрерывного тока дросселя более сложное [9]:

$$U_H = U_0 \frac{1-\gamma}{(1-\gamma)^2 + \dfrac{R}{R_H}} = U_0 \frac{1-\gamma}{(1-\gamma)^2 + \sigma^2}. \qquad (1.7)$$

Аналогично, выражение регулировочной характеристики через длительность паузы θ и период T имеет вид [13]:

$$U_H = U_0 \frac{\dfrac{T}{\theta}}{1 + \dfrac{R}{R_H}\left(\dfrac{T}{\theta}\right)^2} = U_0 \frac{n}{1+\sigma^2 n^2}. \qquad (1.8)$$

Величина $n \geq 1$ тогда является относительной длительностью паузы. Рассмотрим возможность записи в относительном виде этого выражения. Введем переменные: $\hat{U}_H = U_H \dfrac{\sigma}{U_0}$, $\hat{n} = \sigma n$. Тогда $\hat{U}_H = \dfrac{\hat{n}}{1+\hat{n}^2}$.

Получается как будто относительное выражение. Но для такого характерного значения как $n = 1$, значение $\hat{n} = \sigma$, т.е. зависит от параметра регулятора. Приведенные рассуждения демонстрируют необходимость решения поставленной задачи.

2. Повышающий импульсный регулятор

Можем рассматривать сопротивление потерь R дросселя как внутреннее сопротивление источника питания. Тогда можно ввести напряжение U на входе уже идеализированного повышающего регулятора. Как показано в [8], величина $n = \dfrac{U_H}{U}$ является тогда коэффициентом передачи по напряжению или коэффициентом трансформации, а напряжение $U = \dfrac{U_0}{1+n^2\sigma^2}$.

Используя выражение регулировочной характеристики (1.8), исключим величину n. Тогда получим уравнение окружности (эллипса) на рис. 1: $\sigma^2 U_H^2 + U^2 - UU_0 = 0$.

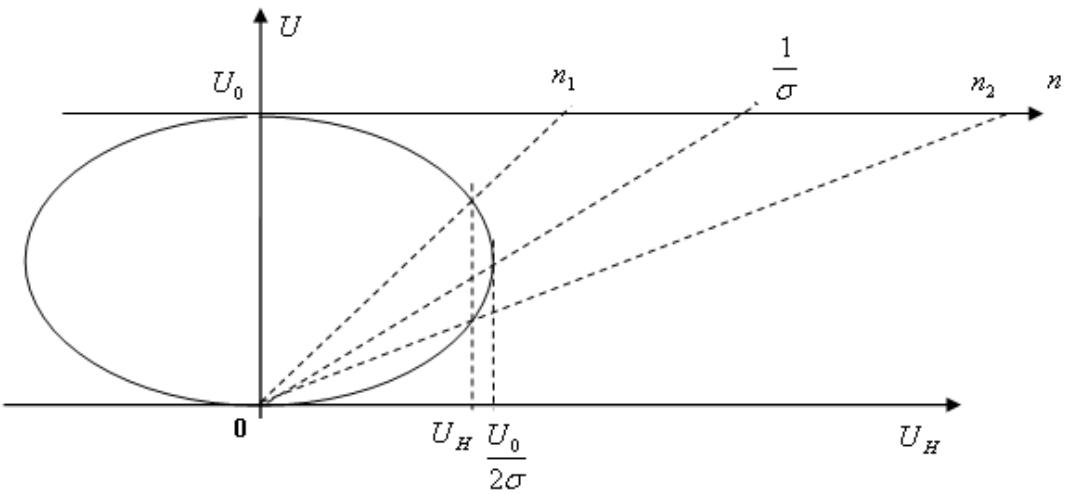


Рис.1. Геометрическая модель регулировочной характеристики

повышающего регулятора

Переменная n получается за счет стереографической проекции точек окружности из полюса $(0,0)$. Максимальные значения величин: $U_{HM} = \pm\frac{U_0}{2\sigma}$, $n_M = \pm\frac{1}{\sigma}$.

Изменение режима или регулирование напряжения нагрузки определяется групповым преобразованием, которое последовательно, по шагам, переводит исходную точку U_H^1 в точку U_H^2 и т.д., что соответствует понятию «движения» в геометрии [10,11]. Такое преобразование обладает неподвижными точками, когда $U_H^2 = U_H^1$. Если имеется две действительные точки, то геометрия является гиперболической. В этой геометрии неподвижные точки являются точками абсолюта или бесконечно удаленными точками, которые не достигаются конечным числом преобразований. В рассматриваемом случае как раз и используется группа гиперболических преобразований.

Соответствие или, в свою очередь, преобразование (или отображение) характерных и текущих точек осей U_H, n, γ показано на рис. 2.

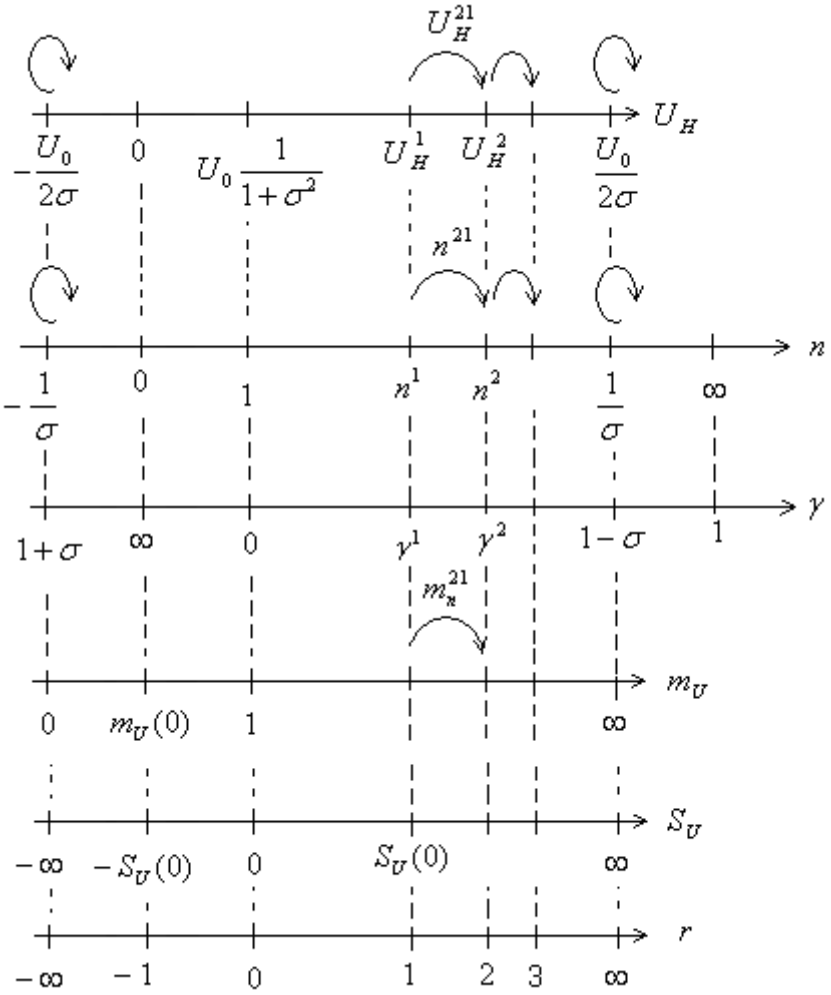


Рис.2. Изменение режима как групповое преобразование и соответствие характерных и текущих точек осей U_H, n, γ

Такое преобразование обладает инвариантом - сложное отношение четырех точек. Выделим необходимые точки характерных режимов. Это уже полученные две точки максимального напряжения и начальная точка: $U_{H0} = \dfrac{U_0}{1+\sigma^2}, n = 1, \gamma = 0$.

Для исходных значений n^1, U_H^1 соответствующие сложные отношения имеют вид:

$$m_n^1 = (-\frac{1}{\sigma} \;\; n^1 \;\; 1 \;\; \frac{1}{\sigma}) = \frac{\frac{1}{\sigma} + n^1}{\frac{1}{\sigma} - n^1} \cdot \frac{1-\sigma}{1+\sigma}, \tag{2.1}$$

$$m_U^1 = (-\frac{U_0}{2\sigma} \;\; U_H^1 \;\; \frac{U_0}{1+\sigma^2} \;\; \frac{U_0}{2\sigma}) = \frac{\frac{U_0}{2\sigma} + U_H^1}{\frac{U_0}{2\sigma} - U_H^1} \cdot \frac{(1-\sigma)^2}{(1+\sigma)^2} = (m_n^1)^2. \tag{2.2}$$

Учитывая, что величины γ и n связаны между собой дробно – линейным выражением:

$\gamma = \dfrac{n-1}{n}$, можно выразить сложное отношение (2.1) через величину γ:

$$m_\gamma^1 = m_n^1 = (\,(1+\sigma) \;\; \gamma^1 \;\; 0 \;\; (1-\sigma)\,) = \frac{(1+\sigma) - \gamma^1}{(1-\sigma) - \gamma^1} \cdot \frac{1-\sigma}{1+\sigma}. \tag{2.3}$$

Выражения (2.1, 2.2) приводят к одинаковым значениям, если взять логарифм, т.е. использовать гиперболическую метрику: $S^1 = Ln\, m_U^1 = 2Ln\, m_n^1$.

Тогда гиперболическое расстояние

$$S^1 = Ln \frac{\frac{U_0}{2\sigma} + U_H}{\frac{U_0}{2\sigma} - U_H} + 2Ln \frac{1-\sigma}{1+\sigma}.$$

В частности, для начальной точки гиперболическое расстояние равно нулю.

Помимо уже рассмотренных трех точек характерных режимов есть ещё четвертая – масштабная точка $U = 0, n = 0, \gamma = \infty$. Эту масштабную точку тоже надо учесть. Сложное отношение и гиперболическое расстояние для масштабной точки:

$$m_U(0) = \left(\frac{1-\sigma}{1+\sigma}\right)^2 < 1 \;,\; S\;(0) = Ln\, m_U(0) = 2Ln \frac{1-\sigma}{1+\sigma} < 0.$$

Соответствующее гиперболическое расстояние будет положительным для обратного значения сложного отношения. Далее естественно ввести нормированное гиперболическое расстояние r для текущего режима (индекс «1» опускаем), используя полученный масштаб:

$$r = \frac{S}{S\;(0)} = \frac{Ln \dfrac{\frac{U_0}{2\sigma} + U_H}{\frac{U_0}{2\sigma} - U_H}}{2Ln \dfrac{1+\sigma}{1-\sigma}} - 1, \quad U_H = \frac{U_0}{2\sigma} \frac{\left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{2(r+1)} - 1}{\left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{2(r+1)} + 1}. \tag{2.4}$$

Нормированное расстояние учитывает, таким образом, все характерные точки.

Для изменения режима, когда $n^1 \to n^2$:

$$m_n^{21} = (-\frac{1}{\sigma}\ n^2\ n^1\ \frac{1}{\sigma}) = \frac{\frac{1}{\sigma}+n^2}{\frac{1}{\sigma}-n^2} : \frac{\frac{1}{\sigma}+n^1}{\frac{1}{\sigma}-n^1} = \frac{\frac{1}{\sigma}+\frac{n^2-n^1}{1-\sigma^2\ n^2 n^1}}{\frac{1}{\sigma}-\frac{n^2-n^1}{1-\sigma^2\ n^2 n^1}}. \qquad (2.5)$$

Можно положить $n^{21} = \frac{n^2-n^1}{1-\sigma^2\ n^2 n^1}$, тогда $m_n^{21} = \frac{\frac{1}{\sigma}+n^{21}}{\frac{1}{\sigma}-n^{21}}$. (2.6)

Последующее значение величины n^2:

$$n^2 = \frac{n^1+n^{21}}{1+\sigma^2\ n^1 n^{21}}. \qquad (2.7)$$

Аналогично, для изменения напряжения $U_H^1 \to U_H^2$ сразу можно записать:

$$m_U^{21} = \frac{\frac{U_0}{2\sigma}+U_H^{21}}{\frac{U_0}{2\sigma}-U_H^{21}},\ U_H^{21} = \frac{U_H^2-U_H^1}{1-4\sigma^2\frac{U_H^2 U_H^1}{U_0{}^2}}, U_H^2 = \frac{U_H^{21}+U_H^1}{1+4\sigma^2\frac{U_H^{21}U_H^1}{U_0{}^2}}. \qquad (2.8)$$

Рассмотрим теперь изменение m_γ^{21}. Из (2.3) следует, что

$$m_\gamma^{21} = m_\gamma^2 \div m_\gamma^1 = \frac{(1+\sigma)-\gamma^2}{(1-\sigma)-\gamma^2} \div \frac{(1+\sigma)-\gamma^1}{(1-\sigma)-\gamma^1} = \frac{1-\sigma\gamma^{21}}{1+\sigma\gamma^{21}}, \qquad (2.9)$$

где изменение $\gamma^{21} = \frac{\gamma^1-\gamma^2}{1-\sigma^2+\gamma^1\gamma^2-(\gamma^1+\gamma^2)}$, а $n^{21} = \gamma^{21}$

Таким образом, получается взаимно согласованная система всех параметров режима, что является логическим обоснованием предлагаемого способа определения режимов.

Примеры

Пусть задан регулятор номер один с конкретными значениями параметров элементов и параметрами режима $U_0, R_H, \sigma_1, U_{H1}, \gamma_1, n_1$.

Пример 1. Определить фактические параметры U_{H2}, γ_2, n_2 эквивалентного режима для регулятора номер два с параметрами элементов U_0, R_H, σ_2.

Пусть $U_0 = 25B, \sigma_1 = 0{,}08, \sigma_2 = 0{,}06$, а $U_{H1}^1 = 48{,}49B$ для исходного режима.

Находим характерные значения всех параметров режима – рис.3:

$$U_{HM1} = \pm\frac{U_0}{2\sigma_1} = \pm 156{,}25B,\ U_{HM2} = \pm 208B.$$

$$n_{M1} = \pm\frac{1}{\sigma_1} = \pm 12{,}5,\ n_{M2} = 16{,}66,\ \gamma_{M1} = \frac{n_{M1}-1}{n_{M1}} = 1-\sigma_1 = 0{,}92, \gamma_{M2} = 0{,}94.$$

Для $n_1 = n_2 = 1, U_{H1} = 25\frac{1}{1+0{,}08^2} = 24{,}841B, U_{H2} = 25\frac{1}{1+0{,}06^2} = 24{,}91B$.

Находим сложного отношения для исходного режима регулятора номер один из (2.2):

$$m_{U1}^1 = \frac{156{,}25 + 48{,}49}{156{,}25 - 48{,}49} \cdot (0.852)^2 = 1{,}9 \cdot 0{,}7256 = 1{,}378\,, \quad m_{n1}^1 = \sqrt{m_{U1}^1} = \sqrt{1{,}378} = 1{,}174\,.$$

Тогда соответствующее значение n_1^1 можно вычислить из выражения, обратного к (2.1):

$$n_1^1 = \frac{1}{\sigma_1} \cdot \frac{m_{n1}^1 \cdot \dfrac{1+\sigma_1}{1-\sigma_1} - 1}{m_{n1}^1 \cdot \dfrac{1+\sigma_1}{1-\sigma_1} + 1} = 12{,}5 \frac{1{,}174 \cdot 1{,}174 - 1}{1{,}174 \cdot 1{,}17 + 1} = 1{,}986\,,$$

$\gamma_1^1 = 0{,}496$, $S_{U1}^1 = Ln 1{,}378 = 0{,}320$.

Сложное отношение и расстояние для масштабной точки первого регулятора:

$$m_{U1}(0) = \left(\frac{1-\sigma_1}{1+\sigma_1}\right)^2 = 0{,}7256\ ,\ S_{U1}(0) = Ln\, m_{U1}(0) = 2Ln\frac{1-\sigma_1}{1+\sigma_1} = -0{,}320\,.$$

Нормированное расстояние для исходного режима $r_1^1 = 1$.

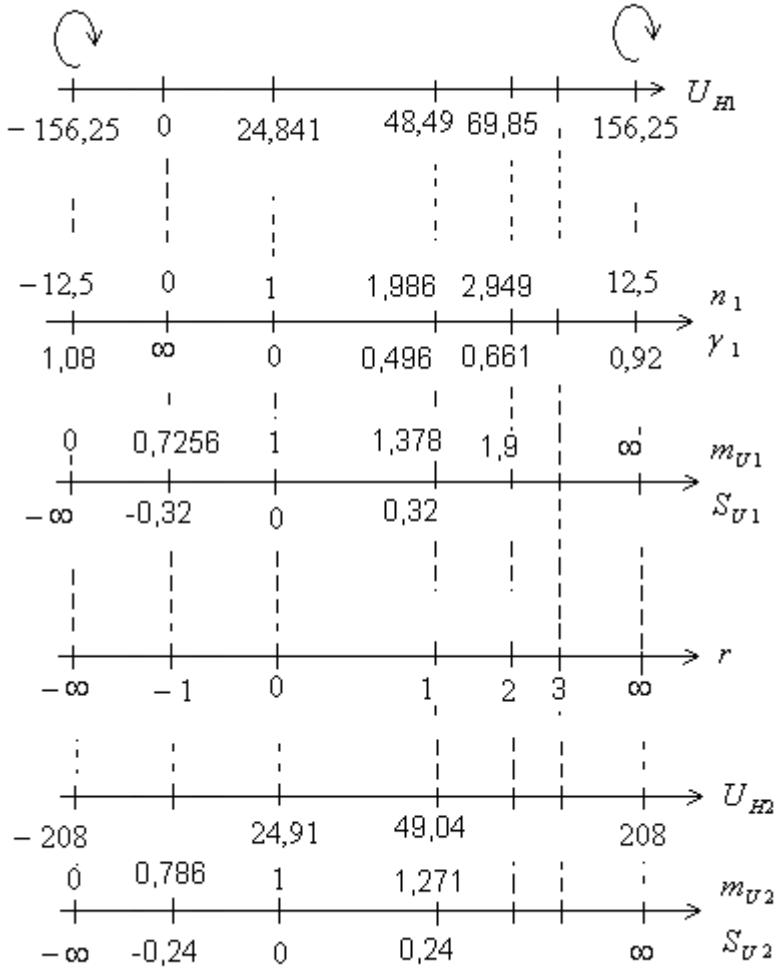


Рис.3. Пример изменения режима и соответствия точек осей U_H, n, γ двух повышающих регуляторов

Теперь можем определить фактические параметры эквивалентного режима регулятора номер два. Условие эквивалентности: $r_1^1 = r_2^1 = 1$. Тогда соответствующее значение U_{H2}^1 из (2.4):

$$U_{H2}^1 = 208\frac{1{,}617-1}{1{,}617+1} = 49{,}04B.$$

Соответствующее сложное отношение (2.2):

$m_{U2}^1 = 1{,}617 \cdot 0{,}7864 = 1{,}2716$, $m_{n2}^1 = \sqrt{m_{U2}^1} = \sqrt{1{,}2716} = 1{,}127$.

Аналогично n_1^1 находим:

$$n_2^1 = 16{,}6 \cdot \frac{1{,}127 \cdot 1{,}127 - 1}{1{,}127 \cdot 1{,}127 + 1} = 16{,}6 \cdot 0{,}1195 = 1{,}9848, \quad \gamma_2^1 = 0{,}4962.$$

Пример 2. Режим первого регулятора изменился на величину $r_1^{21} = 1$. Необходимо определить его фактические параметры режима. Значение расстояния для этого режима: $r_1^2 = r_1^1 + r_1^{21} = 2$. Тогда

$$U_{H1}^2 = 156{,}25\,\frac{1{,}174^{2(r+1)} - 1}{1{,}174^{2(r+1)} + 1} = 156{,}25\,\frac{2{,}618-1}{2{,}618+1} = 69{,}85B.$$

Это значение можно получить и по-другому, используя изменение U_{H1}^{21} и выражение (2.8).

В данном случае изменение $U_{H1}^{21} = 24{,}841B$ (равно масштабному значению). Поэтому

$$U_{H1}^2 = \frac{24{,}841 + 48{,}49}{1 + 4 \cdot 0{,}0064\dfrac{24{,}841 \cdot 48{,}49}{25^2}} = 69{,}88B.$$

Аналогично, изменение $n_1^{21} = 1$. Тогда из (2.7) находим

$$n_1^2 = \frac{1{,}9869 + 1}{1 + 0{,}0064 \cdot 1{,}9869 \cdot 1} = 2{,}949, \quad \gamma_1^2 = 0{,}661$$

Значения U_{H1}, γ_1, n_1 для дальнейших шагов показаны на рис.3. Видно, что каждый раз фактическое изменение напряжение уменьшается и не может достигнуть своего максимального значения.

Пример 3. Пусть необходимо режим регулятора номер один с исходным значением $U_{H1}^1 = 48{,}49B$ изменить последовательно небольшими шагами до значения $U_{H1}^N = 69{,}85B$. Последовательное уменьшение шага изменения режима уменьшает, в свою очередь, нежелательные переходные процессы. Пусть число шагов $N = 5$. Необходимо найти значения U_{H1}^i, n^i на каждом шаге i.

Находим гиперболическое расстояние, соответствующее исходному (нулевой шаг) и конечному (пятый шаг) режимам. Согласно примеру 2, это расстояние $r^{50} = 1$.

Для пяти шагов изменение режима или гиперболического расстояния $\Delta r = 0{,}2$. Значение (длина) первого шага: $r^1 = r^0 + r^{10} = 1 + 0{,}2 = 1{,}2$.

Напряжение первого шага согласно (2.4)

$$U_{H1}^1 = 156{,}25\,\frac{1{,}174^{2 \cdot 2{,}2} - 1}{1{,}174^{2 \cdot 2{,}2} + 1} = 52{,}963B, \quad n^1 = 2{,}1833.$$

Изменение напряжения на первом шаге, согласно (2.8):

$$U_{H1}^{10} = \frac{52{,}963 - 48{,}49}{1 - 4 \cdot 0{,}0064 \dfrac{52{,}963 \cdot 48{,}49}{25^2}} = 5B.$$

Изменения на следующих шагах также равны этому значению.

Соответствующее изменение (2.6):

$$n^{10} = \frac{2{,}1833 - 1{,}9869}{1 - 0{,}0064 \cdot 2{,}1833 \cdot 1{,}9869} = 0{,}20293.$$

Для последующих шагов значения n, U_H вычисляем через рекуррентные соотношения (2.7, 2.8), т.к. изменения на следующих шагах сохраняют свои значения:

$$n^2 = \frac{2{,}1833 + 0{,}20293}{1 + 0{,}0064 \cdot 2{,}1833 \cdot 0{,}20293} = 2{,}37948, \quad U_{H1}^2 = \frac{52{,}963 + 5}{1 + 4 \cdot 0{,}0064 \dfrac{52{,}963 \cdot 5}{25^2}} = 57{,}341B, \text{ и}$$

т.д.:

$$n^3 = 2{,}574, n^4 = 2{,}768, n^5 = 2{,}96 \quad U_H^3 = 61{,}617b, U_H^4 = 65{,}78B, U_H^5 = 69{,}84$$

Наглядно видно, как уменьшаются фактические значения изменений n и U_H.

Пример 4. Рассмотрим возможность линеаризация регулировочной характеристики.

Выразим γ через r аналогично (2.4):

$$\gamma = 1 - \sigma \frac{\left(\dfrac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{r+1} + 1}{\left(\dfrac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{r+1} - 1}. \qquad (2.10)$$

Получается, что величина r одинаковым образом выражается через γ и U_H, что можно интерпретировать как своего рода линеаризацию зависимости $U_H(\gamma)$. Далее можно принять, что значение γ равно значению напряжению управления U_{reg} на входе ШИМ, а в качестве гиперболического расстояния r полагаем напряжение на входе введенного перед ШИМ первого нелинейного преобразователя, т.е. напряжение ΔU.

Выражая r через U_H согласно (2.4) (второй нелинейный преобразователь), получим величину, близкую к напряжению ΔU, т.е. напряжение обратной связи U_{OC}.

Для подтверждения возможности линеаризации фактической регулировочной характеристики (влияние инерционности регулятора), представлены результаты моделирования на рис. 4 в среде ORCAD 9.1 повышающего преобразователя.

Параметры преобразователя (дополняют параметры рассмотренного регулятора номер один):

$R = 0{,}256$ Ом, $R_H = 40$ Ом, $C_H = 10$ мкФ, $L = 250$ мкГ, где C_H, L - емкость конденсатора RC нагрузки и индуктивность дросселя соответственно. Период коммутации $T = 50$ мкс. Подавалось линейно-изменяющееся (ступенчатое) напряжение ΔU с передним фронтом 10мс и амплитудой 12В. На выходе первого нелинейного преобразователя напряжение U_{reg} изменяется по нелинейному закону. Напряжение нагрузки U_H меняется также по нелинейному закону, а напряжение обратной связи U_{OC} изменяется строго линейно. Можно отметить и естественное ограничение значений U_{reg} и U_H при достаточно больших значениях напряжения ΔU. Если использовать контур обратной связи для точного регулирования напряжения

нагрузки, то напряжение обратной связи U_{OC} сравнивается с изменяемым опорным напряжением U_{ref}. Полученное напряжение ошибки будет тогда напряжением ΔU.

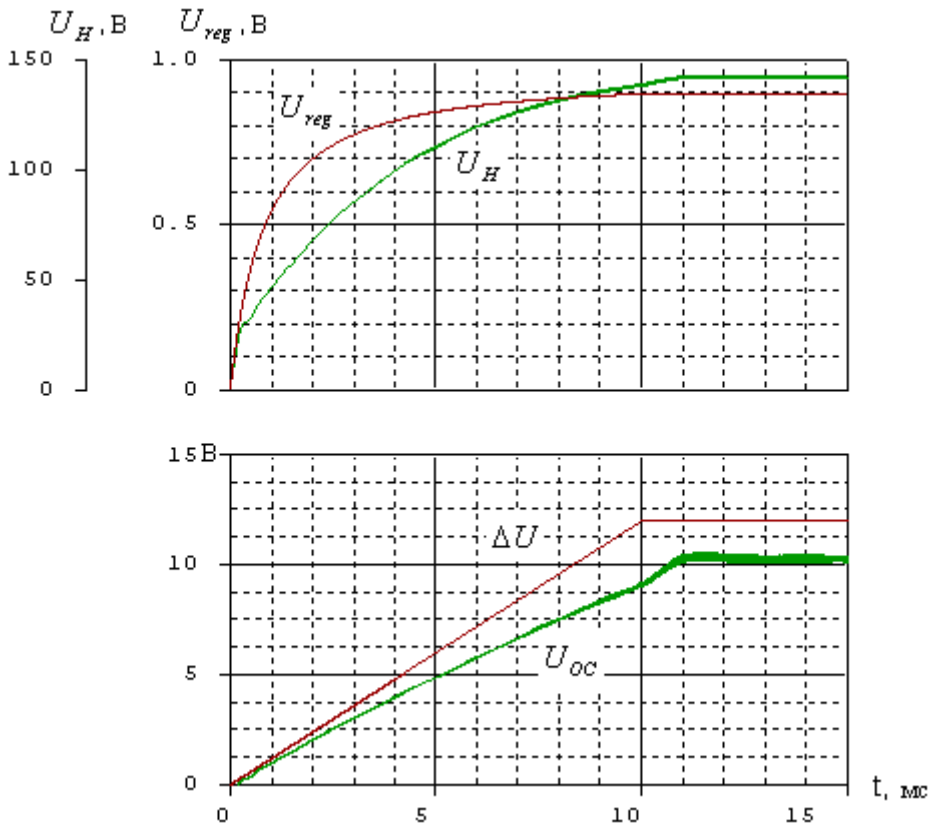


Рис. 4. Результаты моделирования повышающего регулятора с линеаризованной регулировочной характеристикой

3. Инвертирующий регулятор

Приведем выражение регулировочной характеристики: $U_H = U_0 \dfrac{n-1}{1+\sigma^2 n^2}$.

Аналогично введем переменную U таким образом, чтобы коэффициент трансформации n соответствовал выражению: $\dfrac{U_H}{U} = n-1$ или $n = 1 + \dfrac{U_H}{U}$. Тогда получим уравнение эллипса на рис. 5: $\sigma^2 U_H^2 + (1+\sigma^2)U^2 + 2\sigma^2 U_H U - U_0 U = 0$.

Определим характерные значения параметров режима:

$$U_{HM} = \frac{U_0}{2\sigma(\sigma \pm \sqrt{1+\sigma^2})} = \frac{U_0}{2\sigma^2 n_M} = \frac{25}{2\cdot 0{,}08(0{,}08 \pm 1{,}00319)} = \begin{cases} +144{,}2 = U_{HM}^{+} \\ -169{,}24 = U_{HM}^{-} \end{cases},$$

$$n_M = \frac{\sigma + \sqrt{1+\sigma^2}}{\sigma} = \begin{cases} +13{,}539 = n_M^{+} \\ -11{,}539 = n_M^{-} \end{cases}.$$

Видно, что число характерных точек такое же, как и для повышающего регулятора. Принимаем аналогично точки $U_H = 0, n = 1$ за начальные, а точки $U_H = -25, n = 0$ - за масштабные. Отметим, что масштабные точки не зависят от параметра регулятора σ, но крайние или базовые точки выражаются по-разному от σ. Поэтому (как было выше отмечено) непосредственно чисто относительное выражение также не получится.

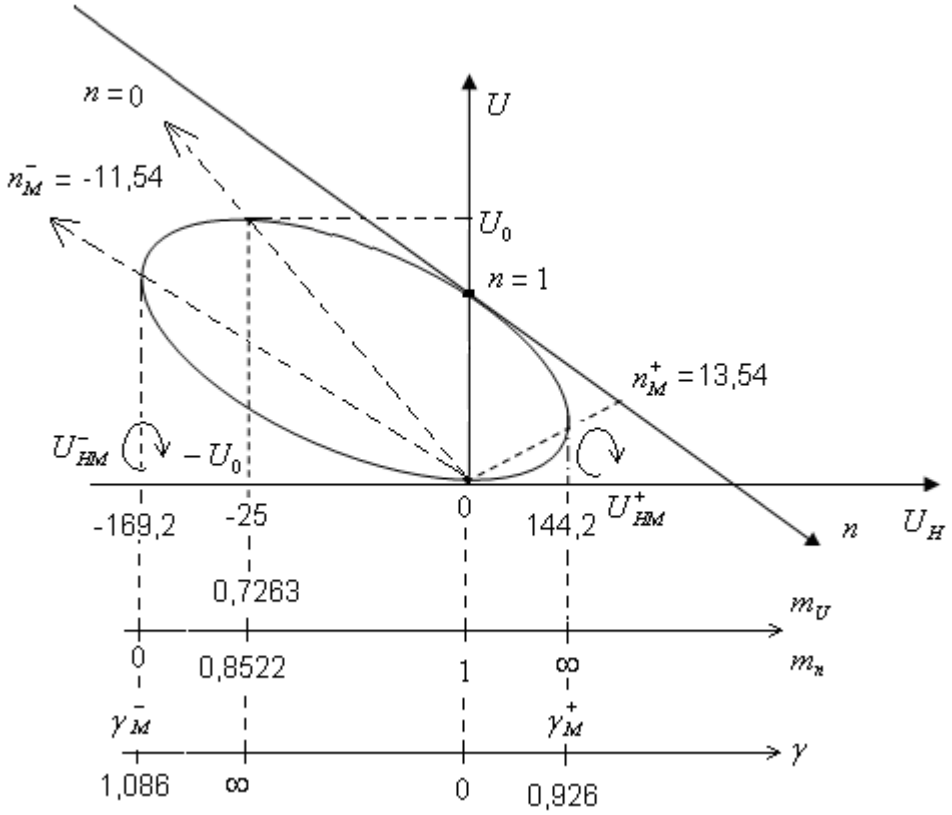


Рис.5. Геометрическая модель регулировочной характеристики инвертирующего регулятора и соответствие точек осей U_H, n, γ

Составим сложное отношение для исходных значений U_H и n:

$$m_U^1 = (U_{HM}^- \;\; U_H^1 \;\; 0 \;\; U_{HM}^+) = \frac{U_H^1 - U_{HM}^-}{U_H^1 - U_{HM}^+} \cdot \frac{U_{HM}^+}{U_{HM}^-},$$

$$m_n^1 = (n_M^- \;\; n^1 \;\; 1 \;\; n_M^+) = \frac{n^1 - n_M^-}{n^1 - n_M^+} \cdot \frac{1 - n_M^+}{1 - n_M^-}.$$

Значение сложного отношения для масштабных точек:

$$m_U(-U_0) = \frac{-U_0 - U_{HM}^-}{-U_0 - U_{HM}^+} \cdot \frac{U_{HM}^+}{U_{HM}^-} = 0{,}7263, \; m_n(0) = \frac{n_M^-}{n_M^+} \cdot \frac{1 - n_M^+}{1 - n_M^-} = 0{,}8522.$$

Далее применимы все аналогичные соотношения для повышающего регулятора.

Выводы

Рассмотренные инвариантные свойства регулировочных характеристик импульсных регуляторов (преобразователей напряжения) обосновано определяют режимы и линеаризуют регулировочную характеристику. Полученные соотношения

позволяют провести анализ и сравнить режимы разных по параметрам преобразователей.

Литература

1. Патент России. 2279705. G05F1/613, Способ питания нагрузки от солнечной батареи. Чернышев А.И., Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф., Поляков С.А. 10.07.2006. Бюл.№19.
2. Мелешин В., Овчинников Д. Применение микропроцессоров в системах управления транзисторных выпрямителей // Силовая электроника. 2005. №4. с.50-53.
3. Смоляков С.В., Изварин Ю.В., Чибирев И.В. Прямое цифровое управление инвертором с квазисинусоидальным входным напряжением // Электротехника. 1996. №12. с.17-19.
4. Патент России. 2133542 . H02J 9/04 , Способ управления системой бесперебойного электропитания в аварийных режимах. Барковский А.Н., Казьмин Г.П., Королев С.И., Молдован Н.А. 1999.07.20.
5. Патент России. 2284623 . H02J9/06 , Преобразователь напряжения постоянного тока со встроенным микроконтроллерным управлением. Давыдов В.Н., Жилин В.Н., Темиров А.П. и др. 09.08.2006.Бюл.№27.
6. Волович Г. Устойчивость импульсных стабилизаторов напряжения // http://www.platan.ru/shem/pdf/12_p16-20.pdf
7. Веников В.Д. Теория подобия и моделирования.– М.: Высшая школа, 1976.
8. Пенин А.А. Дробно- линейные соотношения в задачах анализа резистивных цепей с переменными параметрами //Электричество, 1999, №11.
9. Поликарпов А.Г., Сергиенко Е.Ф. Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА.- М.: Радио и связь, 1989 -160с.
10. Глаголев Н.А. Проективная геометрия. — М.: Наука, 1963.
11. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Г. Современная геометрия.- М.: Наука, 1986.
12. Каган В.Ф. Основания геометрии. Часть вторая. – М.: Госиздательство технико–теоретической литературы, 1956.
13. Иванов- Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник для вузов. 4-е изд.- М.: Высшая школа, 1991.

Автор. Пенин Александр Анатольевич, окончил радиотехнический факультет Одесского политехнического института в 1974 г., научный сотрудник института инженерной электроники и промышленных технологий академии наук Молдовы. Область научных интересов: теория электрических цепей с изменяемыми параметрами элементов, силовая электроника. e- mail: aapenin@mail.ru
тел: +373 22 739055.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОСИФОНОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДИСПЕРСНЫХ И ВЯЗКИХ ПИЩЕВЫХ СРЕД

Безбах И. В., Омар Саид Ахмед, Донкоглов В. И.
Одесская национальная академия пищевых технологий

Аннотация: Рассмотрены аппараты на базе термосифонов для сушки, термообработки дисперсных пищевых материалов, неньютоновских пищевых жидкостей. Приведены результаты экспериментальных исследований.
Ключевые слова: термосифоны, дисперсные материалы, неньютоновские жидкости.

CERCETAREA FUNCȚIONĂRII TERMOSIFOANELOR LA PRELUCRAREA MEDIILOR ALIMENTARE DISPERSIVE ŞI VÎSCOAŞE

Bezbah I. V., Omer Seed Ahmed, Donkoglov V. I.
Academia Națională a Tehnologiilor de Alimentare din Odesa

Rezumat: Sunt cercetate aparate pe baza termosifoanelor pentru uscare, prelucrare termică a materialelor alimentare dispersive, lichidelor de alimentare non-Newton. Sunt prezentate rezultate ale cercetărilor experimentale.
Cuvinte cheie: termosifoane, materiale dispersive, lichide non-Newton.

THE RESEARCH OF THERMAL SIPHONS FUNCTIONING AT PROCESSING OF DISPERSED AND VISCOUS FOOD MEDIUMS

Bezbah I. V, Omer Seed Ahmed, Donkoglov V. I.
The Odessa national academy of food technologies

Abstract: Devices based on thermal siphons for drying, heat treatment of disperse food materials, non-Newtonian food liquids are considered. The results of experimental researches are shown.
Keywords: thermosiphons, disperse materials, non-Newton liquids.

1. Введение

Пищевой промышленностью производится и перерабатывается значительное количество продуктов, тепловое и механическое поведение которых отличается от поведения обычных ньютоновских жидкостей. К группе пищевых неньютоновских жидкостей (ННЖ) относят томатную пасту, различные пюре, кефир, сгущенное молоко и др. Близки по свойствам к ННЖ дисперсные продукты. Анализ свойств ННЖ показывает, что энергозатраты при их обработке значительно выше в сравнении с группой ньютоновских жидкостей. Основными проблемами, возникающими при тепловой обработке вышеупомянутых продуктов, являются: 1) изменение качества продукта в зависимости от продолжительности теплового воздействия; 2) процесс интенсивного накипеобразования. Высокая вязкость, плотность, низкая удельная теплоемкость и специфическое поведение ННЖ усложняют решение вышеупомянутых проблем традиционными методами интенсификации.

Для решения задачи сохранения и улучшения качества дисперсных пищевых продуктов используют комплекс различных мероприятий. В их число входят сушка, активное вентилирование. Наиболее распространённым является конвективный способ сушки, при котором теплота передаётся к продукту от смеси топочных газов с воздухом или от чистого воздуха, предварительно нагретого в калорифере. Характер развития сушильной техники, анализ литературных источников показывают, что энергетическому анализу зерносушильной техники не уделялось должного внимания.

Сушка является энергоемким процессом. Физическая энергия, необходимая для превращения 1кг воды в пар составляет порядка 2,5 МДж, однако сушильные технологии потребляют в 2,5...3 раза больше. Подбор рационального способа сушки, либо комбинация способов оказывает существенное влияние на энергозатраты и качество готового продукта.

2. Научно-техническая идея разработок

Применение термомеханических агрегатов (ТМА) в пищевой промышленности достаточно обширно и позволяет значительно интенсифицировать процесс тепловой обработки, снизить энергозатраты. Применяя ТМА для нагрева жидких пищевых продуктов, получают значительные коэффициенты теплопередачи (таб. 1).

Таблица 1

Области применения ТМА

Отрасль	Процесс	Продукт	Коэффициент теплопередачи
Консервная, молочная, виноделие [1]	Нагревание	Томатная паста, молоко, мезга	К=950÷1000 Вт/м^2 К
Молочная, сахарная [2]	Охлаждение, кристаллизация	Сливки, сахарный раствор	К=900÷1000 Вт/м^2 К
Консервная	Выпаривание	Томатная паста	-
Пищеконцентратная [3]	Сушка	Крупа, мука	К=250 Вт/м^2 К

При сушке дисперсных пищевых продуктов К=250 Вт/м^2 К, но удельные энергозатраты на кг удаленной влаги значительно ниже, чем у существующих сушилок. Термомеханические агрегаты возможно разделить на циркуляционные и автономные. К автономным относится аппарат с вращающимся термосифоном, созданный на кафедре процессов и аппаратов Одесской национальной академии пищевых технологий.

Применение термомеханических агрегатов в пищевой промышленности позволяет реализовать следующие пути снижения энергозатрат: сокращение цепочки трансформации энергии; совмещение в аппарате нескольких технологических процессов; интенсификация тепломассообмена; эффективная доставка энергии к продукту; утилизация теплоты. Применение схемы с циркуляционным термомеханическим агрегатом позволяет значительно интенсифицировать процесс, применение ТМА с вращающимся термосифоном (ВТС) кроме интенсификации процесса уменьшает цепочку термотрансформации энергии. Аппарат с ВТС (рис. 1) состоит из корпуса 1, конденсатора 2, парогенератора 3, привода 4 [4].

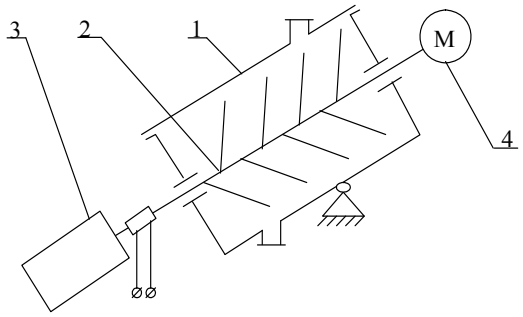


Рис. 1 – Схема аппарата с ВТС.

ВТС представляют собой герметично закрытую полость, частично заполненную теплоносителем. При подводе теплоты к испарителю теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в конденсатор, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода охлаждающей среде. Пар перемещается за счет разности давления в испарителе и конденсаторе в результате уменьшения объема при конденсации пара. Конденсат под действием гравитационных сил движется в

испаритель. Таким образом, в ВТС реализуется замкнутый испарительно-конденсационный цикл. Продукт поступает в корпус сверху, сталкивается с нагретой поверхностью конденсатора. Происходит сушка, перемешивание, либо нагревание продукта, после чего продукт выгружается через нижний патрубок в корпусе. Возможно выделить четыре основных направления применения аппаратов на базе ВТС. Это теплообменники, выпарные установки, сушилки, сушилки с ТН. Применение аппаратов с ВТС для нагрева ННЖ исследовано [5], в процессах выпаривания сушки дисперсных продуктов практически не исследовано [6, 7].

Применение различных способов интенсификации, комбинированных способов сушки дает возможность существенно снизить энергозатраты (таблица. 2).

Таблица 2

Пути снижения энергозатрат при сушке

Способ	Удельные энергозатраты МДж/кг уд. вл.
Рециркуляция сушильного агента	5,3
Сушка во взвешенном слое	4,8
Применение тепловых труб	2,7-3,5
Применение термомеханических агрегатов	3,1

Для сушки дисперсных продуктов предлагается ряд конструкций. Представляется перспективным использовать конструкции на базе термосифонов (ТС), в которых за счет формы статического теплового модуля будет осуществляться перемешивание продукта, движущегося плотным гравитационным слоем (рис. 2 а).

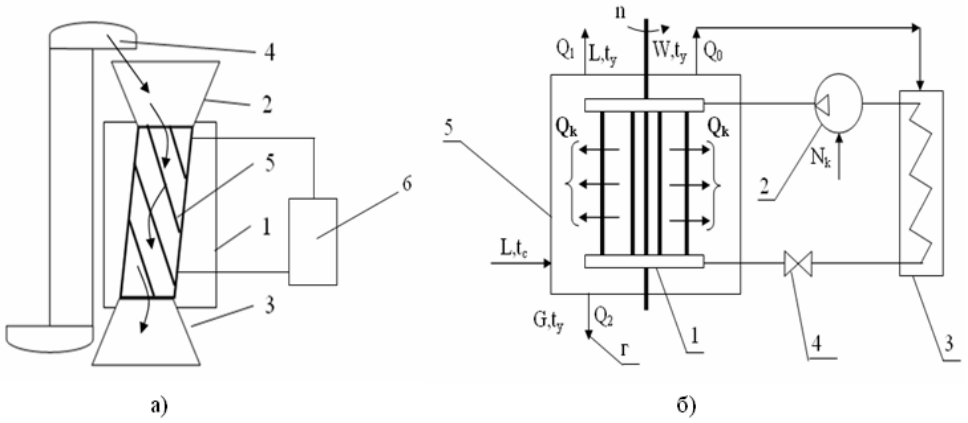


Рис. 2 – Применение ТС в процессах сушки

Сушилка на базе ТС (рис. 2а) состоит из сушильной шахты 1, загрузочного бункера 2, приёмного бункера 3, нории 4, конденсатора 5. Возможен вариант сушильной установки на базе ВТС и ТН (рис. 2 б). Критерием эффективности работы аппарата является удельный расход теплоты на сушку, который равен отношению мощности N_k, потребляемой компрессором теплового насоса, к количеству влаги W удаляемой из продукта. Расчетный удельный расход теплоты на сушку равен 0,5 МДж/кг, при коэффициенте термотрансформации 4,2.

3. Исследование тепло - массообмена в аппаратах с ВТС.

Интенсификация процесса тепло- массообмена в аппарате с ВТС достигается за счет разрушения теплового и диффузионного пограничных слоев. Степень интенсификации возрастает с увеличением вязкости продукта, его концентрации (а), расхода (W) (рис. 3,4). Степень интенсификации определяется по соотношению α/α_0,

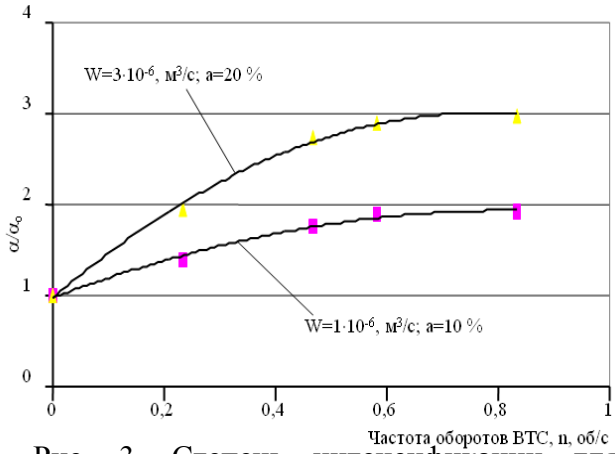


Рис. 3. Степень интенсификации для сахарного раствора

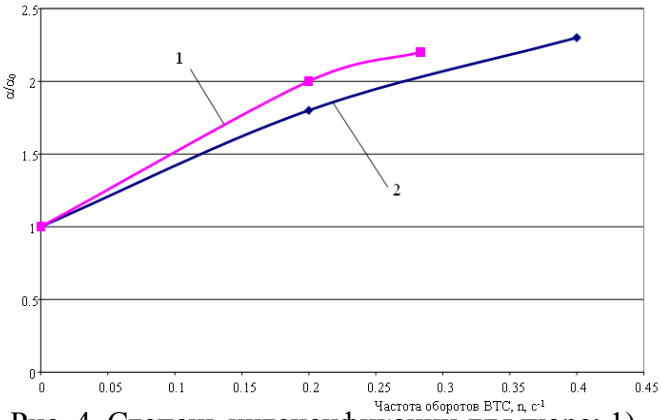


Рис. 4. Степень интенсификации для пюре: 1) яблочное (выпаривание); 2) абрикосовое (нагрев)

где α -коэффициент теплоотдачи при вращении термосифона. Предварительные опыты по интенсификации процесса выпаривания яблочного пюре в аппаратах с ВТС показывают

$\alpha/\alpha_0 \approx 2$ (рис. 4). Проведены исследования кинетики сушки вареного гороха в аппарате с ВТС при различной степени загрузки аппарата. Температура поверхности модуля поддерживалась равной 95÷120 ^{0}С. Скорость сушки в аппарате с ВТС U=0,8÷1,2 %/мин. Предложено использовать аппарат с ВТС в лини производства варено-сушеного гороха.

Определены удельные энергозатраты линии ($Э_{уд}$) как суммарные затраты электрической (Э) и тепловой (Q) энергии на производство продукта. Наибольший сегмент-сушка – $Э_{уд}$=5,1 МДж/(кг продукции). Планируется установка аппарата вместо ленточных сушилок. По сравнению с существующей линией энергозатраты снижаются в 5 раз.

4. Исследование обтекания, тепло - массообмена в аппаратах с ТС.

От сыпучести зерновой массы до и после сушки зависит выбор угла наклона тех деталей, по которым должно скатываться зерно, например короба, впускные и выпускные патрубки и отверстия для зерна. Для обеспечения свободного скатывания зерна углы наклона плоскостей и патрубков обычно принимают больше углов естественного откоса на 20—25%. Кроме того, чем меньше сыпучесть зерна, тем больше должны быть расстояния для прохода зерна внутри сушилки, что позволит избежать задержки движения зерна. Угол внутреннего трения для пшеницы обычно принимают равным 60—70°.

Исследовалась механика обтекания трубчатого модуля зерносушилки (рис. 2а). Определены углы наклона поверхностей ТС. Эксперименты проводились в следующем диапазоне (таб. 3). Исследование механики обтекания слоем зерна поверхности термосифонов проводилось визуальным методом с помощью “меченого слоя”. Опыты проводились на озимой пшенице марки Одесская 51 с равновесной влажностью 9%. Для проведения опытов использовалась прямоугольная шахта со стенками из органического стекла [8]. Внутри шахты располагались макеты ТС различного сечения (таб. 3). Устанавливались различные скорости движения зернового слоя. При проведении опыта положение меченых зёрен позволяло наблюдать картины обтекания, которые изучались, фотографировались, а также производилась видеосъемка движущегося потока зерна. Из картин обтекания зерновым слоем ТС определялись конфигурация и размеры зоны влияния ТС (рис. 5).

Данные по обтеканию труб, расположенных горизонтально показывают, что существуют зоны с ухудшенным теплообменом. На основании экспериментальных данных расположение ТС выбрано под наклоном 60°.

Таблица 3

Диапазон экспериментальных исследований при исследовании обтекания ТС

Тип термосифона	Размер, мм	Скорость потока, мм/с	Продукт
Круглый	Ø 13-35	3.5-30	Пшеница, кукуруза
Плоский	46.2×5.3; 13 × 3.3	3.5-30	Пшеница, кукуруза

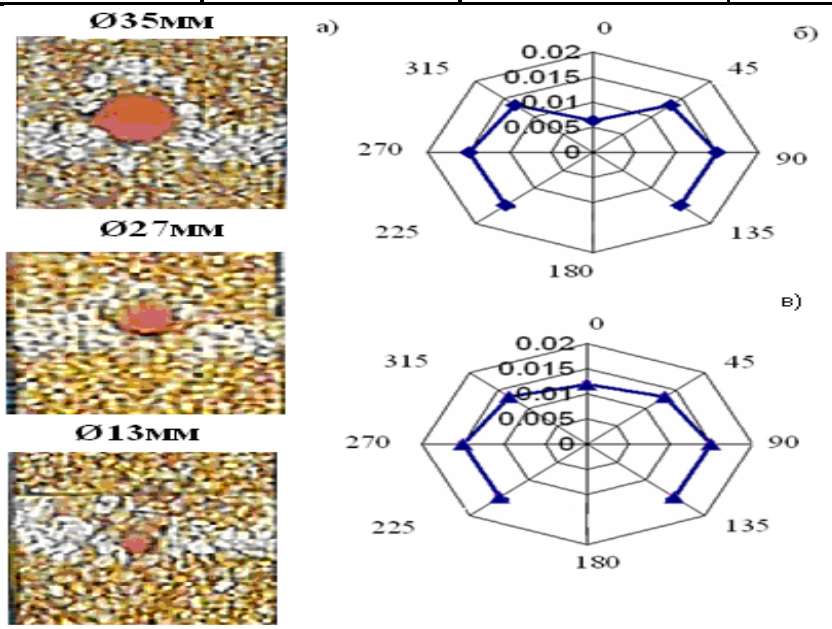


Рис. 5. а) Картины обтекания зерновым слоем труб различного сечения для кукурузы при Vз.п. =15 мм/с; Поля скоростей при обтекании круглого ТС кукурузой: б) ∅ 35 мм, в) ∅ 13 мм

Для наклонного ТС (рис. 6), достигается максимальная теплоотдача от поверхности трубы к материалу.

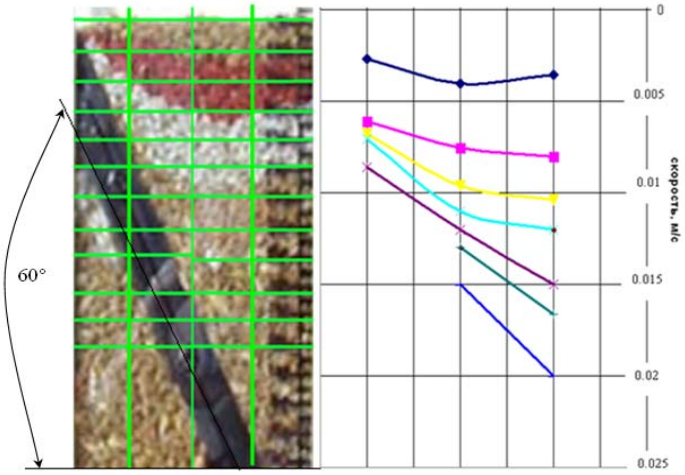


Рис. 6. Поля скоростей для пшеницы при обтекании круглого наклонного ТС средняя скорость слоя 30 мм/с.

Исследовалась кинетика сушки пшеницы в сушилке на базе ТС. Исследования проведены в следующем диапазоне (таблица. 4).

Влагосодержание зерна изменяли от 14 до 24 %. Для опытов, в которых поддерживался массовый расход зерна G=0.2 кг/с, получены следующие кривые сушки (рис. 7). Расслоение кривых сушки связано с различной подводимой мощностью ($N_{общ}$) к испарителю ТС. За счет контакта влажного зерна и поверхности нагрева зерно прогревается быстро (период нагрева до 12 мин).

С самого начала процесса температура зерна повышается и становится выше температуры мокрого термометра (рис. 8), таким образом, в начале процесса сушки уже происходит интенсивное парообразование.

Таблица 4

Диапазон экспериментальных исследований кинетики сушки пшеницы

Культура	Скорость воздуха	Влажность	Расход продукта	Температура продукта	Давление в модуле ТС	Подводимая мощность	Время сушки
	м/с	%	кг/с	^{o}C	МПа	кВт	мин
Пшеница	5	11÷23	0,2÷0,4	31÷60	0,1÷0,4	1,7÷3,5	0÷120

Температура зернового слоя непрерывно увеличивается (рис. 8), что связано с уменьшением количества влаги в зерне. Особенность проведения опытов связана с тем, что подводимую к нагревательным элементам установки мощность поддерживали постоянной.

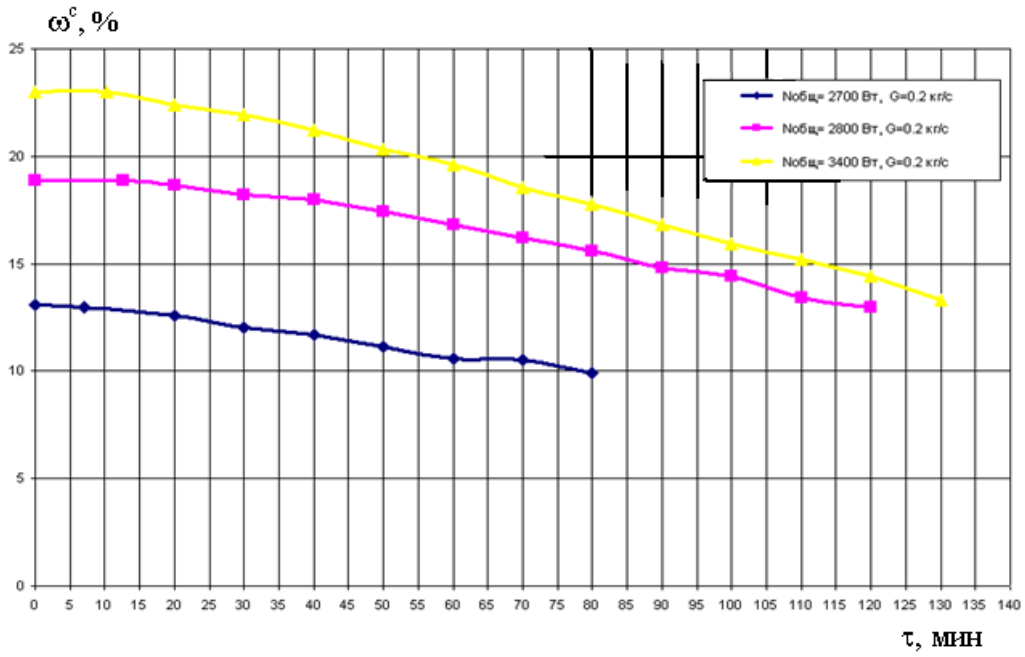


Рис. 7. Кривые сушки для расхода зерна G=0.2 кг/с

Поэтому температура поверхности модуля «саморегулировалась». Таким образом, приведенные термограммы отражают нестационарный нагрев зернового слоя. Для данного диапазона экспериментов скорость сушки лежит в пределах 0,11 – 0,13 %/мин. Температура нагрева зернового слоя в опытах приближается к предельно допустимой для фуражного зерна – 60 ^{o}C.

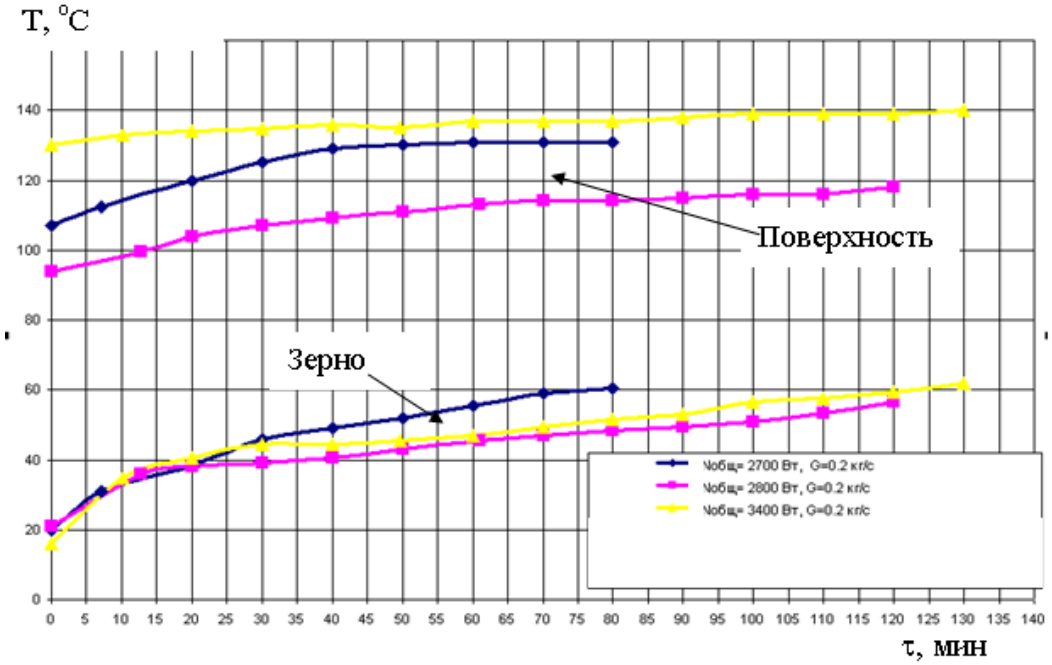


Рис. 8. Термограммы для расхода зерна G=0.2 кг/с

5. Выводы

В аппаратах с вращающимися термосифонами для исследуемых неньютоновских жидкостей наблюдается рост коэффициента теплоотдачи от поверхности вращающегося термосифона к жидкости, что связано: с увеличением

частоты оборотов модуля; разрушением теплового и диффузионного пограничных слоев непосредственно поверхностью теплопередачи; разрушением внутренней структуры жидкости.

Степень интенсификации возрастает с увеличением вязкости продукта, его концентрации, расхода. Степень интенсификации определяется по соотношению коэффициента теплоотдачи при вращении термосифона к коэффициенту теплоотдачи без вращения термосифона. При нагреве сахарного раствора соотношение находится в диапазоне 2÷3, для абрикосового пюре это соотношение составляет 2,2. Степень интенсификации растет тем больше, чем больше жидкость приближается к неньютоновской. Аппарат можно рекомендовать для термообработки пищевых неньютоновских жидкостей.

Скорость сушки вареного гороха в аппарате с вращающимся термосифоном равна 0,8÷1,2 %/мин. Значение скорости выше по сравнению с традиционной конвективной сушкой (0,7%/мин), что связано с разрушением теплового и диффузионного пограничных слоев материала непосредственно поверхностью теплопередачи, высокими коэффициентами теплопередачи к материалу (250 Вт/м^2 К). Применение вращающихся термосифонов снижает удельные энергозатраты на сушку. Аппарат можно рекомендовать для пищеконцентратной промышленности.

Разработанная конструкция теплового модуля блочной зерносушилки с применением наклонных термосифонов позволяет эффективно использовать греющую поверхность. Результат – жесткие температурные режимы сушки (температура зерна приближается к максимально допустимой – 60 ^{o}C). В таком режиме происходит интенсивное парообразование на поверхности зерна. Скорость сушки зерна в блочной зерносушилке по предварительным данным равна 0,11 – 0,13 %/мин, что ниже скорости сушки конвективных сушилок. Удельные энергозатраты сушилки 4,2 МДж/(кг уд. влаги), по сравнению с ДСП-32 – 5 МДж/(кг уд. влаги). Организация эффективного отвода паров из зоны сушки позволит в дальнейшем увеличить скорость сушки и снизить удельные энергозатраты в блочной зерносушилке.

Литература

1. Дикис М. Я., Мальский А.Н. Технологическое оборудование консервных заводов. – М.: Пищевая промышленность, 1969. – 340 с.
2. Томбаев Н. И. Справочник по оборудованию предприятий молочной промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 280 с.
3. Бачурская Л. Д., Гуляев В. Н. Пищевые концентраты. – М.: Пищевая промышленность, 1976 г.
4. O. G. Burdo, I. V. Bezbah Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food- stuffs // Applied Thermal Engineering 28 (2008) 341-343.
5. Безбах И. В., Зыков А.В., Донкоглов В. И., Омар Саид Ахмед Развитие конструкций тепло- массообменных аппаратов на базе автономных двухфазных модулей // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. Вип. 32.
6. Бурдо О. Г., Безбах И. В., Зыков А. В., Омар Саид Ахмед Повышение энергетической эффективности процессов обезвоживания пищевого сырья, Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал .- Харків. НТУ «ХПІ», 2008.-№2.-172 с.
7. Бурдо О. Г., Безбах И. В., Зыков А. В Энергоэффективные аппараты на основе вращающихся термосифонов Третья Международная Научно – практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2008» СЭТТ – 2008 Москва – Тамбов.
8. Бурдо О.Г. Зыков А.В. Гайда С. Теплообмен зернового потока в слоевых рекуператорах // Сборник докладов «Тепломассообмен ММФ-2000» Минск АНК “Институт

тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова" НАНБ. Минск –2000. С. 193-197.

9. Безбах И. В., Бурдо О. Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОДАХТ. – 1999. Вип. 21. – С. 234-237.

10. Бурдо О.Г., Безбах І. В., Савкін М.В. Інтесифікація термообробки харчових рідин // Наукові праці ОНАХТ. – 2004. Вип. 27. – С. 218-220.

11. Бурдо О. Г., Безбах И. В., Донкоглов В. И., Омар Саид Ахмед Тепло-массообменная аппаратура на базе двухфазных модулей // Материалы XII Международной научно-практической конференции "Совершенствование процессов и оборудования Пищевых и химических производств", Одесса, ОНАПТ.

Сведения об авторах:

Безбах И. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры процессы и аппараты ОНАПТ. Круг научных интересов - процессы тепло- массообмена при термообработке неньютоновских пищевых жидкостей, сушка дисперсных пищевых продуктов. Разработал виртуальные интеллектуальные тренажеры по дисциплинам процессы и аппараты и энергетический менеджмент, разработчик интерфейса мультимедийного учебника "Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах". Кандидатскую диссертацию защитил в 2002 г. Имеет 40 научных публикаций. E-mail: ter-ma@osaft.odessa.ua, igor-bezbakh@ya.ru

Донкоглов В. И. – аспирант кафедры процессы и аппараты ОНАПТ, автор 15 публикаций. Область научных интересов: сушка дисперсных пищевых продуктов в аппаратах с ТС. e-mail: ter-ma@osaft.odessa.ua

Омар Саид Ахмед – аспирант кафедры процессы и аппараты ОНАПТ, Автор 5 публикаций. Область научных интересов: концентрирование пищевых ННЖ.
E-mail: terma@osaft.odessa.ua, omersaidahmed@maktoob.com

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ НАГНЕТАНИЯ И ВСАСЫВАНИЯ КОМПРЕССОРА ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Шит М.Л., Журавлев А.А., Шит Б.М.
Институт энергетики АН Молдовы

Аннотация. Показана возможность реализации и разработана система управления давлениями на входе и выходе компрессора теплового насоса на диоксиде углерода, работающего при переменной тепловой нагрузке, и давлениях нагнетания и всасывания посредством двух последовательно включенных регулирующих клапанов. На примере показана методика расчета пропускных способностей регулирующих клапанов.

Ключевые слова: тепловой насос, диоксид углерода, система регулирования давления, компрессор.

SISTEMUL DE REGLARE AL DIFERENȚEI PRESIUNILOR DE COMPRIMARE ŞI DE ASPIRAȚIE ALE COMPRESORULUI AL INSTALAȚIEI CU POMPA DE CĂLDURĂ

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

Rezumat. Este prezentată posibilitatea realizării şi elaborat un sistem de dirijare al diferenţei presiunilor între ieşirea şi intrarea compresorului pompei de căldură pe dioxid de carbon, care funcţionează la sarcina termică variabilă şi presiunile de comprimare şi de aspiraţie prin două supape de reglare legate în serie. Este prezentat un exemplu de utilizare a metodei de calcul a capacităţii de transport a supapelor de reglare.

Cuvinte-cheie: pompa de căldură, dioxid de carbon, sistem de reglare, diferenţa presiunilor, compresori.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE DIFFERENCE OF DISCHARGE AND SUCTION PRESSURES OF THE HEAT PUMP STATION COMPRESSOR

Sit M.L., Juravleov A.A., Sit B.M.
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldov**a**

Abstract. Possibility of realization is shown and the control system of a difference of pressure between an exit and an input of the compressor of the heat pump on carbon dioxide working at variable thermal load, and discharge and suction pressures by means of two control valves connected in series is developed. On an example a flow coefficient calculation procedure of control valves is shown.

Keywords: heat pump, carbon dioxide, control system, pressure difference, compressor.

Условные обозначения.

Обозна-чение	Наименование	Обозна–чение	Наименование
$G_{\max}$	Максимальный массовый расход газа, кг/с.	P_4	Заданное давление после компрессора, МПа.
T_1	Температура газа перед регулирующим клапаном, К.	P_5	Текущее давление после компрессора, МПа.
ΔP_{KP}	Критический перепад давления на регулирующем клапане, МПа.	P_4'	Заданное давление после регулирующего клапана, установленного первым после газоохладителя, МПа.
G	Массовый расход газа, кг/с.	P_{vc}	Давление в самом узком сечении потока в затворе (vena contracta), МПа.
ρ_g	Плотность газа, приведенная к условиям: $P = 10^5 kPa$ и $T = 273 K$, $кг/м^3$.	P_c	Критическое давление (для диоксида углерода) 7,3773 МПа.
k'	Коэффициент сжимаемости.	ε_1	Рассогласование первого контура регулирования, МПа.
χ	Показатель адиабаты.	ε_2	Рассогласование второго контура регулирования, МПа.
P_4	Заданное давление после компрессора, МПа.	ρ_4	Плотность диоксида углерода в т. 4 термодинамического цикла, $кг/м^3$.
P_5	Текущее давление после компрессора, МПа.	ρ_5	Плотность диоксида углерода в т.5 термодинамического цикла, $кг/м^3$.

1. Введение

В настоящее время идет интенсивное развитие научных и практических вопросов, связанных с разработкой тепловых насосов, работающих на диоксиде углерода в

сверхкритическом цикле. При этом основным требованием к конструкции теплового насоса является обеспечение максимального коэффициента тепловой эффективности (COP). В тепловых насосах, работающих при постоянном давлении компрессора, эта задача решается при включении в контур теплонасосной установки одного регулирующего клапана. Нами рассматривается теплонасосная установка (ТНУ), работающая при переменных давлениях нагнетания и всасывания компрессора, а также при переменной тепловой нагрузке ТНУ. В этом случае для обеспечения его эффективной работы уже необходима установка двух последовательно включенных регулирующих клапанов. Максимизация коэффициента тепловой эффективности (COP) теплонасосной установки возможна только при независимом управлении давлением нагнетания и давлением всасывания компрессора. Вопросам, динамики и статики таких установок до настоящего времени не уделялось достаточного внимания. В данной работе рассматривается статика и динамика подсистемы управления регулирующими клапанами теплового насоса.

2. Работа регулирующих клапанов в теплонасосной установке

Принцип действия ТНУ (рис. 1) заключается в следующем. ТЭЦ, получая обратную воду от системы теплоснабжения, нагревает ее по пониженному температурному графику, причем требуемый догрев воды у потребителя обеспечивается за счет применения теплонасосных установок, установленных на ЦТП (или на ИТП) системы теплоснабжения. Обратная сетевая вода от ЦТП захолаживается в ТНУ и поступает обратно на ТЭЦ. При такой схеме обеспечивается значительная экономия газа на ТЭЦ, но при этом расходуется электроэнергия на привод ТНУ. При условиях, характерных для сложившегося уровня цен на тепловую энергию, газ и электрическую энергию в Республике Молдова, эта схема является привлекательной, с точки зрения вложения инвестиций. Так, при цене за 1 кВт тепловой мощности ТНУ 250–300 долл. США за 1 кВт тепловой мощности и цене 250–300 долларов США за $1000\,м^3$, и цене за 1 кВт электроэнергии 0,12 долларов США. Теплонасосная установка имеет простой срок окупаемости 3–5 лет .[1-8].

Суть работы системы управления температурой воды в т.1 схемы (рис. 1) состоит в изменении температуры газа на выходе из газоохладителя 3 за счет скоординированного управления мощностью компрессора 2, температурой газа на входе в компрессор, давления после компрессора и перед компрессором. Отметим, что рассматривается система качественного регулирования режима системы теплоснабжения, когда расход воды через отапливаемое здание не изменяется при изменении метеоусловий. В системе регулирование температуры воды осуществляется за счет работы подмешивающего насоса 5. Номерами 7, 8 и 9 обозначены перегреватель газа, испаритель и переохладитель газа.

Расход воды через насос корректируется регулирующим вентилем 6. В этой системе регулирующий клапан 1, работает как регулятор давления после компрессора, а регулирующий клапан 2 работает в режиме регулятора перепада давлений между входом и выходом компрессора.

Покажем, что данная схема включения регулирующих клапанов является работоспособной. Для этого запишем уравнения, связывающие давления до и после компрессора и расход газа через регулирующие клапаны.

$$dP_1^{'} + dP_2^{'} = P_4 - P_5 = P_d \qquad (1.1)$$

$$G_1 = k_1^{'}\sqrt{dP_1^{'}} \qquad (1.2)$$

$$G_1 = k_2^{'}\sqrt{dP_2^{'}} \qquad (1.3)$$

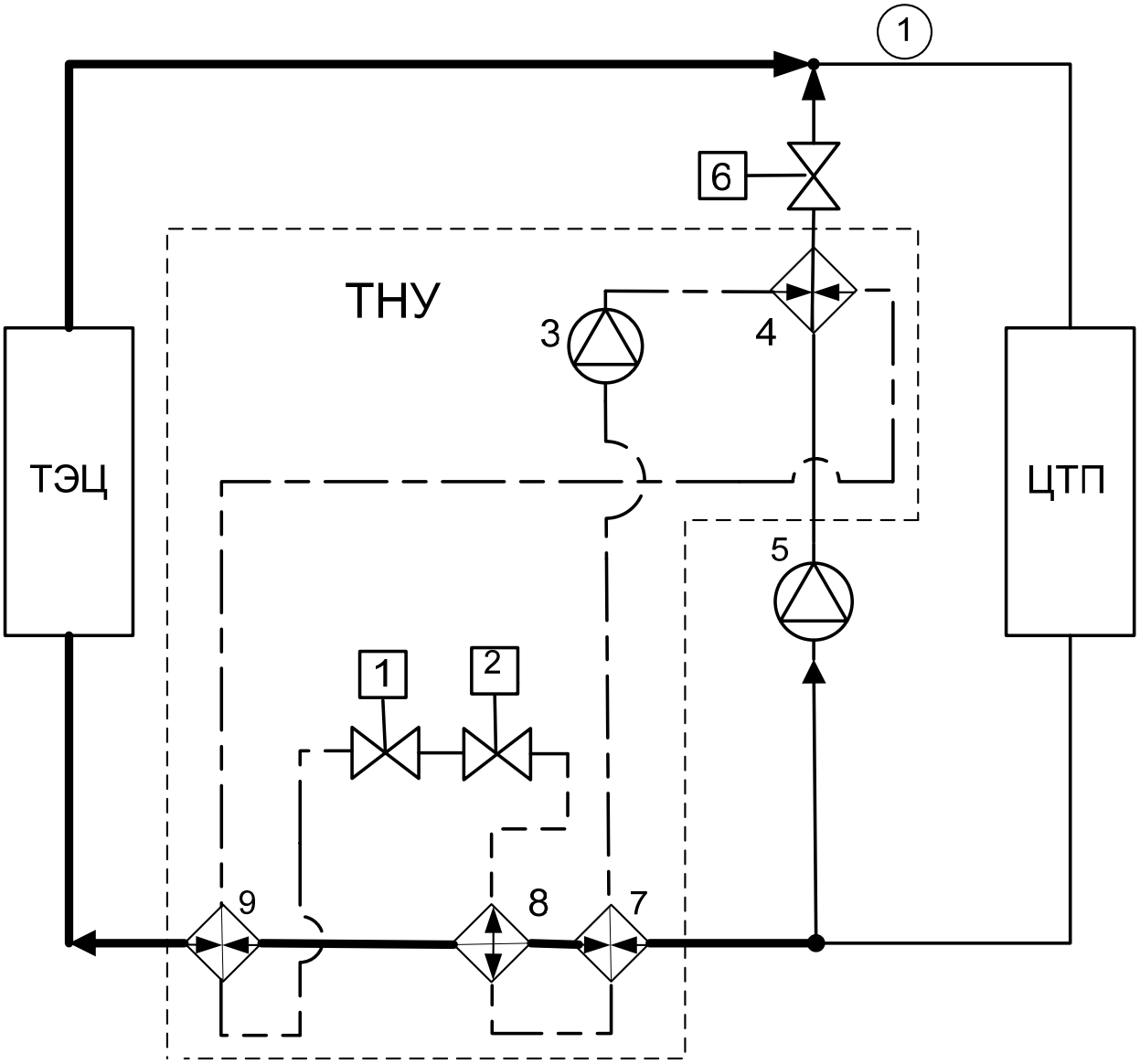


Рис.1.Схема использования ТНУ в системе теплоснабжения

В уравнениях (1.2) и (1.3) $k_1^{'}$ и $k_2^{'}$ – коэффициенты, определяемые свойствами газа в точках 4 и 5 термодинамического цикла ТНУ (рис. 2) и конструкцией регулирующих клапанов. Индекс вверху обозначения выбран для обозначения варианта расчета. Приравняв (1.2) и (1.3) и, подставив $dP_2^{'}$ в (1.1), получим, что

$$dP_1^{'} = \frac{P_d}{1 + \frac{(k_1^{'})^2}{(k_2^{'})^2}} \qquad (1.4)$$

$$dP_2^{'} = P_d - dP_1^{'} \qquad (1.5)$$

Выражение в знаменателе формулы (1.4) всегда больше единицы, следовательно, существует решения системы (1.1–1.3).

Зададимся значением расхода $G_2 < G_1$ при неизменном значении P_d. В этом случае уравнения системы примут следующий вид.

$$G_2 = k_1^{''}\sqrt{dP_1^{''}} \qquad (1.6)$$

$$G_2 = k_2^{''}\sqrt{dP_2^{''}} \qquad (1.7)$$

Решение системы примет вид:

$$dP_1^{''} = \frac{P_d}{1+\frac{(k_1^{''})^2}{(k_2^{''})^2}} \qquad (1.8)$$

$$dP_2^{''} = P_d - dP_1^{''} \qquad (1.9)$$

Чтобы система имела решение с учетом (1.1–1.3) необходимо, чтобы при этом $k_1^{'} \geq k_1^{''}$, $и$ $k_2^{'} < k_2^{''}$. Из уравнения (1.6) следует, что, $dP_1^{''} < dP_1^{'}$.

Итак, показано, что решение уравнений (1.1-1.3) всегда существует. Для нормальной работы системы управления клапанами необходимо предусмотреть вычислительное устройство, решающее систему (1.1–1.3) при текущих значениях температур и давлений хладагента в точках 4,5 термодинамического цикла ТНУ и требуемой тепловой нагрузке.

На рис. 2 цикл, с вершиной, помеченной цифрой 4 соответствует температуре наружного воздуха $-9^{O}C$, цикл с вершиной, помеченной цифрой $4'$соответствует температуре наружного воздуха $-2^{O}C$, а цикл с вершиной, помеченной цифрой $4''$соответствует температуре наружного воздуха $2^{O}C$. Значения температур и давлений в точках цикла 4(4’, 4”) и 5(5’,5” – соответственно, которые на рис. 2 не обозначены) приведены в таблице 1. Структурная схема системы управления регулирующими клапанами 1 и 1а приведена на рис. 3.

Система управления клапанами работает следующим образом: по входным данным функциональный вычислитель S решает систему уравнений (1.1–1.3) в зависимости от заданных расхода газа G и перепада давлений между выходом и входом компрессора – $P_d = P_4 - P_5$.

Обозначим регулирующий клапан, поз. 1 – РК1, а регулирующий клапан, поз. 2 – РК2.

Каждая из подсистем работает в режиме стабилизации задания полученного перепада давлений, причем на контур, где используется РК1 дополнительно поступает корректирующий сигнал по рассогласованию давления после компрессора от заданного. В качестве регуляторов $"C"$могут быть применены, например, ПИ–регуляторы. Зависимость $G = f(x_2)$(пропускная характеристика) является линейной, так как РК2 может быть выбран с линейной пропускной характеристикой.

Для РК1 лучше выбрать равнопроцентную пропускную характеристику так как в этом случае расходная характеристика будет мало отличаться от линейной из-за влияния перепада давлений на РК2 [8].

Из вида структурной схемы следует, что при изменении любого из параметров G или P_d происходит изменение задания регуляторам перепада давлений на РК1 и РК2. Такая структура системы управления позволяет при любом расходе газа получать максимальный коэффициент тепловой эффективности теплонасосной установки. Как очевидно, возможно использование в качестве РК1 одного клапана, а в качестве РК2 нескольких

параллельно включенных регулирующих клапанов. В случае, возникнут условия возникновения критического режима течения в РК2, то и РК1 должен быть выполнен в виде параллельно включенных регулирующих клапанов.

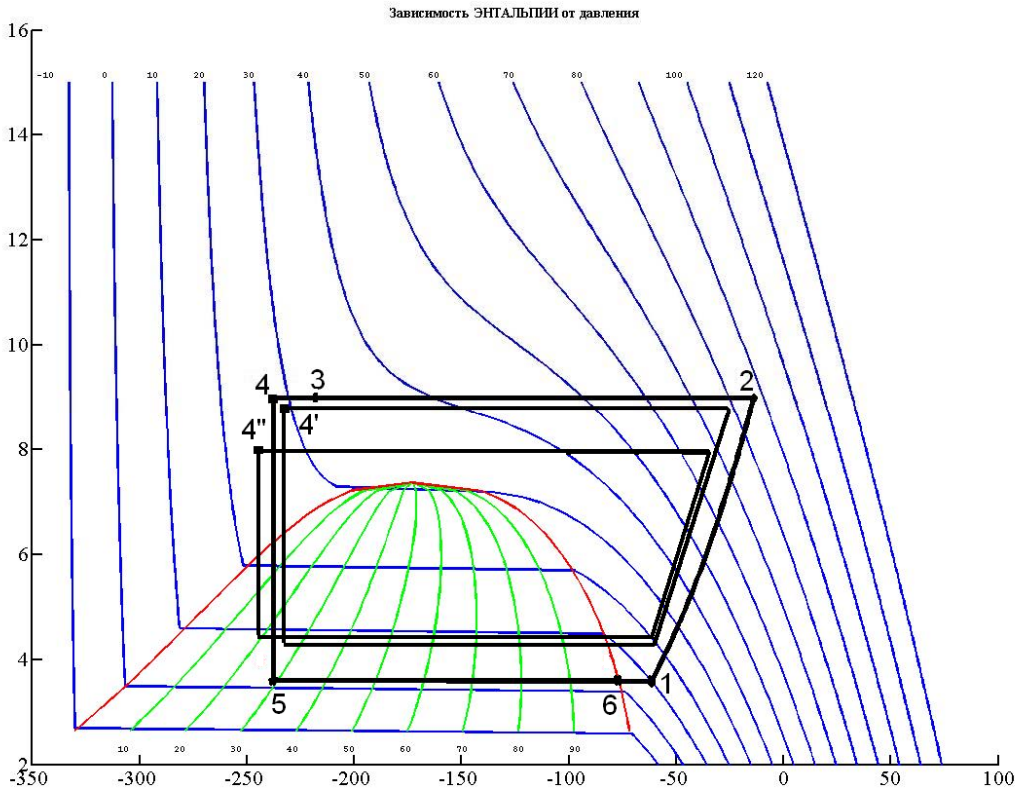


Рис.2. Термодинамические циклы ТНУ в зависимости от температуры наружного воздуха.

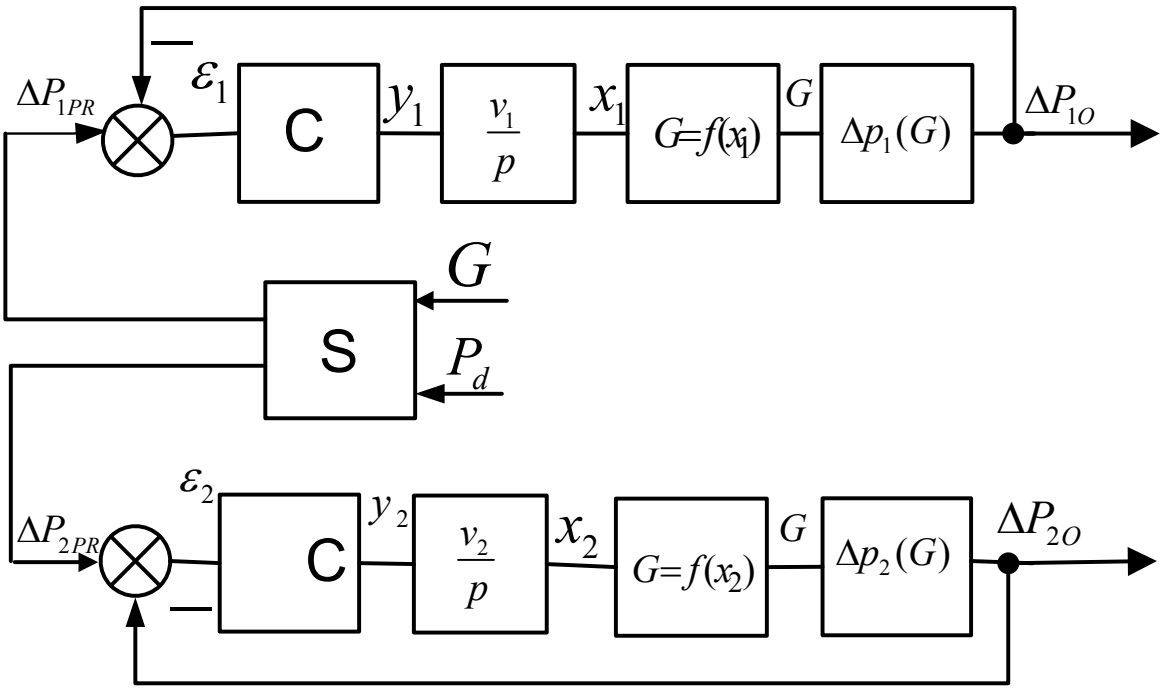


Рис.3. Структурная схема системы регулирования режима работы регулирующих клапанов

Пример вычисления пропускных способностей регулирующих клапанов 1 и 2.

Таблица 1

Исходные данные

Температура наружного воздуха, ^{O}C	P_4, MPa	T_4, ^{O}C	$P_4^{'}$, MPa	P_S, MPa	P_5, MPa 3,6	P_v, MPa	$(P_4 - P_4^{'})_{доп}$	T_5, ^{O}C	x_5 %,	G_{GO}, кг/с
–9	9	28	6,3	6,2	3,6	6,89	3,05	1,18	18,9	4,42
–2	9	28	6,9	6,2	4,2	6,89	3,05	7,2	28,9	3,55
2	8	25	6,3	6,0	4,5	6,44	2,42	10	28,9	2,62

Коэффициент пропускной способности регулирующего клапана РК1 вычисляется по формуле [8]

$$K_{V1} = 0.99 \cdot 10^{-2} \cdot G_{\max} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_4 \Delta p_1}}. \qquad (1.10)$$

В дальнейшем будем обозначать клапан 1 – РК1, а клапан 2 – РК2. Откуда зависимость между перепадом давления на клапане РК1 $\Delta p_1(G)$ и расходом газа G вычисляются по формуле

$$\Delta p_1(G) = 0,99 \cdot 10^{-2} / K v_1 \sqrt{\rho_4} \cdot G \qquad (1.11)$$

В таблице 2 приведены данные о перепадах давления ΔP_1 – на регулирующем клапане установленным первым по ходу движения хладагента после компрессора (РК1) и ΔP_2 – на следующем за ним по ходу движения хладагента регулирующем клапане (РК2) в зависимости от температуры наружного воздуха.

Таблица 2

Результаты расчета пропускной способности РК2 (результаты промежуточных вычислений)

Температура наружного воздуха, ^{O}C	Y	ρ^e	β	F_k	β_{cr} [12] (β_{cr} [8])
2	0,86	472.91	0.29	0.93	0,68 (0,55)
–2	0,81	392.33	0.39		
–9	0,78	382.44	0.46		

Таблица 3

Результаты расчета пропускной способности РК1 и РК2

Температура наружного воздуха, ^{O}C	ΔP_1, МПа	$(P_4 - P_4^{'})_{доп}$, МПа	ΔP_2, МПа	$n = \frac{dp_2}{dp_1}$	K_{V1}	K_{V2}
2	1,7	2,42	1,8	1,06	4,36	4,35
–2	2,1	3,05	2,7	1,29	6,61	5,62
–9	2,3	3,05	3,1	1,34	8,6	6,91

Определим границы бескавитационной работы регулирующего клапана РК1. Для этого определим сначала поправочный коэффициент r_c по формуле [8,10]

$$r_c = 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{P_{vc}}{P_c}}, \qquad (1.12)$$

При кавитации установлено, что:

$$P_{vc} = r_c \cdot P_v \qquad (1.13)$$

Давление P_v определяется по температуре на входе в РК1, так как температура жидкости существенно не изменяется между входом в РК1 и наиболее узким сечением для прохода жидкости в затворе РК. Обозначим $k_c = 0,28 \cdot \sqrt{P_v / P_c}$. Подставим (1.11) в (1.10) и решим полученное квадратное уравнение относительно r_c. Решением уравнения будет выражение (отбрасываем значение $r_c > 1$):

$$r_c = 0,96 + k_c^{\,2} / 2 - 0,5 \cdot \sqrt{(1,92 + k_c)^2 - 4 \cdot 0,96} \qquad (1.14)$$

Для случая диоксида углерода, который представляет собой легко вскипающую жидкость, определяют эффективный перепад давления $(P_4 - P_4^{'})_{доп}$, при котором еще можно регулировать расход. Эффективному перепаду давления соответствует коэффициент кавитации или коэффициент критического расхода K_m.

Коэффициент критического расхода или (pressure recovery coefficient) определяется из выражения [8,10]

$$K_m = \frac{P_4 - P_4^{'}}{P_4 - P_{vc}} \qquad (1.15)$$

На практике этот коэффициент уточняется по результатам испытаний [9,10]. По данным [11] для большинства регулирующих клапанов $K_m = 0,9$.

Выражение для эффективного перепада давления $(P_4 - P_4^{'})_{доп}$ записывается в виде:

$$(P_4 - P_4^{'})_{доп} = K_m \cdot \left(P_4 - r_c P_v\right) \qquad (1.16)$$

Разумеется, для точного вычисления K_m необходимо знать гидравлические сопротивления участков всей гидравлической цепи, но эта задача решается в каждом конкретном случае. Как следует из рассмотрения таблицы 2 перепад давления на РК1, при котором происходит кавитация, намного больше принятого дляРК1. Итак, при приведенных выше исходных данных при заданных максимальных перепадах давления на РК1 кавитация не наступает. Таким образом, значение допустимого максимального перепада для РК1 еще раз свидетельствует в пользу установки двух последовательно установленных регулирующих клапанов.

Рассчитаем коэффициенты пропускной способности для регулирующего клапана РК2.

Вычисляем по формуле [12, стр.41]. При расчете этого параметра согласно [8] коэффициент 1,24 в формуле отсутствует.

$$\beta_{cr} = 1,24 \cdot \left[2/\left(k+1\right) \right]^{k/(k-1)} \qquad (1.17)$$

где $$k = 1,3; \qquad (1.18)$$

Режим движения двухфазной сжимаемой смеси – докритический ($\beta < \beta_{cr}$).

Для РК2 для всех температур проведем расчет, используя методики [9,16] при $F_p = 1;$.

$$C_{V2} = \frac{G \cdot 3600}{27,3 \cdot F_{p2} \cdot Y_2 \cdot \sqrt{(P_4^{'} - P_5) \cdot \rho^e}} \qquad (1.19)$$

В данном случае в качестве ρ^e принята величина, вычисляемая по формуле [16]

$$\rho^e = \left(\frac{f_g}{\rho^{'} \cdot^2 Y} + \frac{f_l}{\rho^{''}} \right)^{-1}, \qquad (1.20)$$

Где Y- коэффициент расширения газа (gas expansion factor)

$$Y = 1 - \frac{\Delta p_2}{3 \cdot P_4^{'} \cdot F_K \cdot x_T}. \qquad (1.21)$$

$$F_K = \frac{k}{1,4}. \qquad (1.22)$$

Рассчитаем плотность смеси по формуле (9.30), с.187, [8]:

$$\rho_1^e = \frac{\rho_4^{'} \cdot \rho^e}{\ln(\rho_4^{'} / \rho^e)}. \qquad (1.23)$$

В этом случае значение пропускной способности клапана РК2 будет отличаться от значения пропускной способности, рассчитанной по формуле [1.16].

Из показанного выше следует, что для выбора регулирующего клапана, работающего с двухфазной смесью, необходимо проведение экспериментальных исследований.

Кроме того, из рассмотрения таблицы 2 следует, что система работает при переменном модуле гидравлической системы и для обеспечения качества работы системы желательно использовать при технической реализации регулирующего клапана РК1 три параллельно включенных клапана с пропускными способностями, приведенными в графе « K_{V1} » таблицы 2., а для РК2 два параллельно включенных регулирующих клапана.

В зависимости от температуры наружного воздуха происходит изменение заданий по давлению газа после компрессора и перед компрессором. При этом алгоритм перехода – следующий. Вначале начинает изменяться перепад давления на первом клапане, и, одновременно с начинает изменять свой режим работы РК2.

Выводы

1. Для обеспечения независимого регулирования давлений до и после компрессора теплового насоса на диоксиде углерода, работающего в сверхкритическом цикле давлений на входе и выходе компрессора в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки в тепловом насосе необходима установка двух последовательно работающих групп

регулирующих клапанов. В одной из групп возможна установка, как минимум одного клапана, а во второй, как минимум, двух клапанов параллельно установленных клапанов.

2. Соотношения для выбора коэффициентов расхода этих клапанов могут быть получены путем решения системы уравнений расхода и перепадов давлений на клапанах.

3. Возможен выбор конструктивных характеристик группы клапанов, обеспечивающих бескавитационный режим работы регулирующих клапанов, через которые течет жидкая фаза и докритический режим работы регулирующих клапанов, через которые течет двухфазная среда.

Литература

1. A.Juravleov, M.Sit, B. Sit, O. Poponova, D.Timcenco The use of heat pump systems in district heating. Analele Universităţii din Craiova, Seria: Inginerie Electrica, nr.31, 2007, Vol.II, p.229-232.
2. Шит М.Л., Журавлев А.А., Попонова О.Л., Шит Б.М., Тимченко Д.В. Применение теплонасосных установок в квартальных тепловых сетях. III Международная конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». 13-15 ноября 2007 г., СПбГУНиПТ.с.117-124.
3. Шит М.Л., Журавлев А.А., Попонова О.Л., Шит Б.М., Тимченко Д.В. Применение теплонасосных установок в квартальных тепловых сетях централизованного теплоснабжения. IV Международная конференция «Возобновляемая и малая энергетика», 24-25 октября 2007 г., Москва. Тезисы докладов, с. 57…61.
4. Шит Б.М., Журавлев А.А., Шит М.Л., Повышение энергетической эффективности теплонасосной установки на диоксиде углерода в системе комбинированного теплоснабжения за счет оптимизации ее системы управления. Проблемы региональной энергетики, N1, 2008, http://ieasm.webart.md/data/m71_2_61.doc.
5. Журавлев А.А., Шит М.Л., Шит Б.М., О.Б. Попонова, А.Л. Зубатый «Система регулирования газоохладителя теплонасосной установки в комбинированной системе теплоснабжения в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки». Проблемы региональной энергетики, N2, 2008, http://ieasm.webart.md/data/m71_2_67.doc.
6. Juravleov A.A., Sit M.L., Sit B.M., Optimization of the thermodynamic cycle and control system of heat pump station in the wide range of heat capacity variation. International Conference. International Seminar "Heat pipes, heat pumps, Refrigeration, Power Sources", 8–13 September, Minsk, 2008, pp. 438-444.
7. Журавлев А.А., Шит М.Л., Шит Б.М. „Управление теплонасосной установкой на диоксиде углерода в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки". Наукові праці Одеської Національної Академії Харчових Технологій, Том.32, V1, 2008.
8. Благов Э.К., Ивницкий Б.Я. Дроссельно-регулирующая арматура ТЭС и АЭС.– М.: Энергоатомиздат, 1990.–288с.
9. Buletin OZ1000/7/00 "Masoneilan Control Valve Sizing Handbook", Masonenline-Dressler,Valve Division. www.engr.sjsu.edu/jennimi/Classes/CHE%20185/Dr%20Jennings/Notes/OZ1000.pdf
10. Valve Sizing Reference Guide. http://www.norriseal.com/files/comm_id_47/Valve_Size_Manual.pdf
11. Valve Sizing & Selection Technical Reference, www.warrencontrols.com/assets/pdfs/valve_sizing_reference.pdf
12. Арзуманов Э.С. Расчет и выбор регулирующих органов автоматических систем. М.: Энергия, 1971.
13. Иткина Д.М. Исполнительные устройства систем управления в химической и нефтехимической промышленности. – М.: Химия, 1984. – 232 с.
14. Control Valve Handbook. Forth Edition, Fisher Controls International LLC 2005.

15. Branstetter Carol Jeff Selection, sizing and operation of control valves for gases and liquids. www.ceesi.com/docs_techlib/events/ishm2003/Docs/6110.pdf
16. Parcol. Handbook for control valve sizing. http://www.parcol.com/docs/1-I_gb.pdf

Anatol JURAVLIOV – 60 ani

Inginer, doctor în ştiinţe tehnice, sef de laborator al Institutului de Energetică al AŞM

Născut la 6 mai 1949 în or. Belaia Ţercovi, Ukraina. A absolvit şcoala medie nr. 12 din or. Aşhabad, Turkmenistan, facultatea de electromecanică a Universităţii Tehnice de Stat din Sanct-Petersburg în 1972. În cadrul Institutului de Energetică al A.Ş.M. a parcurs calea de la inginer, cercetător ştiinţific inferior pînă la cea de şef de laborator „Sisteme de conducere cu microprocesoare”. În perioada 2004-2008 a fost membru al secţiei de ştiinţe Fizice şi Inginereşti a A.Ş.M.

În anul 1989 Dl Anatol Juravliov a susţinut teza de doctor în ştiinţe tehnice cu tema „Calculatoare personale analogo-digitale pentru modelarea convertoarelor cu tiristoare”. Din 1985 pînă la 1989 a activat în funcţia de şef interimar al laboratorului, iar din 1991 ca şef de laborator ales prin concurs. Pe parcursul acestei perioade de timp a elaborat o structură nouă a calculatorului personal analogo-digital (CPAD) . În baza soluţiilor propuse uzina „ Sigma” a confecţionat seria experimentală a acestui tip de calculator necesar pentru calcularea rapidă a proceselor dinamice în structuri cu topologie variabilă în timp, ca exemplu a convertoarelor cu tiristoare. Procedura de programare a componentei analogice în aceste calculatoare a fost automatizată, ceea ce excludea posibilele erori la formarea schemei de calcul. În clasa dată de calculatoare CPAD depăşeau prototipurile cunoscute în lume şi după capacităţile de calcul concurau cu maşinile electronice mari de calcul. Noutatea şi inovaţia soluţiei propuse este confirmată de 8 brevete de invenţie.

În perioada anilor 1991-1999 s-a elaborat şi confecţionat sistemul de control şi diagnostică cu microprocesoare a redresoarelor de putere mare de tensiune înaltă. Sistemul a fost implementat la A.I.”Electrotehnica” din or. Tallinn, Estonia. A elaborat legi energoeficiente de dirijare cu funcţionarea diverselor obiecte consumatoare de energie şi resurse energetice, ca: sera industrială, edificii cu multe nivele, schimbător de căldură, cazan de abur cu tambur alimentat cu gaze naturale şi păcură (aa.2001-2005). S-a propus soluţia de sporire a eficienţei procesului de ardere a combustibilului bazat pe ridicarea indicilor de calitate a procesului de ardere. Aceasta permite economisirea până la 4% din consumul de gaze naturale.

Direcţia intereselor ştiinţifice în perioada 2006-2009 s-a axat în domeniul sporirii eficienţei energetice, inclusiv prin utilizarea pompelor de căldură care funcţionează în baza corpului de lucru –bioxid de carbon. A fost argumentată eficienţa şi necesitatea utilizării ca corp de lucru al bioxidului de carbon în pompele de căldură pentru valorificarea energiei termice a surselor cu potenţial termic redus. Această soluţie se încadrează în prevederile măsurilor de protecţie a climei. S-a propus un ciclu termodinamic a pompei de căldură cu bioxid de carbon pentru a funcţiona în bandă largă de schimbare a sarcinilor termice cu elaborarea metodei de utilizare eficientă a acestor pompe de căldură în schemele complexe de asigurare cu căldură a consumatorilor şi aceasta este o contribuţie în utilizarea surselor netradiţionale de energie.

Rezultatele cercetărilor şi elaborărilor sunt publicate în 2 monografii, cca. 80 articole ştiinţifice, 12 brevete de invenţie şi un patent al Republicii Moldova. Dl A. Juravliov este menţionat cu medalia jubiliară „60 ani ai AŞM”

ЛЕОНТИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ МЕДВЕДЕВ

В самом начале весны, 23.04.2009, на 71-м году жизни скончался доктор экономических наук, ведущий научный исследователь Института Энергетики Академии Наук Молдовы, Леонтий Григорьевич Медведев.

Имя Л.Г.Медведева широко известно научной общественности как выдающегося специалиста по проблемам: макро-, мезо- и микроэкономики; взаимосвязей в развитии экономики и энергетики; энергопотребления, энергоемкости и энергоэффективности; тарифно-ценовой политики в энергетике; влияния состояния активов на уровни затрат и расходов; форм собственности, организационно-правовых форм предприятий, их величины и территориального размещения и влияния на финансовые результаты работы; обеспечения экономической безопасности страны.

Он автор более 70 научных публикаций, в том числе книг “Енержетика агрикултурий Молдовей”, “Энергетика в экономике промышленности Молдавии”, “Энерговооруженность и производительность труда”, “Энергоресурсы сельского хозяйства”, “Энергетика в экономике Молдавии”.

В 1960 г. окончил экономический факультет Кишиневского Государственного Университета, специальность “финансы и кредит”.

В 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию по экономическим проблемам сельской энергетики.

В 1972-1991 гг. преподавал политическую экономию в Кишиневском политехническом институте и Молдавском Госуниверситете, доцент.

Проходил научно-педагогическую стажировку при Северо-Кавказском Научном центре (Ростов на Дону), Белорусском Госуниверситете (г. Минск) и Московском Госуниверситете им. М.В.Ломоносова.

С 1991 г. работал в Институте Энергетики Академии Наук Молдовы.

Широкая эрудиция, глубокие знания не только теоретических, но и практических вопросов экономики и энергетики способствовали тому, что на протяжении многих лет Л.Т. Медведев успешно вел исследования вопросов макроэкономики, экономики энергетики как на уровне отрасли народного хозяйства, так и на уровне предприятия.

Особенно надо отметить, что в течение последних лет Леонтий Григорьевич Медведев сотрудничал с нашим журналом. Он во многом способствовал высокому научному уровню публикуемых материалов, развитию и пропаганде исследовании в области экономики энергетики и наряду с именами других выдающихся молдавских ученых вписал свое имя в историю журнала.

Светлый образ Леонтия Григорьевича Медведева навсегда останется в нашей памяти как пример беззаветного служения отечественной науке и обществу.

Редколлегия и редакция журнала “Региональные проблемы энергетики”, коллеги, друзья, ученики.