ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА В СИСТЕМЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ЕЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ Шит Б.М., Журавлев А.А., Шит М.Л.

Институт Энергетики АН Молдовы

ieasm@cc.acad.md

Аннотация. В работе рассматривается схема теплонасосной установки для центрального теплового пункта системы теплоснабжения, получающей тепло от ТЭЦ. Рассматривается структурная схема управления установкой, структурная схема системы регулирования давления компрессора. Приведено описание законов управления испарителем установки при переменной тепловой нагрузке, и газоохладителем с учетом требования максимизации коэффициента производства тепла.

Ключевые слова. Теплонасосная установка, диоксид углерода, закон управления.

SPORIREA EFICIENȚEI ENERGETICE A INSTALAȚIEI CU POMPĂ DE CĂLDURĂ CU BIOXID DE CARBON UTILIZATĂ ÎN SISTEMUL COMBINAT DE TERMOFICARE PRIN OPTIMIZAREA SISTEMULUI DE DIRIJARE

Şit B.M., Juravleov A.A., Şit M.L. Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat. În lucrare este examinată schema instalației cu pompa de căldură pentru punctul termic central al sistemului de termoficare, care este alimentat de la CET. Este examinată schema de structură a sistemului de dirijare a instalației și schema de structură a sistemului de dirijare a presiunii compresorului. Este prezentată descrierea legilor de dirijare a evaporatorului la sarcini termice variabile cu descrierea legilor de dirijare a răcitorului de gaze, având ca scop obținerea valorii maxime a coeficientului de producere a căldurii.

Cuvinte cheie. Pompa de căldura, bioxid de carbon, legile de dirijare.

HEAT PUMP STATION WITH CARBON DIOXIDE AS A WORKING FLUID ENERGY EFFICIENCY GROWTH IN COMBINED DISTRICT HEATING SYSTEM DUE TO ITS CONTROL SYSTEM OPTIMIZATION.

Sit B.M., Juravleov A.A., Sit M.L.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Republic of Moldova Abstract. A diagram of the heat pump station (HPS) for the central heat supply station of the district heating system, which gets the power from the CHP plant is examined. A block diagram of the control of the system and compressor pressure control system are examined. The description of the control laws of evaporator at the variable heat load of the HPS and control laws of the gas cooler taking into account the goal of achieving the maximum of COP of HPS is shown as well.

Key words. Heat pump station, carbon dioxide, control law.

Важным направлением развития энергетики является использование возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов (тепловые сбросы энергетики, промышленности, коммунального хозяйства и др.), как правило, имеющих низкий температурный потенциал. Применение теплонасосных установок (ТНУ), в том числе парокомпрессионного типа, позволяет при использовании их в системах теплоснабжения обеспечить экономию топлива на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), снизить стоимость тепла для потребителя. Наиболее перспективными с точки зрения экономики и экологии являются ТНУ, использующие диоксид углерода в качестве рабочего тела. Свойства и энергетическая эффективность ТНУ значительно изменяются на режимах, отличных от номинального, т.е. при изменении условий использования, определяемых, в основном, температурами холодного и горячего теплоносителей. Проблема эффективного управления тепловыми насосами на режимах, отличных от номинального, является актуальной и именно в этом направлении выполнена данная работа. Объектом исследования являются системы управления ТНУ на центральных тепловых пунктах в квартальных тепловых распределительных сетях, эффективные термодинамические циклы и законы управления, обеспечивающие максимально возможный коэффициент использования тепла (СОР) ТНУ.

Вопросам разработок и использования ТНУ на диоксиде углерода (R744) посвящено большое количество работ, в качестве примера можно назвать работы [1-5]. Вопросам исследования систем управления ТНУ посвящены работы [6-12], в которых определены основные технические решения по управлению тепловым насосом, в том числе и с учетом необходимости оптимизации цикла ТНУ. Вопросам регулирования режимов систем теплоснабжения посвящены большое количество работ таких авторов, как Е.Я. Соколов, В.И. Ливчак, В.С. Фаликов, Н.М. Зингер, А.Н. Мелентьев, С.А. Чистович, В.П. Туркин и мн. др.

К настоящему времени, вопросы управления работой системы ТЭЦ-ТНУ-ЦТП (центральный тепловой пункт) практически не проработаны.

Целью работы является на основании разработанной структуры ТНУ, создать эффективный термодинамический цикл ТНУ и ее систему управления для работы в квартальных тепловых сетях централизованной системы теплоснабжения.

Структурная схема ТНУ для системы отопления и горячего водоснабжения (ГВС) приведена на рис.1. На рис.1 приняты следующие обозначения: 1- регулирующий клапан на линии подмеса обратной сетевой воды, 2 — отопительная нагрузка теплового пункта; 3 — насос подмеса обратной сетевой воды квартальной сети отопления; 4,5 — газоохладители системы отопления и системы горячего водоснабжения, 6 — компрессор; 7, 8 — регулирующие клапаны расхода рабочего тела ТНУ через газоохладители; 9 — испаритель; 10 — регулирующий клапан давления после компрессора; 11— промежуточная емкость контура промежуточного теплоносителя; 12 — насос подачи промежуточного теплоносителя в испаритель; 13 – насос подачи промежуточного хладагента из испарителя в теплообменник обратной сетевой воды и промежуточного теплоносителя; 14 — теплообменник перегрева рабочего тела после испарителя; 15 — отделитель жидкой углекислоты; 16 теплообменник переохлаждения рабочего тела (РТ) ТНУ; 17 — теплообменник обратной сетевой воды и промежуточного теплоносителя; 18 — регулирующий клапан давления РТ после испарителя; 19 — регулирующий клапан контура переохлаждения РТ после газоохладителей; 20 — регулирующий клапан перегревателя РТ после испарителя. Линия 1 – линия подачи сетевой воды от ТЭЦ в квартальную тепловую сеть. Линия 2 – линия возврата обратной квартальной сетевой воды в тепловую сеть. Линии 3 и 4 – трубопроводы подачи воды от источника холодного водоснабжения и подачи воды в систему горячего водоснабжения. Установка работает следующим образом. Прямая сетевая вода от теплоэлектроцентрали поступает с пониженным температурным графиком в систему отопления отапливаемых зданий 2, часть ее, подогреваемая в газоохладителе 5 теплового насоса, отбирается циркуляционным насосом 3. Эта часть расхода воды определяется степенью открытия регулирующего клапана 1 (в зависимости от требуемой температуры прямой сетевой воды на входе в систему отопления зданий). Эта вода подогревается в газоохладителях 4 и 5. Контур циркуляции рабочего тела теплового насоса обозначен полужирной линией. Обратная вода (обозначена тонкой линией) из квартальной тепловой сети подается на теплообменник 17 контура промежуточного теплоносителя. В этом контуре циркулирует незамерзающая жидкость, например, этиленгликоль. Контур циркуляции промежуточного теплоносителя обозначен пунктирной линией. Циркуляция обеспечивается за счет двух насосов 12 и 13. Уровень жидкости в испарителе (вертикального жидкостного типа) поддерживается благодаря соответствующему

2

режиму управления насосами. Уровень жидкости в испарителе определяет заполнение испарителя со стороны рабочего тела жидкой углекислотой (в месте их контакта через стенки труб испарителя происходит теплообмен между промежуточным теплоносителем и рабочим телом теплового насоса), что и определяет тепловой режим испарителя. В испарителе происходит испарение жидкой углекислоты, после чего эта смесь поступает через отделитель жидкости 15 в теплообменник -14, установленный перед компрессором. Перегрев газа перегреватель газа обеспечивается за счет теплоты обратной воды квартальной сети теплоснабжения. Величина перегрева газа определяется расходом воды через первичный контур теплообменника 14 и регулируется регулирующим клапаном 20, включенным параллельно по воде теплообменнику 14. За счет регулируемого перегрева рабочего тела после испарителя его температура остается постоянной вне зависимости от температуры после испарителя. В результате повышается надежность и стабильность теплового насоса вне зависимости от режима работы испарителя и связанного с ним контура циркуляции промежуточного теплоносителя.



Рис.1. Схема теплонасосной установки

Компрессоры 6 всасывают пар рабочего тела и подают его в газоохладители 4. и 5. Расход газа через каждый из газоохладителей регулируется регулирующими клапанами 7 и 8. Далее рабочее тело через регулирующий клапан 10 поступает в теплообменник - переохладитель рабочего тела 16 и далее в испаритель 6 через регулирующий давление после испарителя клапан 8. Переохлаждение рабочего тела после газоохладителей обеспечивается за счет теплообменного аппарата 16, включенного по первичной линии обратного теплоносителя после испарителя (по ходу теплоносителя), а по первичной линии после газоохладителей. лвижения Регулирование степени переохлаждения обеспечивается за счет регулирующего клапана 19, включенного параллельно первичной линии теплообменника 16. Отличительной особенностью предлагаемой схемы ТНУ является отсутствие в ней рекуперативного теплообменника между рабочим теплом после газоохладителей и рабочим телом перед компрессором. Этот теплообменник заменен теплообменниками 14 и 16. Дело в том, что при переменном расходе рабочего тела режим работы этого теплообменника становится нерегулируемым при расходах, отличающегося от расхода, принятого в качестве номинального. При наличии этого теплообменника система не смогла бы регулировать степень перегрева рабочего тела при разных тепловых нагрузках, что привело бы к снижению СОР.

При решении вопроса об использовании теплоты обратной воды из системы отопления зданий при использовании теплонасосных установок возникает проблема: как обеспечить максимальную энергетическую эффективность этой системы. Для решения этой задачи необходимо разработать соответствующую структуру системы управления и сформулировать основные требования к ней.

предметом дальнейшем изучения является управления В система комбинированным тепловым насосом, предназначенным как для подогрева обратной воды из системы отопления, так и для ГВС, оптимальной по критерию максимума СОР. В такой системе обеспечивается оптимизация управления работой системы, в том числе, и за счет распределения потоков рабочего тела между газоохладителями, ответственными за нагрев воды из системы отопления и воды из трубопровода холодного водоснабжения с тем, чтобы обеспечить минимум расхода электроэнергии на поддержание заданного режима. С этой целью потребление энергии минимизируется путем:

• оптимизации параметров циклов работы ТНУ в переходных процессах;

• минимизацией потребления энергии за счет оптимизации переходных процессов при действии возмущений.

Основной отличительной особенностью системы управления является ее двухуровневая структура, где во внешнем контуре управления координирующим регулятором выполняется оптимизация параметров термодинамического цикла, т.е., динамических заданий для конкретных систем управления THУ. В самих подсистемах управления производится оптимизация по критериям минимума среднеквадратической ошибки, быстродействия и других (с учетом работы этой подсистемы в многосвязной системе управления) при приложении к подсистеме возмущающих и задающих воздействий. В ТНУ, установленной на ЦТП, рабочий режим определяется атмосферными условиями (температурой наружного воздуха, скоростью ветра), параметрами теплоносителя, характером тепловой нагрузки. Характер тепловой нагрузки и ее изменение во времени, в свою очередь, определяет заданные и фактические значения температур прямой и обратной сетевой воды, подаваемой в здание. В тепловом насосе параметры, определяющие его режим работы, это давление и температура рабочего тела в газоохладителе, давление и температура в испарителе, в теплообменнике перегрева рабочего тела - перегрев рабочего тела после

испарителя. Управлениями для ТНУ являются мощность и скорость вращения привода компрессора, давление после компрессора, степень открытия регулирующего клапана, расходы воды через испаритель и газоохладители.

Так, например, при управлении регулирующим клапаном изменяется разность давлений между стороной высокого и низкого давления ТНУ, которая влияет на расход рабочего тела, теплообмен и на СОР. При скоординированном управлении скоростью и мощностью привода компрессора и пропускной способностью регулирующего клапана происходит экономия энергии и повышение надежности работы ТНУ. При работе ТНУ ее энергетическая эффективность существенно зависит от термодинамического состояния рабочего тела в различных ее компонентах. Так, работа испарителя характеризуется температурой (или давлением) испарения, перегревом рабочего тела, и зависит от давления и температуры газа. Соответствующим образом организованное управление этими переменными и их изменение в динамике ведут к энергоэффективному функционированию установки и продлевают срок ее службы. Так, например, регулирование перегрева очень важно для работы компрессора. Если перегрев мал, то возникает опасность попадания жидкого рабочего тела в компрессор, а если перегрев повышен, то снижается энергетическая эффективность установки и возможно значительное повышение температуры нагнетания компрессора. При изменении атмосферных условий, температур прямой и обратной сетевой воды, солнечной радиации, происходит изменение, как задания, так и условий работы ТНУ. При этом переход к новому режиму работы ТНУ должен происходить за минимальное время и с минимумом перерасхода электрической энергии (так как эти возмущения действуют, по сути дела, непрерывно).

На структурной схеме системы управления ТНУ показаны ее составляющие. Предварительно рассмотрим термодинамические циклы работы ТНУ в зависимости от температуры наружного воздуха, см. рис.3. t_H – температура наружного воздуха. На рис.3 т.1 – давление и температура РТ после переохладителя, т.2 – те же после компрессора, т.3 – те же после газоохладителя системы отопления, т.4 – те же после переохладителя газа, т.5 – те же перед испарителем, т.6 – те же после испарителя. Из рассмотрения циклов видно, при изменении температуры наружного воздуха необходимо обеспечить работу ТНУ при переменных давлениях в газоохладителе и испарителе. На рис.3. внутренний график показывает цикл ТНУ при $t_H = 6^{\circ}C$, а наружный при $t_H = -9^{\circ}C$, где на оси абсцисс – удельная энтальпия в кДж/кг, а давление в МПа.

Как видно из рассмотрения диаграммы «давление - энтальпия» (см. рис. 3) у рассматриваемой ТНУ на вход в РК (регулирующий клапан) поступает газ (или жидкость), а на выходе РК из-за дросселирования появляется газо-жидкостная смесь. Процесс снижения давления в РК является адиабатическим. Содержание жидкой фазы в смеси после РК находится в зависимости от режимов работы газоохладителя и испарителя.

Известно, что регулирующий клапан, как объект управления в контуре стабилизации давления после газоохладителя представляет собой инерционное звено с переменными параметрами (инерция клапана определяется инерцией его привода), зависящими от параметров рабочего тела, проходящего через клапан.

Поэтому в структуру системы стабилизации давления перед компрессором необходимо ввести сигналы, характеризующие температуру и давление рабочего тела перед РК, а также прогнозируемые характеристики рабочего тела, определяемые параметрами термодинамического цикла ТНУ. В транскритических циклах давление перед регулирующим клапаном стабилизирует режим работы газоохладителя и, следовательно, давление нагнетания компрессора. Поэтому, давление нагнетания компрессора не является независимой переменной, и компрессор и газоохладитель (газоохладители при подогреве воды для ГВС) необходимо рассматривать совместно как один узел.



Рис.2. Структурная схема системы управления



Рис.3 Циклы теплонасосной установки

Для оптимального регулирования по критерию максимального СОР ТНУ обеспечить температуры воды после газоохладителя необходимо режим скоординированного управления, давлением компрессора, как так И его производительностью, а также температурой перегрева газа. Эта задача может решаться специализированным вычислителем в ускоренном масштабе времени (при условии, что динамические модели ТНУ и отапливаемого объекта предварительно идентифицированы).

Структура системы управления давлением рабочего тела после испарителя представлена на рис.4. На рис.4 *P_s* – заданное давление после компрессора, P_o – фактическое давление после компрессора $\varepsilon = P_S - P_O$ - сигнал рассогласования регулятора C, k_1, T_1 – коэффициент усиления и постоянная времени электрического привода штока регулирующего клапана, как объекта управления скоростью перемещения штока регулирующего клапана (РК) v-передаточное отношение редуктора РК, y, \dot{y} – перемещение РК и скорость РК, f(y) – уравнение пропускной характеристики РК, как функция хода штока РК, G – массовый расход газа на входе в РК, Т, – температура газа перед РК, х₀ – сухость газожидкостной смеси перед испарителем. Регулятор этой системы выбирается из класса нелинейных импульсных регуляторов, в частности, - это должен быть широтно-импульсный регулятор. Так как на пропускную характеристику РК влияют параметры рабочего тела до РК и перед РК, а также заданное значение сухости газожидкостной смеси перед испарителем, то в регулирования рассматриваемого параметра, с целью обеспечения законе устойчивости и точности регулирования, должна быть учтена зависимость пропускной характеристики регулирующего клапана от вышеуказанных параметров. Критерием качества работы этой системы должна являться точность поддержания заданного значения давления перед компрессором.



Рис.4. Структурная схема системы давления рабочего тела после компрессора

Выводы и направления дальнейших исследований

1. Для достижения максимальной энергетической эффективности комплекса ТНУ – ЦТП необходима двухуровневая система управления, в которой координирующий регулятор обеспечивает выдачу сигналов задания на регуляторы подсистем.

2. Система регулирования давления после испарителя должна работать в режиме регулятора перепада давления между давлением после компрессора и давлением после испарителя.

3. Система регулирования температуры воды после газоохладителя должна быть выполнена в виде системы с моделью объекта и включать в себя подсистему регулирования давления газа после газоохладителя, и управляющий блок мощностью компрессора и расходом газа через газоохладитель.

Литература

1. Kim M.H., Pettersen J., Bullard C.W. Fundamental process and system design issues in CO2 vapor compression systems. Progress in Energy and Combustion Science, V(30), 2004, p.119-174.

2. Eisenhover B.A., Runolffson System level modeling of a transcritical vapor compression system for bistability analysis. Nonlinear Dynamics, Springer, 2008, http://www.springerlink.com/content/unk0535627143633/fulltext.pdf.

3. Yin J.M., Bullard C.W., Hrnjak P.S. "R-744 gas cooler model development and validation", International Journal of Refrigeration 24 (2001), p.692-701

4. Калнинь И.М., Деревич И.В., Пустовалов С.Б. «Исследование газоохладителей тепловых насосов на R744. Холодильная техника и технология», №11, 2004, с.10-15.

5. Деревич И.В., Калнинь И.М., Смирнова Е.Г. «Экспериментальное и теоретическое исследование испарителя теплового насоса на диоксиде углерода». Холодильная техника и технология», №2, 2005, с.12-16.

6. Jensen J.B., Skogestad S. "Optimal operation of simple refrigeration cycles. Part I: Degrees of freedom and optimality of subcooling", Computers and Chemical Engineering v.31 (2007), Issues 5-6, p. 712-721.

7. Jensen J.B., Skogestad S. "Optimal operation of simple refrigeration cycles. Part II: Selection of controlled variables", Computers and Chemical Engineering 31 (2007) 1590-1601.

8. Komareji M., Stoustrup J., Rasmussen H., Bidstrup N., Svendsen P., Nielsen F. "Optimal Set-point Synthesis in HVAC Systems", Proceedings of the 2007 American Control Conference, New York City, USA, July 11-13, 2007, p.5076-5081.

9. Larsen S.L., Thubo C., Stoustrup J., Rasmussen H. Control Methods Utilizing Energy Optimizing Schemes in Refrigeration Systems. ECC2003, Cambridge, U.K.. September 2003.

10. Svensson M.S. "Model-Based control of Water-to-Water Heat Pump Unit", Modeling, Identification, and Control (MIC), Vol. 17, No. 4, October 1996, p.279-294.

11. Cheng T., He X.-D., Asada H.H. Nonlinear Observer Design for Two-Phase Flow Heat Exchangers of Air Conditioning Systems. Proceedings of the 2004 American Control Conference. Boston/ Massachusetts, June 30-July 2, 2004.

12. He X.-D., Asada H.H., d'Arbeloff A New Feedback Linearization Approach to Advanced Control of Multi-Unit HVAC Systems. Proceedings of the 2003 American Control Conference, Denver/ Colorado, June 4-6, 2003.

ВЕТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Бырладян А.С.

Аннотация. В статье рассматривается задача выбора ветродвигателя для ветроэлектрических установок. Путём сравнения показателей и характеристик ветродвигателей показано, что для существующих режимов и скоростей ветра на территории Республики Молдова необходимо использовать тихоходные (многолопастные) ветродвигатели крыльчатого класса.

Ключевые слова: ветродвигатель, ветроэлектрическая установка, энергия ветра, аэродинамическая характеристика, асинхронный генератор.

AEROMOTOARE PENTRU INSTALAȚII EOLIENE ELECTRICE Bârladean A.S.

Rezumat În articol se examinează problema alegerii aeromotorului pentru instalații electrice eoliene. Prin compararea indicilor și caracteristicilor aeromotoarelor se arată, că pentru regimurile și vitezele vîntului existente pe teritoriul Republicii Moldova este necesar de a utiliza aeromotoare lente multipale cu ax orizontal de rotație.

Cuvinte cheie: aeromotor, instalație electrică eoliană, energia vîntului, caracteristică aerodinamică, generator asincron.

WIND TURBINES FOR WIND POWER INSTALLATIONS

Barladean A.S.

Abstract. The problem of wind turbine choice for wind power installations is examined in this paper. It is shown by comparison of parameters and characteristics of wind turbines, that for existing modes and speeds of wind in territory of Republic of Moldova it is necessary to use multi-blade small speed rotation wind turbines of fan class. **Key words:** wind turbine, wind power station, wind power, aerodynamic characteristic, asynchronous generator.

Известно, что ветродвигатели преобразуют энергию ветра в механическую работу. По устройству и положению ветродвигателей (ВД) в потоке ветра, они разделяются на следующие классы: крыльчатые, карусельные, роторные и барабанные. Преимущества и недостатки различных классов ВД изложены в соответствующей литературе, например [1].

Наиболее совершенными ВД являются ветродвигатели крыльчатого класса [1]. Они изготавливаются двух типов: малолопастные с числом лопастей 2,3,4 и многолопастные с числом лопастей 6,9,12,18 и 24. По данным [2] коэффициент использования энергии ветра у ВД крыльчатого типа примерно в 2-3 раза выше чем у ВД карусельного, роторного и барабанного классов. В большинстве стран, около 95% всех ветроустановок производят и эксплуатируют крыльчатые ВД, так как они имеют несколько принципиальных преимуществ, а именно: малый удельный вес, полностью открыта ометаемая площадь (90-95%), высокий коэффициент использование энергии ветра (0.35-0.48). Кроме того плоскость их вращения перпендикулярна направлению ветра и, следовательно, кинетическая энергия ветра практически полностью воспринимается ВД.

В зависимости от числа лопастей, крыльчатые ВД разделяются на быстроходные и тихоходные. Их быстроходность определяется отношением окружной скорости конца лопасти ВД к скорости ветра

 $Z = \frac{\omega R}{V}$, где $\omega = \frac{\pi n}{30}$ - угловая скорость конца лопасти при числе оборотов "n" ВД,

об/мин; R – радиус ветродвигателя, м; V- скорость ветра, м/сек.

Характеристики и параметры ВД удобно сопоставлять при помощи аэродинамических характеристик (АДХ), которые показывают, как изменяются коэффициент использования энергии ветра и крутящий момент в зависимости от быстроходности [1]. АДХ строят в относительных величинах, поэтому они являются общими для ВД любых размеров, если у них соблюдено геометрическое подобие: число и профили лопастей, отношения всех линейных размеров лопасти к диаметру ВД и их углы заклинивая. АДХ трехлопастного и

многолопастных ВД представленные в работе [3] позволили определить их основные параметры, которые приведены в таблице 1.

Senobible napamerphi who osonaernbix berpodbin areaen							
Наименование показателя/число лопастей	3 лопасти	12 лопастей	18 лопастей				
Коэффициент использования энергии							
ветра	0.42	0.34	0.36				
Относительный момент трогания	0.03	0.28	0.48				
Нормальная быстроходность	4.0	2.5	1.5				
Синхронная быстроходность	8.0	6.0	2.6				
Скорость ветра начала вращения ВД, м/с	5.0-7.0	2.5-3.0	3.0-4.0				

Основные параметры многолопастных ветродвигателей

Сравнивая данные табл. 1, приходим к следующим выводам:

- многолопастной ВД отличается большим моментом трогания и малой быстроходностью;
- малолопастной малым моментом трогания и большой быстроходностью.

При этом, следует отметить, что их мощность практически не зависит от числа лопастей и будет одинаковой, если равны диаметры ВД и коэффициенты использования энергии ветра, который определяется как доля первоначальной энергии воздушного потока преобразованная ВД в механическую. Мощность ВД в зависимости от его диаметра, скорости ветра и коэффициента использования энергии ветра определяется выражением

$$P = \frac{D^2 V^3 \xi}{2080} [kW]$$

откуда следует, что мощность ВД изменяется пропорционально квадрату диаметра и кубу скорости ветра, где *ξ* – коэффициент использования энергии ветра.

Из приведенных данных табл.1 следует, что технические параметры рассматриваемых BД по некоторым показателям отличаются существенно. Следовательно, их эксплуатационные показатели будут весьма различными в процессе их работы при одних и тех же ветровых режимах. Поэтому, для правильной и эффективной их эксплуатации важно знать, не только конструктивные параметры ВД, но и сколько часов в год может работать ветроэлектрическая установка (ВЭУ) с данным ВД, а также среднегодовую полезную мощность, ветроэнергетические параметры и коэффициент использования установленной мощности ВЭУ [2,4]. Отметим что коэффициент использования установленной мощности определяется отношением фактической выработки ВЭУ за определённый период времени, к выработке за тот же период времени работы ВЭУ с установленной мощностью. Изменение данного коэффициента в зависимости от минимальной рабочей скорости ветра и среднегодовой представлено в таблице 2.

Таблица 2

Таблица 1

Коэффициент использования установленной мощности при разных скоростях ветра

V _{мин, м/сек}	V _{ср. год, м/сек}							
	3	4	5	6	7	8		
3	0.118	0.23	0.35	0.46	0.56	0.61		
4	0.108	0.22	0.34	0.45	0.55	0.63		
5	0.090	0.20	0.32	0.44	0.54	0.62		

Проведённый анализ данных таблицы 2 показывают, что при $V_{cp. rod,} = 3.9-4.2$ м/сек и при различных рабочих скоростях ветра (3,4,5 м/сек) ВД будет работать с коэффициентом использования ВЭУ порядка 0.22. Кроме того, следует иметь в виду, что и коэффициент заполнения графика нагрузки меняется в зависимости от времени года: весна - 0.73, лето – 0.75, осень – 0.70 и зима 0.57. Все вышеуказанные показатели и условия оказывают существенное влияние на эксплуатационную эффективность работы ВЭУ. Безусловно, что эффективность работы установки зависит и от конструкции ВД, его технического состояния, среднегодовой скорости ветра в данной местности и выбранной структуры кинематической схемы привода электрогенератора.

Следовательно, основным затруднением непрерывного получения электрической энергии от ВЭУ, прежде всего, является неравномерность скорость ветра, которая приводит к значительным колебаниям мощности, напряжения и частоты переменного тока. Однако в настоящее время на ВЭУ устанавливается автоматическая система стабилизации выходного напряжения и частоты переменного тока электрогенератора, что позволяет отдавать потребителю качественную электрическую энергию [5]. Такая система была создана в Институте энергетики АНМ при разработке тихоходной ВЭУ с самовозбуждающимся асинхронным генератором. Новизна такой электрической системы защищена авторским свидетельством [6] и внедрена в опытный образец ВЭУ с 12-тью лопастным ВД и установленной мощностью асинхронного генератора мощностью 3,0 kW, который разработан Институтом энергетики и изготовлен на Опытном заводе "ASELTEH" АНМ. Опытный образец ВЭУ с новой электрической системой испытан в естественных условиях на территории Опытного завода "ASELTEH", техническая характеристика которой представлена ниже:

-	нормальная быстроходность	1.2-1.8
-	синхронная быстроходность	2.5-2.7
-	относительный начальный момент трогания	0.28-0.32
-	коэффициент использования энергии ветра	0.3-0.32
-	скорость ветра начало вращения ВД	2.5-3.0 м/с
-	диаметр ВД	5.0 м
-	число лопастей ВД	12
-	мощность генератора	3.0кВт
-	выходное напряжение	220 B
-	частота переменного тока	50 Гц

Отличительной особенностью разработанной электрической системы ВЭУ является наличие принципиально нового асинхронного генератора и более совершенная система стабилизации напряжения. Кроме того, в предлагаемом решении реализуется электромеханическая система выработки электроэнергии без преобразователей напряжения, тока или частоты, что повышает надёжность электрической системы и снижает ее стоимость.

Важно отметить и то, что эффективность эксплуатации разработанной ВЭУ в значительной мере зависит от выбранной конструкции тихоходного ВД, которая соответствует ветровым условиям нашей Республики [7] и ВЭУ может обеспечить потребителя электроэнергией в течение 70% годового времени.

В заключение следует отметить, что быстроходные (малолопастные) ВД обладают малым пусковым моментом и большей стартовой скоростью ветра 5-7 м/с, следовательно, эксплуатация ВЭУ с быстроходными ВД при действующих скоростях ветра на территории Молдовы практически неприемлема для надёжного и эффективного использования энергетических ресурсов ветра. С другой стороны, применение быстроходного ВД в районах с низкими среднегодовыми скоростями ветра приводит к снижению коэффициента

3

использования расчётной мощности ВД, длительным простоям и меньшей эффективности работы ВЭУ и генерируют низкочастотные составляющие шума и вибраций, отрицательно влияющие на окружающую живую популяцию..

Таким образом, как показали результаты исследований, правильный выбор конструктивного исполнения ВД для ВЭУ, во многом определяется полнотой учёта ветровых режимов и хозяйственных условий эксплуатации на территории, мощности и режимов работы токоприёмников, а также требований предъявляемых к энергоснабжению потребителя. Несомненно, что оптимальная конструкция многолопастного ВД, кинематической передачи и электрической системы установки обеспечат более эффективную работу ВЭУ и позволит успешно решать вопросы использования энергии ветра.

Выводы

В результате анализа аэродинамических характеристик и технических показателей ВД различного конструктивного исполнения показано, что для существующих скоростей и режимах ветров на территории Республики Молдова выбор типа ВД для ВЭУ определяется его пригодностью для практического и эффективного использования энергетических ресурсов ветра. С этой точки зрения эксплуатация ВЭУ наиболее выгодна при ВД крыльчатого класса многолопастного исполнения. Применение тихоходных ВД обосновывается и тем, что многие ветровые зоны в нашей республике имеют низкие среднегодовые скорости ветра (3.9-4.5 м/с) что обуславливает экономичность их эксплуатации. Считается также что ВЭУ с тихоходным ВД проще по конструкции и в изготовлении, дешевле и надёжнее в эксплуатации.

Литература

- 1. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветроустановки. Москва, 1957, 533 с.
- 2. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. Москва, 1983, 201 с.
- 3. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и их применение в сельском хозяйстве. 1962,246с.
- 4. Энергетическое строительство 1991, № 3, С. 50-53
- 5. Surse regenerabile de energie . "TEHNICA INFO", Chişinău, 1999,434p.
- 6. Brevet de invenție "Generator asincron cu excitație capacitivă", MD 2089 C2
- Романенко Н.Н. Ветроэнергетические ресурсы и их использование. Кишинэу, 1964, 136 с.

Сведения об авторе

Бырладян А.С. Научный сотрудник Института энергетики Академии Наук Молдовы. Сфера научных интересов: электрические машины, асинхронные генераторы, автоматизированный электропривод, диагностика энергооборудования и электрические системы ветроустановок. Тел. (+37322) 73-53-84.

DUAL THREE-PHASE ADJUSTABLE SPEED DRIVE WITH SYNCHRONIZED SPACE-VECTOR MODULATION

V. Oleschuk, R. Prudeak, A. Sizov, E. Yaroshenko

Resume. Split-phase symmetrical motor drive on the base of two voltage source inverters, controlled by algorithms of synchronized pulse width modulation (PWM), has been investigated. Simulation results are presented for dual three-phase power conversion systems with continuous, discontinuous and combined versions of synchronized PWM.

Keywords: split-phase induction motor drive, dual voltage source inverters, pulse width modulation, phase voltage synchronization.

ACȚIONĂRI ELECTRICE DUBLU TRIFAZATE REGLABILE CU MODULAȚIE SINCRONĂ SPAȚIAL –VECTORIALĂ A IMPULSURILOR

V. Olesciuk, R. Prudeac, A. Sizov, E. Iaroşenko

Resumat. A fost investigat sistemul de acționare electrică pe baza a două invertoare de tensiune și motorul electric asincron cu înfășurări disjuncționate tip simetric, reglate în corespundere cu algoritmii modulării sincrone a impulsurilor după durată. Sunt prezentate rezultatele modelării sistemelor de conversie trifazate duble cu diferite tipuri de modulație: continuu, discontinuu și combinată.

Cuvinte cheie: acționare electrică, înfășurăre disjuncționată; sistem de invertoare dublu; modulație sincronă a impulsului; sincronizarea tensiunilor de fază.

СДВОЕННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С СИНХРОННОЙ ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В.Олещук, Р. Прудяк, А. Сизов, Е.Ярошенко

Аннотация. Исследована система электропривода с двумя инверторами напряжения и асинхронным электродвигателем с расщепленными обмотками симметричного типа, регулируемая на базе алгоритмов синхронной широтно-импульсной модуляции. Приведены результаты моделирования сдвоенных трехфазных преобразовательных систем с непрерывной, прерывистой и комбинированной разновидностями синхронной векторной модуляции.

Ключевые слова: электропривод с расщепленными фазами, сдвоенная инверторная система, широтноимпульсная модуляция, синхронизация фазного напряжения.

1. INTRODUCTION

Multiphase, and, in particular, dual three-phase (six-phase) induction motor drives are a subject of increasing interest in the last years due to some advantages compared with conventional three-phase adjustable speed drives [1]-[5]. Ones of the perspective applications of the six-phase (split-phase) drives are now traction drive systems, in particular, hybrid electric vehicle drives, powered from fuel cell and battery [5].

Fig. 1 presents topology of the electrical vehicle system on the base of the split-phase (six-phase) induction motor supplied by two inverters with two different DC links: 1) Battery DC link with the V_{dc1} voltage, and 2) Fuel Cell DC link with the V_{dc2} voltage [5]. There are symmetrical and asymmetrical topologies of split-phase (dual three-phase) converters and drives. In particular, in the case of symmetrical dual three-phase systems the induction

machine has two sets of winding spatially shifted by 60 electrical degrees with isolated neutral points [6]-[8].



Fig.1. The topology of the electrical vehicle system

To provide increased efficiency of symmetrical six-phase drives, novel space-vectorbased control and modulation strategies have been proposed and developed for these systems with the single DC-link [6]-[8]. It is known, that for drives with increased power rating it is necessary to synchronize voltage waveforms of power converters for elimination of undesirable sub-harmonics of voltage and current [9],[10]. So, this paper presents results of dissemination of novel method of synchronized PWM to symmetrical traction system with two DC voltage sources with different voltages.

2. BASIC PROPERTIES OF SYNCHRONIZED SCHEMES OF SPACE-VECTOR MODULATION

In order to avoid asynchronism of conventional versions of voltage space-vector modulation, novel methods of synchronized PWM can be used for control of each inverter in symmetrical six-phase systems [11].

Figs. 2 - 3 present switching state sequences of standard three-phase voltage source inverter inside the interval 0^{0} -90⁰. It illustrates schematically basic continuous (CPWM, Fig. 2) and discontinuous (DPWM, Fig. 3) versions of space-vector pulsewidth modulation, which are used typically in adjustable speed drive systems.

The upper traces in Figs. 2 - 3 are switching state sequences (in accordance with conventional designation [11]), then - control signals for the cathode switches of the phases *a*, *b*, *c* (*x*, *y*, *z*) of each inverter. The lower traces in Figs. 2 - 3 show the corresponding quarter-

wave of the line output voltage of inverters. Signals βj represent total switch-on durations during switching sub-interval τ , signals γ_k are generated on the borders (Fig. 2) or in the centres (Fig. 3) of the corresponding β . Widths of notches λ_k represent duration of zero sequences.

Special signals λ' (λ_5 in Fig. 2, λ_4 in Fig. 3) with the neighbouring β'' (β_5 in Fig. 2, β_4 in Fig. 3) are formed in the clock-points (0^0 , 60^0 , 120^0 ..) of the output curve of inverters with synchronous PWM. They are reduced simultaneously till close to zero value at the boundary frequencies F_i between control sub-zones. This control principle provides continuous adjustment of the voltage waveforms of inverters, with smooth pulses-ratio changing.



Fig.2. Switching state sequences of standard three-phase voltage source inverter inside the interval 0^{0} -90⁰



Fig.3. Switching state sequences of standard three-phase voltage source inverter inside the interval 0^{0} -90⁰

Equations (1)-(8) present a set of control functions for determination of parameters of signals of inverters with synchronized PWM in absolute values (seconds) for scalar V/F

control mode of the system during the whole control range including the zone of overmodulation [11]:

For *j*=2,...*i*-1:

$$\beta_{j} = \beta_{1} \cos[(j-1-K_{3})\tau K_{ov1}]$$
⁽¹⁾

$$\gamma_{j} = \beta_{i-j+1} \{ 0.5 - 0.87 \tan[(i - j - K_{3})\tau] \} K_{ov2}$$
⁽²⁾

$$\beta_{i} = \beta^{"} = \beta_{1} \cos[(i - K_{3} - 1)\tau K_{ov1}]K_{s}$$
(3)

$$\gamma_{1} = \beta^{"} \{0.5 - 0.87 \tan[(i - K_{3} - 2)\tau + (\beta_{i-1} + \beta_{i} + \lambda_{i-1})/2]\} K_{s} K_{ov2}$$
(4)

$$\lambda_j = \tau - (\beta_j + \beta_{j+1})/2 \tag{5}$$

$$\lambda_i = \lambda' = \left(\tau - \beta''\right) K_{ov1} K_s \tag{6}$$

$$F_i = \frac{1}{6(2i-1)\tau} \tag{7}$$

$$F_{i-1} = \frac{1}{6(2i-3)\tau},$$
(8)

where: β - total switch-on duration inside switching interval; γ - minor parts of the total switch-on durations; λ - duration of notches; τ -switching interval (sub-cycle); $m = F/F_m$ – modulation index; F_i and F_{i-1} – boundary frequencies between control sub-zones (index *i* is equal to the number of notches inside a half of the 60⁰-clock-intervals, including the notch on the border of the clock-intervals); $\beta_1 = 1.1 \pi m$ until $F_{ov1} = 0.907F_m$, and $\beta_1 = \tau$ after F_{ov1} ; $K_s = [1 - (F - F_i)/(F_{i-1} - F_i)]$ - coefficient of synchronization; the first coefficient of overmodulation $K_{ov1} = 1$ until F_{ov1} , and $K_{ov1} = [1 - (F - F_{ov1})/(F_{ov2} - F_{ov1})]$ between F_{ov1} and $F_{ov2} = 0.952F_m$; the second coefficient of overmodulation $K_{ov2} = 1$ until F_{ov2} , and $K_{ov2} = [1 - (F - F_{ov2})/(F_m - F_{ov2})]$ in the zone between F_{ov2} and F_m ; $K_3=0$ for CPWM, and $K_3=0.25$ for DPWM.

III. SYNCHRONIZED PWM IN SYMMETRICAL SIX-PHASE TRACTION SYSTEM WITH TWO DC VOLTAGE SOURCES

Control of symmetrical six-phase induction machine drives is based on the 60° -phase-shift of control and output signals of two inverters [6]-[8]. In accordance with the theory of

vector space decomposition, the basic six-dimensional space (*as, bs, cs, xs, ys, zs*) of a dualthree phase induction machine with isolated neutral points can be transformed into two orthogonal two-dimensional subspaces (*sa, sb*) and (*m1, m2*) [1]. Voltage components V_{sa} and V_{m1} in these subspaces, and also the phase voltage $V_{as} = V_{sa} + V_{m1}$, are calculated for symmetrical six-phase system with two isolated neutrals as [7]:

$$V_{sa} = 0.333(V_a - 0.5V_b - 0.5V_c + 0.5V_x - V_y + 0.5V_z)$$
(9)

$$V_{m1} = 0.333(V_a - 0.5V_b - 0.5V_c - 0.5V_x + V_y - 0.5V_z)$$
(10)

$$V_{as} = V_{sa} + V_{ml} = V_a - 0.333(V_a + V_b + V_c)$$
(11)

where V_a , V_b , V_c , V_x , V_y , V_z are the corresponding pole voltages of each three-phase inverter.

In this case, the V_{sa} component, which produces useful rotating MMF *k*-th order voltage harmonics ($k = 12m \pm 1$, m = 1, 2, 3, .), is the useful component. But the V_{m1} component, which generates loss-producing harmonics ($k = 6m \pm 1$, m = 1, 3, 5, ...), is the undesirable voltage component.

In order to provide equivalence of the output fundamental voltages of two inverters (with the same fundamental frequency) during scalar V/F control of the system, it is necessary to provide linear correlations between its modulation indices and magnitudes of the DC voltages:

$$m_1 V_{dc1} = m_2 V_{dc2} \tag{12}$$

Figs. 4 - 6 present the pole (V_a and V_x), and phase V_{as} and V_{xs} voltages, and also the useful V_{sa} component of the phase voltage, of two inverters (with spectral characteristic of the V_{sa} voltage) of the six-phase system (Fig. 1) with two DC sources, where $V_{dc1} = 0.75V_{dc2}$. Fig. 4 shows basic signals of the drive system with continuous synchronized PWM (CPWM). Fig. 5 presents the corresponding signals for the six-phase drive with discontinuous PWM with the 30^{0} -non-switching intervals (DPWM). Fig. 6 shows basic voltage waveforms for the system with combined CPWM+DPWM control. The switching and fundamental frequencies of each inverter are, respectively, equal to 900 Hz and 35 Hz (modulation indices of two inverters in accordance with (12) are equal correspondingly to $m_1 = 0.75$ and $m_2 = 0.56$).



Fig.4. Basic signals of the drive system with continuous synchronized PWM (CPWM)



Fig.5. Signals for the six-phase drive with discontinuous PWM with the 30⁰-non-switching intervals (DPWM)



Fig.6. Basic voltage waveforms for the system with combined CPWM+DPWM control

The motor phase voltages V_{as} and V_{xs} of the six-phase vehicle drives with both continuous and discontinuous synchronized PWM have symmetry during the whole control range (see Figs. 4 - 6), and its spectra do not include even harmonics and sub-harmonics, which is especially important for high power/high current systems.

Fig. 7 presents calculation results of Weighted Total Harmonic Distortion factor (*WTHD*) for the useful component V_{sa} of the phase voltage (averaged values of $WTHD = (1/V_{sa1}) \sqrt{\sum_{k=2}^{1000} (V_{sak}/k)^2}$) of symmetrical dual three-phase traction system with continuous (CPWM), discontinuous (DPWM), and combined (CPWM+DPWM) schemes of synchronized modulation. DC-link voltages are $V_{dc1} = 0.75V_{dc2}$ in this case. In accordance with (12), modulation indices for the first and the second inverters have to be in linear dependence $m_2=0.75m_1$. The average switching frequency of each three-phase inverter is 900 H_Z , control mode corresponds here to standard V/F control during the whole undermodulation zone.



Fig.7. Calculation results of Weighted Total Harmonic Distortion factor

The spectral characteristics, presented in Fig. 7, show, that algorithms of combined CPWM+DPWM synchronized PWM provide better spectral composition of the useful component of the phase voltage of symmetrical dual three-phase systems (in comparison with two identical (CPWM or DPWM) schemes of modulation for control of two inverters) during the whole linear control range.

IV. CONCLUSIONS

Novel method of synchronized PWM has been disseminated for control of symmetrical split-phase (dual three-phase) traction system, powered from fuel cell and buttery. Control algorithms of synchronized PWM, based on space-vector approach for determination of the pulse patterns, allow minimum number of switchings in the system and minimal switching losses. The phase voltages of traction drive with synchronized PWM have quarter-wave symmetry during the whole control range, and its spectra do not contain even harmonics and sub-harmonics, which is especially important for the systems with increased power/current ratings. Combined scheme of synchronized PWM provide better spectral composition of the useful component of the phase voltage of symmetrical split-phase systems (in comparison with two identical PWM schemes for control of two inverters) during the whole linear control range.

REFERENCES

- [1] Y. Zhao and T.A. Lipo, "Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector decomposition", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol.31, no.5, 1995, pp. 1100-1109.
- [2] R. Bojoi, A. Tenconi, F. Profumo, G. Griva and D. Martinello, "Complete analysis and comparative study of digital modulation techniques for dual three-phase AC motor

drives", Proc. of the 2002 IEEE Power Electr. Spec. Conf. (PESC'02), pp. 851-857.

- [3] D. Hadiouche, L. Baghli and A. Rezzoug, "Space vector PWM techniques for dual threephase AC machine: analysis, performance evaluation and DSP implementation", *Proc. of the 2003 IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. (IAS'2003)*, pp. 648-655.
- [4] R. Bojoi, F. Farina, F. Profumo and A. Tenconi, "Dual-three phase induction machine drives control – a survey", CD-ROM Proc. of the 2005 IEEE Int'l Power Electr. Conf. (IPEC'2005), 10 p.
- [5] R. Bojoi, A. Tenconi, F. Farina and F. Profumo, "Dual-source fed multiphase induction motor drive for fuel cell vehicles: topology and control", *Proc. of the 2005 IEEE Power Electr. Spec. Conf. (PESC'2005)*, pp.2676-2683.
- [6] M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, C.R. da Silva, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, "Sixphase AC drive system with reduced common-mode voltage," *Proc. of the 2003 IEEE Int'l Conf. on Electr. Machines and Drives (ICEMD'2003)*, pp. 1852-1858.
- [7] M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, C.R. da Silva, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, "Vector modulation for six-phase voltage source inverters," *CD-ROM Proc. of the 2003 European Power Electr. Conf. (EPE'2003)*, 10 p.
- [8] V. Oleschuk, R. Bojoi, G. Griva and F. Profumo, "Symmetrical six-phase drives with common-mode voltage elimination based on synchronized PWM", *Proc. of the 2007 IEEE Aegean Conf. on Electr. Machines and Power Electr. (ACEMP'2007)*, pp. 800-805.
- [9] J. Holtz, "Pulsewidth modulation a survey", *IEEE Tans. on Ind. Electr.*, vol.39, no.5, 1992, pp.410-420.
- [10] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, *Power Electronics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [11] V. Oleschuk and F. Blaabjerg, "Direct synchronized PWM techniques with linear control functions for adjustable speed drives", *Proc. of the 2002 IEEE Appl. Power Electr. Conf. (APEC'2002)*, pp.76-82.

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 190 publications in the area of Power Electronics and Electric Drives, including more than 50 publications in the IEEE transactions and proceedings. He holds also 89 patents and authors certificates in this field. His research interests include control and modulation strategies for perspective topologies of power converters and drives.

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.

Evgenii Yaroshenko is Scientific Collaborator of the Laboratory of the Automated Electric Drives of the Power Engineering Institute of the Academy of Sciences of Moldova. He is author and co-author of about 60 publications and 9 patents and authors certificates. His research interests are connected with elaboration, modelling, simulation and implementation of modern topologies of adjustable speed drive systems

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СУШКЕ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ О.Г. Бурдо, Ю.А. Казмирук

Одесская Национальная Академия Пищевых технологий

terma@osaft.odessa.ua

Аннотация. В статье обсуждаются вопросы энергетики, продолжительности процесса и качества продукции при сушке. Обоснован новый подход к моделированию сушки и сушильной техники. Анализируются пути совершенствования энерготехнологий сушки. Представляются механизм и математическая модель процесса сушки дисперсных продуктов комбинированным способом.

Ключевые слова: моделирование сушки, совершенствования энерготехнологий сушки.

POSIBILITĂȚI DE SPORIRE A EFICIENȚEI ENERGETICE A PROCESULUI DE USCARE A PRODUSELOR DISPERSATE

Burdo O., Kazmiruk I.

Academia Națională a Tehnologiilor de Alimentare din Odessa

Rezumat. In acest articol se discută probleme ale energeticii, problemele duratei procesului și calității producției în procesul de uscare a produselor dispersate. S-a argumentat un nou mod de abordare a modelării procesului de uscare și echipamentului de uscare. Sunt analizate căile de perfecționare ale tehnologiei de uscare. Sunt prezentate mechanismul și modelul matematic al procesului de uscare a produselor dispersate prin metoda combinată.

Cuvinte cheie: modelarea uscării, modelul matematic, proces de uscare.

WAYS OF POWER EFFICIENCY INCREASE AT DRYING DISPERSABLE PRODUCTS

Odessa National Academy of Food Technologies Burdo O.G., Kazmiruk Iu.A.

Abstract. In the article questions of power, duration of process and quality production's quality during drying are discussed. The new approach to modeling of drying and drying equipment is proved. Ways of perfection technologies of drying are analyzed. The mechanism and mathematical model of drying's process of dispersive staffs by the combined way are presented.

Key words: modeling of drying, mathematical model, process of drying.

Введение. Традиционная конвективная сушка связана с необходимостью перемещения больших объемов сушильного агента. В результате – значительные потери энергии с отработанным сушильным агентом. Их доля составляет 70 % от общих потерь энергии при сушке. Проблемы с равномерным распределением потоков сушильного агента не исключают локальный перегрев объектов сушки и его недогрев. Все это определяет проблемы сушильных технологий в пищевой и перерабатывающей промышленности [1, 2, 3, 4]:

- высокая энергоемкость;
- значительная продолжительность;
- экологическая опасность загрязнения окружающей среды и продукции.

Анализ характера развития сушильной техники и литературных источников показывает, что энергетическому анализу сушильной техники уделяется мало внимания [5, 6].

Цель и научно-техническая идея работы. Сушка – это комплекс тепловых и массообменных процессов, который логично требует комплексного подхода к его изучению и решению сопутствующих ему проблем. Исходя из этого, целью работы является – изучение комбинированного воздействия различных факторов на процесс сушки.

Представляется, что сушилки нового поколения должны основываться на следующих концептуальных положениях. Во-первых, нужно снять с воздуха роль теплоносителя и оставить для него только функцию диффузионной среды, что существенно улучшит энергетические характеристики. Во-вторых, следует формировать как отдельные задачи транспортировку влаги из середины продукта к его поверхности и отвод влаги в поток воздуха. В-третьих, ставить задачу частичного обезвоживания продуктов без осуществления фазового перехода влаги в пар.

Основой научного обоснования поставленных задач является анализ отдельных процессов и прогнозирование возможностей при их комбинировании. Ставится задача поиска комбинированных процессов воздействия на продукты, что даст возможность максимально использовать достоинства и возможности разных принципов энергетического, механического и диффузионного воздействия, приводящих к общему повышению эффективности использования энергии и повышению качества продукции.

Энергетические проблемы решаются путем использования эффективных теплоподводов, тепловых насосов и средств объемного безградиентного нагрева, что обеспечивает реализацию первой задачи. Именно такие системы энергетического воздействия позволяют к транспортировке влаги по капиллярам к поверхности подключить мощный механизм бародиффузии, который на порядки превышает кинетические коэффициенты массопереноса по сравнению с традиционным процессом конвективной диффузии в стесненных условиях. Переход к макрокинетическим процессам диффузии влаги открывает новые перспективы, как для энергосбережения, так и для повышения качества продукции в связи с мягкостью режимов сушки. По сути, энерговоздействие осуществляется на наномасштабном уровне, а это будущее направление технологий вообще.

Математическое и экспериментальное моделирование процессов обезвоживания. Математическая модель процессов базируется на совместном рассмотрении уравнений Фика и гидравлики капиллярной системы продуктов. Сушка рассматривается как суперпозиция трех процессов: конвективной диффузии, диффузии в стесненных условиях капилляров и десорбции влаги [7]. Каждый процесс представляется уравнением в обобщенных переменных в виде зависимости числа Шервуда от числа Пекле и специального числа, учитывающего эффект действия электромагнитного поля.

Современные представления механизмов обезвоживания при сушке базируются на основах тепломассопереноса при фазовых превращениях и на теории П.А. Ребиндера о формах связи влаги с материалом. Внешние воздействия различного происхождения (тепловое, инерционное, диффузионное, электромагнитное и т.д.) формируют в продукте поля температур, давления, влагосодержания. Совмещенное влияние соответствующих движущих сил определяет развитие гидродинамических, тепловых и массообменных процессов. Теория сушки, основы которой заложено А.В. Лыковым [8], определяет зависимость потока влаги в объеме капиллярно-пористого тела в форме:

$$j = -\left(D\rho_{\tilde{n}}\nabla U + D\delta\rho_{\tilde{n}}\nabla t + K_{\delta}\nabla P\right),\tag{1}$$

где *VU*, *Vt*, *VP* – градиенты влагосодержания, температуры и давления соответственно; *δ* – относительный коэффициент термодиффузии (кг/кг·К); *K*_p – коэффициент фильтрационного (молярного) переноса (кг/м·с·Па).

Зависимость (1) показывает, что общий поток влаги из частички определяется тремя взаимозависимыми действующими силами *VU*, *Vt*, *VP*. Результатом процесса будет нестационарное поле концентраций влаги в частичке:

$$\frac{dC}{d\tau} = -div(\vec{j} + C\vec{w}) + I_{\hat{a}}.$$
(2)

Левая часть уравнения (2) характеризует локальное изменение концентрации влаги, которая переносится. Правая часть определяет диффузионный перенос (*div* j),

конвективный перенос (divCw) и бародиффузионный поток влаги $I_{\rm B}$. Именно сумма дивергенций от потоков конвективного и диффузионного определяет нестационарное поле концентраций влаги в частичке в традиционных конвективных режимах сушки.

Такая специфика многих пищевых продуктов как термолабильность регламентирует температурные нагрузки на них. Поэтому использовать для организации транспортировки влаги в них термодиффузионный поток нельзя. Таким образом, градиент ∇t практически не влияет на поток влаги в капиллярах, что дает право упростить задачу и пренебречь этой составляющей.

Поставим задачу инициировать бародиффузию в капилляре для транспортировки влаги на поверхность. Рассмотрим капиллярный канал материала. Сведем задачу к одномерной и запишем дифференциальное уравнение массопереноса по оси *x*:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial C}{\partial x} w_x.$$
(3)

Распределение концентраций (*C*) зависит от суммарного воздействия микрокинетики (первая составляющая) и макрокинетики (вторая составляющая). Рассмотрим задачу диффузии в капилляре в процессе сушки. Движение влаги в капилляре к поверхности тела определяется градиентом концентраций по оси *x* и значением коэффициента диффузии (*D*). С ростом температуры процесса повышается значение коэффициента диффузии, однако, стесненность в условиях капилляра не дает существенно интенсифицировать процесс переноса. Более того, уровень температуры является противоречивым фактором, так как требования к качеству пищевых продуктов определяют задачу ее снижения. Таким образом, согласно соотношению (3) есть только одна возможность интенсификации перемещения влаги в капилляре – за счет скорости w_x . Эффективным механизмом организации такого движения может стать бародиффузия.

В такой постановке задачу сведено к двум. Первая – сугубо гидравлическая, связанная с оценкой гидравлического сопротивления капилляра. Вторая задача – термодинамическая, по решению вопроса определения энергии, которая нужна для преодоления этого сопротивления. Гидравлическое сопротивление такого канала (ΔP) определяется скоростью потока жидкости (w), ее плотностью (ρ), суммой местных сопротивлений (ζ), силами поверхностного натяжения (σ):

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2} \left[\frac{\lambda l}{d} + \sum \xi \right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d}.$$
 (4)

Обобщение экспериментальных данных целесообразно проводить как зависимость массообменных чисел Стантона и Пекле:

$$St_{\rm m} \equiv \frac{\beta}{w} = APe_{\rm m}^{\rm k}\varepsilon.$$
⁽⁵⁾

Проведенный выше анализ схемы массопереноса показывает, что значение β определяется инерцией потока (массоперенос в условиях свободного движения отсутствует), геометрические параметры аппарата не могут непосредственно влиять на интенсивность массоотдачи. В этих условиях скорость потока может быть принята в качестве значения коэффициента массоотдачи и служит для него масштабом отнесения.

Для расчета процессов сушки продуктов выбор формы модернизированного числа Пекле, определяющего размера и характерной скорости можно провести по рекомендациям в табл. 1.

Таблица 1

		ие тети модертнопровити	loi o mesia menai
Гидродинамическая ситуация	Гидродинамическая Определяющий ситуация размер		Число Рем
Движение воздуха над слоем	<i>l</i> – длина (ширина) слоя	 <i>w</i> – относится к полному сечению аппарата 	$Pe_{i} = \frac{wl}{D}$
Неподвижный слой	<i>d</i> _ч – диаметр частички	$w = V/(\varepsilon F)$ ε – пористость	$Pe_{i} = \frac{wd_{\div}}{D}$
Плотный подвижный слой	<i>d</i> _т − диаметр трубы	<i>w</i> _c – скорость слоя	$Pe_{i} = \frac{w d}{D}$
Кипящий слой	<i>d</i> _ч – диаметр частички	w = V/F V – расход F – сечение	$Pe_{i} = \frac{wd_{+}}{D}$

Схемы расчета модернизированного числа Пекле

Сведения табл. 1 охватывают большинство задач первого периода сушки. Получение констант уравнения (5) для внутренних задач требует обобщения известных массивов экспериментальных данных с учетом структурных характеристик объекта сушки.

Предлагаемый подход позволит рассчитывать кинетику сушки при известных режимных параметрах и структурных характеристиках продукта, обосновать и оптимизировать процессы сушки при комбинированном воздействии на такие материалы.

Таким образом, решение упомянутых проблем сушильных технологий и поставленных задач требует использования энергии только на нагрев продукта и поддержку процесса бародиффузии влаги из него и незначительного количества энергии на выведение влаги за пределы сушильной камеры, а также использования мягких режимов технологической обработки объектов сушки.

Вариантом реализации комплексного подхода к сушке дисперсных продуктов комбинированное воздействие физических факторов, может бать которое обеспечивается электромагнитным полем (ЭМП) и режимом псевдоожижения слоя путем продувания его воздухом из окружающей среды. Такой подход характеризуется системой показателей, которые позволяют уменьшить энергетические затраты, длительность технологической обработки улучшить сократить продуктов, экологическую ситуацию окружающей среды и качество продукции благодаря использованию эффективных экологически безопасных систем энергетического воздействия. Экспериментальные данные по сушке нута предлагаемым способом подтвердили положительный эффект. Зерна нута сушили от 20 до 12 % влажности при различных режимах псевдоожижения и параметрах подвода электромагнитного поля. Псевдоожижение осуществлялось воздухом температуры окружающей срелы. Температура продукта поддерживалась на уровне 60 °С. Выбор данной температуры объясняется тем, что она является верхней границей стойкости биологически активных веществ (БАВ) и биологических мембран, и тем, что при ней уже достаточно интенсивно происходит процесс обезвоживания.

Разработана экспериментальная установка для исследования комбинированной сушки дисперсных пищевых продуктов (рис. 1), которая включает: сушильную камеру

с электромагнитным генератором 1, рабочую ячейку 2 с продуктом 3, измерительный прибор 4, пьезометр (вакуумметр) 5, коллектор 6, вентилятор 7, амперметр 8, трансформатор 9 и вольтметр 10.



Рис. 1 – Схема установки для исследования комбинированной сушки дисперсных пищевых продуктов

Опыты показали преимущества разработанного способа сушки по сравнению с наиболее распространенным конвективным способом в скорости процесса и энергетике. Эти параметры процесса напрямую зависят от режима псевдоожижения (скорости, расхода, цикличности подачи и температуры воздуха) и от режима подачи микроволнового поля (подводимой мощности, удельной мощности, цикличности подачи). Различные сочетания режимных параметров комбинированного воздействия могут на порядок изменять как скорость сушки, так и удельные энергетические затраты.

Исследования проводились по следующей методике. До начала опыта измеряли влагосодержание нута методом высушивания до постоянной массы, температура нута и рассчитывалась воздуха. масса нута И рабочей ячейки; нагрузка на газораспределительную решетку. Далее устанавливали необходимую удельную мощность ЭМП СВЧ, настраивали необходимый режим псевдоожижения. В течение опыта измеряли температуру и массу нута (G, кг), статическое давление в коллекторе $(H_{n\delta}^{\hat{e}}, \Pi a.)$, которое на расстоянии (1,5 – 2) d_{κ} от входа численно равно динамическому. Скорость воздуха в рабочей ячейке с нутом рассчитывалась по эмпирической формуле:

$$v = 1,29\sqrt{H_{\tilde{n}\tilde{o}}^{\delta,y.}}, \text{ M/c},$$
(6)

где $H_{\tilde{n}\tilde{o}}^{\delta,\tilde{y}} = \varepsilon H_{\tilde{n}\tilde{o}}^{\hat{\varepsilon}} \left(\frac{d_{\hat{\varepsilon}}}{d_{\delta,\tilde{y}}} \right)^4$ - статическое давление в рабочей ячейке, мм, где ε -

пористость слоя продукта; d_{κ} – внутренний диаметр коллектора, мм; $d_{\text{р.я.}}$ – внутренний диаметр рабочей ячейки, мм.

Текущая влажность продукта (ω) вычислялась по формуле:

$$\omega_{n} = 100 - \frac{G_{n-1}}{G_{n}} (100 - \omega_{n-1}), \%.$$
(7)

Режимы комбинированной сушки нута представлены в табл. 2. Результаты опытов отображены на рис. 2, 3. Таблица 2

Режимы комбинированной сушки н						
	Режимы сушки					
Параметры режимов	1 (базовый)	2	3	4		
Нагрузка на газораспределительную решетку Ω , кг/м ²	69	69	69	69		
Скорость воздуха в рабочей ячейке v, м/с	0,71	0,71	0,71	0,71		
Удельная мощность ЭМП р _п , кВт/кг исп. влаги	13,575	9,125	10,700	13,350		
Цикличность подачи ЭМП Ц _п , с/с	0/0	21/9	24/6	27/3		
Цикличность подачи воздуха Цк, с/с	0/0	9/21	6/24	3/27		



Рис. 2 – Комплексное влияние цикличности подачи (удельной мощности) ЭМП и воздуха на кинетику комбинированной сушки нута



Рис. 3 – Комплексное влияние цикличности подачи (удельной мощности) ЭМП и воздуха на удельные энергетические затраты при разных режимах комбинированной сушки нута

 $\gamma = \frac{q}{q_{aac}} \cdot 100$, % — коэффициент удельных энергетических затрат (отношение

энергоемкости рассматриваемого комбинированного метода сушки к энергоемкости базового комбинированного метода).

Выводы

1. Сушка – сложный тепломассообменный процесс, который является комплексом трех процессов: конвективной диффузии, диффузии в стесненных условиях капилляров и десорбции влаги, а значит, нуждается в комплексном подходе к его изучению и решению сопутствующих ему проблем.

2. Каждый процесс (подпроцесс) как составляющая целого процесса сушки имеет свои особенности и факторы, которым он подчиняется, а значит и соответствующие способы воздействия на него.

3. Комбинированные способы сушки – перспективный путь к решению проблем сушильных технологий в пищевой и перерабатывающей промышленности. Комбинированное воздействие электромагнитного поля и псевдоожижения – один из вариантов интенсификации и снижения энергетических затрат процесса сушки дисперсных продуктов.

Литература

1. Бурдо О.Г. Энергоэкономические аспекты развития перерабатывающей отрасли АПК // Зернові продукти і комбікорми.– 2001.– № 4.– С. 58–60.

2. Бурдо О.Г. Енергетичний консалтинг в АПК Південного регіону // Енергозберігаючі технології й автоматизація.– 2001.– № 1 – 2.– С. 70 – 74.

3. Захаров М.Д. Удосконалення енерготехнологій АПК / М.Д. Захаров, О.Г. Бурдо, І.В. Безбах // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2001. – № 2. – С. 3 – 6.

4. Бурдо О.Г. Невтішний виходить моніторинг енергозатрат / О.Г. Бурдо, О.В. Зиков, В.І. Донкоглов // Зерно і хліб. – 2006. – № 3. – С. 46 – 48.

5. Бурдо О.Г. Тенденції розвитку зерносушильної техніки / О.В. Воскресенська, В.І. Донкоглов // Зернові продукти і комбікорми.– 2006.– № 2.– С. 48–53.

6. Бурдо О.Г. Сушити горох варто за економними технологіями / О.Г. Бурдо, І.В. Безбах, В.І. Донкоглов, Ю.О. Казмірук // Зерно і хліб.– 2007.– № 1.– С. 46–47.

7. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженернофизический журнал. Минск.– Т. 78.– № 2.– С. 88–93.

8. Лыков А.В. Теория сушки. М., "Энергия", 1968. 472 с.

Сведения об авторах.

Бурдо Олег – Одесская национальная академия пищевых технологий, кафедра процессов и аппаратов; заведующий кафедры, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: энергосберегающие и энергоэффективные технологии, нанотехнологии пищевых производств. Информация для контактов: раб.тел.: 8-(10+38+048)+712-41-75, +712-41-29; e-mail: terma@osaft.odessa.ua.

Казмирук Юрий – Одесская национальная академия пищевых технологий, кафедра процессов и аппаратов; аспирант. Область научных интересов: энергосберегающие и энергоэффективные технологии, нанотехнологии пищевых производств. Информация для контактов: раб. тел.: 8-(10+38+048)+712-41-29; e-mail: terma@osaft.odessa.ua.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ ТОЧНЫХ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ РАЛИАЦИИ

А. Акулинин, В. Смыков

Институт прикладной физики АН Молдовы

Аннотация: На основе полученных точных измерений солнечной радиации в Кишиневе получена оценка количества падающей солнечной энергии, перехватываемая солнечной панелью. Определены оптимальная ориентация солнечных панелей и ожидаемый объем выработки электроэнергии солнечными панелями.

Ключевые слова: солнечная радиация, солнечная энергетика.

EVALUAREA POSIBILITĂȚILOR ENERGETICII SOLARE PE BAZA MÁSURÁRILOR PRECISE A RADIAŢIEI SOLARE TERESTRE A. Aculinin, V. Smîcov

Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat: Pe baza măsurărilor radiației solare în mun. Chișinău a fost obținută o apreciere justă a cantitații energiei solare incidente pe un panou solar și interceptat de acesta. S-a determinat orientarea optimă a panourilor solare si cantitatea de energie posibil de obtinut cu ele. Cuvinte cheie: radiația solara, energetica solara.

EVALUATION OF OPPORTUNITIES OF SOLAR ENERGETICS ON THE BASIS OF ACCURATE GROUND-BASED MEASUREMENTS OF SOLAR RADIATION A. Aculinin, V. Smicov

Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract: Expected quantity of a solar energy received by solar panel is estimated on the basis of accurate measurements of solar radiation in Kishinev. Optimal orientation of solar panels and apparent volume of the electric power generated by solar panels are determined. Keywords: solar radiation, solar power.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все больше возрастает интерес к использованию солнечной энергии. Ее использование является одним из весьма перспективных направлений энергетики. Экологичность, возобновляемость ресурсов, отсутствие затрат на капремонт фотомодулей как минимум в течение первых 30 лет эксплуатации - всё это сторонами солнечной энергетики. Быстрое является сильными развитие гелиоэнергетики стало возможным благодаря снижению стоимости фотоэлектрических преобразователей в расчете на 1 Вт установленной мощности с 1000 долларов в 1970 году до нескольких долларов США в настоящее время. Правда из-за дефицита солнечного кремния впервые за долгое время цена солнечных батарей несколько выросла. В реально действующих структурах с гетеропереходами КПД достигает на 30% более сегодняшний день а в однородных полупроводниках типа . монокристаллического кремния - до 18%. Среднее значение КПД в солнечных батареях на монокристаллическом кремнии сегодня около 15%. Потенциальные возможности энергетики, основанной на использовании непосредственно солнечного излучения, чрезвычайно велики. Использование всего лишь 0.0125 % энергии Солнца могло бы обеспечить все сегодняшние потребности мировой энергетики, а использование 0.5 % - полностью покрыть потребности на перспективу.

Обычно потенциальные возможности для получения и преобразования солнечной энергии для каждого конкретного пункта на земном шаре определяются путем расчетов. При этом используются данные по солнечной радиации из климатических справочников, не учитывающие местные особенности и характер облачности, не поддающейся расчетам. Поэтому результат получается приблизительный. Располагая точными наземными измерениями солнечной радиации в г. Кишиневе за несколько лет, мы получили численные значения количества солнечной энергии, падающей на поверхности с разным наклоном к горизонту.

2. МОНИТОРИНГ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Для решения задач, связанных с долговременным непрерывным мониторингом радиационных свойств атмосферы и накоплением наборов данных измерений солнечной радиации в широком спектральном диапазоне, впервые в Молдове был создан многофункциональный радиометрический измерительный комплекс (см. рис. 1). Комплекс расположен на крыше здания Института прикладной физики АН Молдовы в городской черте Кишинева.



Рис. 1. Многофункциональный измерительный комплекс

Автоматизированный многофункциональный измерительный комплекс создан на базе электронно-механических элементов и датчиков излучения, серийно выпускаемых компанией Kipp&Zonen (Нидерланды). Все датчики радиации и отдельные элементы измерительного комплекса имеют сертификат ISO 9001 и сертифицированы в соответствии с требованиями Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [1] для использования на сетевых станциях. Используемые датчики солнечного излучения имеют вторичный стандарт (Secondary Standard) и первый класс (First Class). Данный комплекс позволяет проводить непрерывные солнечной радиации в широком спектральном измерения диапазоне: OT ультрафиолетовой (UV-B) до инфракрасной (IR) границы спектра в отдельных спектральных поддиапазонах. Выбранные поддиапазоны соответствуют спектральным характеристикам датчиков излучения (см. Таблицу 1).

Таблица 1.

Тип датчика	Измеряемые компоненты	Тип радиации	Спектральный диапазон
UV-S-B-C	диффузная, глобальная	UV-В радиация	280 – 315 нм
UV-S-A-C	глобальная	UV-А радиация	315 – 400 нм
PAR Lite	глобальная	фотосинтетически активная радиация (PAR)	400 – 700 нм
SP Lite	глобальная	видимое и ближнее инфракрасное излучение	400 – 1100 нм
CM-11	диффузная, глобальная	солнечная радиация	305 – 2800 нм
CH-1	прямая	солнечная радиация	200 – 4000 нм
CG-1	глобальная	собственное излучение атмосферы	4,5 – 42 мкм

Датчики излучения, используемые в измерительном комплексе

Комплекс позволяет проводить непрерывные измерения диффузной, прямой и глобальной солнечной радиации. Измерения диффузной и прямой компонент солнечной радиации проводятся с использованием датчиков СМ-11 и CH-1, которые расположены на подвижной платформе автоматической системы 2AP BD слежения за солнцем.

Остальные датчики расположены на стационарной платформе и используются для измерения глобальной компоненты солнечного излучения. Выбор типов датчиков излучения, их спектральные характеристики, схемы расположения датчиков по типу

3

платформ, места наблюдения и методов измерений солнечного излучения в различных спектральных поддиапазонах определялся в соответствии с требованиями BMO [1], и руководствами по проведению измерений, которые используются Global Atmospheric Watch (GAW) и Baseline Surface Radiation Network (BSRN) [2,3].

Поток исходных данных измерений, осредненных за 1 минуту, накапливается в модуле CR10x SM4M и считывается удаленным (на 20 м от комплекса) компьютером. Структура комплекса и метод измерения подробно описаны в работе [4] и представлены на сайте <u>http://arg.phys.asm.md</u>. Таким образом, в нашем распоряжении имеются точные измерения прямой солнечной радиации на перпендикулярную плоскость, диффузной и глобальной радиации на горизонтальную плоскость с временным разрешением -1 минута.

Спектральный диапазон чувствительности кремниевых солнечных элементов составляет 0.4–1.1 мкм, в котором заключено ~94% энергии из солнечного спектрального диапазона 0.3-3.0 мкм. Поэтому были использованы данные от датчиков СН-1 для прямой и СМ-11 для диффузной и глобальной радиации. На рис. 2 приводятся средние месячные суммы прямой, диффузной и глобальной радиации за три года, с 2005 по 2007г.г. Годовые суммы диффузной, глобальной и прямой солнечной радиации составляют 1950, 4720 и 4900 МДж/м², соответственно.



Рис. 2. Средние месячные суммы прямой, диффузной и глобальной радиации за период 2005-2007 г.г.

Доля диффузной радиации составляет от 34% в июле до 70% в декабре, а в среднем за год 41%. Поэтому при подсчетах количества солнечной радиации, падающей на наклонные поверхности, необходимо учитывать не только прямую радиацию, падающую под соответствующим углом, но и диффузную. Особенно это касается зимних месяцев.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И ОПТИМАЛЬНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ

Солнечная радиация, падающая на произвольно ориентированную поверхность, складывается из **прямой** радиации от Солнца, **диффузной** от неба и **отраженной** от поверхности земли. В свою очередь диффузная радиация от неба состоит из **ореольной** диффузной радиации, то есть радиации из зоны неба, находящейся непосредственно вокруг диска солнца, и **фоновой** диффузной радиации, которую считают равномерно распределенной по всему полусферическому небосводу.

Для солнечных электрических панелей или коллекторов важно знать оптимальный угол наклона к плоскости горизонта для получения максимального количества энергии. Для этого мы вычислили месячные суммы солнечной радиации, падающей на плоскость с углом наклона к горизонту от 10° до 90° с шагом в 10°, направленную на юг, а также на плоскость, все время ориентированную перпендикулярно направлению на Солнце.

Прямая радиация *R*_{dir} вычислялась по формуле:

$$R_{dir} = R_{CH} \bullet Cos \ i, \tag{1}$$

где *i* – угол между нормалью к поверхности солнечной панели и направлением на Солнце, *R_{CH}* – измеренная прямая солнечная радиация на перпендикулярную плоскость.

$$Cos i = Cos \alpha \cdot Sin h + Sin \alpha \cdot Cos h \cdot Cos A,$$
⁽²⁾

где α - угол наклона поверхности к горизонту, *h* – высота Солнца, *A* – разность азимутов Солнца и проекции нормали к поверхности на горизонтальную плоскость [5].

Экспериментально установлено, что **ореольная** радиация на поверхности приблизительно составляет 7% прямой солнечной радиации на этой поверхности. Таким образом, интенсивность **ореольной** радиации R_{or} составляет $0.07R_{dir}$.

Фоновая радиация прямо пропорциональна той части небесного свода, к которой обращена поверхность. Например, вертикальная поверхность обращена только к половине небесной полусферы. Поэтому фоновая радиация на вертикальной

поверхности составляет половину радиации на горизонтальной поверхности. Поверхность, наклоненная к горизонтали под углом α, будет обращена к 0.5(1 + cosα) части полусферического свода. Поэтому **фоновая** радиация на наклонной поверхности равна:

$$R_F = 0.5 \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot (R_{dif} - 0.07 \cdot R_{dir})$$
⁽³⁾

где *R*_{dif} – измеренная диффузная радиация на горизонтальную плоскость.

Наклонная плоскость получает радиацию также и от окружающей земной поверхности. Она пропорциональна 0.5(1 – cosα) части земной поверхности, к которой обращена плоскость. **Отраженная** радиация от земли выражается следующим уравнением:

$$R_{ref} = 0.5 \cdot Al \cdot R_{gl} \cdot (1 - \cos \alpha), \tag{4}$$

где R_{gl} – измеренная глобальная радиация на горизонтальную плоскость, Al – коэффициент отражения поверхности земли, называемый альбедо. Так как на нашем комплексе альбедо не измеряется, мы использовали среднемесячные многолетние значения для Кишинева из [6].

Таким образом, полная радиация на наклонную плоскость составит

$$R_{sum} = R_{dir} + R_{or} + R_F + R_{ref}.$$
(5)

Для каждого измеренного минутного значения прямой, диффузной и глобальной радиации вычислены высота и азимут Солнца и по формулам (1)-(5) вычислены суммарные значения радиации для углов наклона от 10° до 90°. Далее для каждого из углов посчитаны месячные суммы. Кроме того, для плоскости, все время ориентированной перпендикулярно солнечным лучам, т.е. снабженную гелиостатом, аналогичные вычисления производились по формуле:

$$R_{norm} = 1.07 \cdot R_{CH} + R_F + R_{ref}.$$

Для проверки точности применяемых формул мы также вычислили суммы радиации для угла наклона в 0° и сравнили их с измеренными значениями глобальной радиации на горизонтальную плоскость. Разница не превышает 0.5% и в среднем составляет 0.2%, что меньше ошибок измерений.

Далее вычислялись среднемесячные суммы за 3 года (2005-2007г.г.). Они представлены в таблице 2. Все суммы падающей солнечной радиации выражены в киловатт-часах на квадратный метр (кВт·ч/м²), что более удобно для энергетиков-

практиков. В трех последних строках даны суммы за год (1-12), в теплую половину года с апреля по сентябрь (4-9) и в холодную половину с октября по март (10-3).

Таблица 2.

Наклон	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	галиостат
Месяц	0	10	20	50	40	50	00	70	80	90	телиостат
1	34.73	41.56	47.68	52.91	57.12	60.17	61.96	62.43	61.53	59.27	68.26
2	48.64	54.49	59.43	63.30	65.99	67.43	67.55	66.34	63.82	60.03	74.08
3	102.37	112.05	119.48	124.45	126.81	126.48	123.43	117.72	109.47	98.89	151.49
4	133.16	139.84	143.63	144.43	142.20	137.00	128.94	118.24	105.17	90.14	175.03
5	182.58	187.36	188.22	185.19	178.34	167.84	153.95	137.11	117.84	96.84	241.14
6	194.00	196.21	194.47	188.89	179.62	166.91	151.10	132.70	112.35	90.97	254.19
7	201.44	205.32	204.94	200.35	191.67	179.11	163.03	143.91	122.41	99.39	270.93
8	156.85	163.78	167.22	167.09	163.38	156.18	145.67	132.13	115.95	97.64	215.04
9	119.53	130.17	137.98	142.74	144.29	142.57	137.59	129.46	118.35	104.57	179.94
10	76.00	86.82	95.79	102.63	107.16	109.22	108.72	105.66	100.07	92.08	128.71
11	36.32	42.88	48.60	53.31	56.87	59.19	60.17	59.78	58.00	54.87	66.54
12	21.88	25.35	28.43	31.01	33.04	34.45	35.19	35.24	34.58	33.21	37.35
1-12	1307.5	1385.8	1435.9	1456.3	1446.5	1406.6	1337.3	1240.7	1119.5	977.9	1862.7
4-9	987.6	1022.7	1036.5	1028.7	999.5	949.6	880.3	793.6	692.1	579.6	1336.3
10-3	319.9	363.2	399.4	427.6	447.0	456.9	457.0	447.2	427.5	398.4	526.4

Среднемесячные суммы солнечной радиации (кВт·ч/м²), падающей на наклонные плоскости солнечных панелей.

На рис. 3 представлены среднемесячные суммы солнечной радиации для разных углов наклона плоскости солнечной панели к горизонту. Верхняя кривая соответствует плоскости, всегда перпендикулярной к лучам Солнца, на которую падает наибольшее количество солнечной энергии. Как видно из рисунка, больше всего радиации, кроме перпендикулярной плоскости, поступает на поверхности, наклоненные под углами от 0° до 30°.

Проведенные расчеты позволяют определить оптимальный угол наклона солнечной панели в разное время года. На рис. 4 представлены зависимости месячных сумм солнечной радиации от угла наклона поверхности к горизонту для каждого месяца года. Оптимальный угол наклона варьируется от 10° в июне до 70° в декабре – январе, что наглядно демонстрирует рис. 5.

На практике постоянно менять угол наклона солнечной панели неудобно и трудоемко, особенно если панели большие или их много. Поэтому целесообразно рассмотреть применение одного из трех вариантов:

7

a) гелиостат, когда специальное устройство следит за Солнцем и ориентирует панель всегда перпендикулярно солнечным лучам;

б) дважды в год изменяется наклон панели – с летнего на зимний и обратно;

в) угол наклона панели в течение года не меняется.



Рис. 3. Приток солнечной радиации для разных углов наклона плоскости солнечных панелей относительно горизонта



Рис. 4. Зависимости месячных сумм солнечной радиации от угла наклона поверхности солнечной панели
При первом варианте можно получить максимальное количество энергии, но часть ее потребляется гелиостатом и повышается стоимость. Второй вариант дешевле и проще, особенно для небольших панелей. Третий вариант вообще не требует обслуживания и поэтому самый надежный и экономичный.



Рис. 5. Оптимальный угол наклона солнечной панели в течение года

На рис. 6 показаны суммарные количества радиации за год, летний и зимний полугодия при разных углах наклона солнечной панели. Верхняя кривая соответствует третьему варианту и оптимальным углом для него является угол в 32° . Средняя и нижняя кривые соответствуют второму варианту. Для летнего периода оптимальным является угол около 20° , для зимнего периода – 55° . Следует заметить, что эти углы являются оптимальными именно для Кишинева за последние 3 года. Для других пунктов с такой же широтой они могут несколько отличаться в зависимости от характера облачности.

Количество солнечной энергии, получаемой за год одним квадратным метром, равно 1.863 МВт·ч для первого варианта, 1.493 МВт·ч для второго и 1.456 МВт·ч для третьего. Как видим второй и третий варианты мало отличаются, поэтому экономически более целесообразно использовать стационарные солнечные панели, ориентированные на юг под углом около 32° к горизонту круглый год. Что касается варианта с гелиостатом, то здесь необходимо знать количество энергии, потребляемой

самим гелиостатом. Если потребление меньше 400 кВт·ч в год с 1м² площади солнечных панелей, то вполне оправдано использовать гелиостат.



Рис. 6. Суммарные количества радиации за год, летний и зимний полугодия при разных углах наклона солнечной панели

Приняв КПД солнечных панелей в среднем за 15% можно в течение года с одного квадратного метра получить от 218 кВт·ч при постоянном положении панели до 280 кВт·ч с использованием гелиостата. Следует также учесть, что приход солнечной энергии на поверхность земли неравномерно распределен в течение года. За 2/3 года с марта по октябрь приходит 86% этого количества и всего 14% за 4 месяца с ноября по февраль.

4. ВЫВОДЫ

- По точным измерениям солнечной радиации в Кишиневе годовые суммы диффузной, глобальной и прямой солнечной радиации составляют 1950, 4720 и 4900 МДж/м² соответственно.
- Оптимальный угол наклона солнечных панелей к горизонту по реальным высокоточным измерениям в Кишиневе для летнего периода около 20°, для зимнего периода – 55°.
- При неизменяемом угле наклона оптимальным является угол в 32°.

 В течение года с одного квадратного метра солнечной панели можно получить 218 кВт·ч электроэнергии при постоянном положении панели, 224 кВт·ч при изменении угла наклона с летнего на зимний и обратно, 280 кВт·ч при использовании гелиостата.

Литература

- Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation/ Sixth edition; WMO-No. 8, 1996.
- Global Atmosphere Watch (GAW) Measurements Guide, WMO TD No. 1073, July 2001.
- Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual (Version 1.0 Reprinted, December 2000), World Climate Research Programme// Ed. by L. J. B. McArthur, WMO/TD-No. 879, February 1998.
- А. Акулинин, А. Смирнов, В. Смыков, Т. Эк, А. Поликарпов, "Наземный многофункциональный измерительный комплекс для мониторинга атмосферной радиации в Кишиневе, Молдова"- Международный симпозиум стран СНГ "Атмосферная радиация" (МСАР-04), 22-25 июня 2004 г., С. Петербург, Россия (2004). <u>http://arg.phys.asm.md/paper/aculinin_1.pdf</u>.
- 5. К. Я. Кондратьев «Актинометрия», Л., Гидрометеорологическое издательство, 1965.
- 6. «Климат Кишинева», под ред. В.Н. Бабиченко и Г.Н. Шевкун, Л., Гидрометеоиздат, 1982, с. 11.

Александр Акулинин, д.т.н., вед. н. с. Института прикладной физики АН Молдовы. Области научных интересов: оптика атмосферы, атмосферный аэрозоль, УФ радиация, озон. Опубликовано 50 научных работ. E-mail: <u>akulinin@phys.asm.md</u>

Владимир Смыков, н.с. Института прикладной физики АН Молдовы. Области научных интересов: астрономия, оптика атмосферы, прикладное программирование. Опубликовано 60 научных работ. E-mail: <u>smicov@phys.asm.md</u>.

УТОЧНЁННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ВОДЫ ЁМКОСТНОГО ТИПА

Ермуратский Василий, Ермуратский Владимир (Институт энергетики АН Молдовы), Ермуратский П. (Московская государственная академия тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова г. Москва)

Аннотация. Представлена уточнённая методика расчёта тепловых режимов солнечных нагревателей воды ёмкостного типа, основанная на использовании электротепловой схемы замещения и метода узловых потенциалов.

Ключевые слова: солнечные нагреватели воды, электротепловая схема замещения, солнечное излучение.

METODA PRECISĂ DE CALCUL AL REGIMULUI DE FUNCȚIONARE ALE INCĂLZITOARILOR SOLARI DE APĂ DE TIP CAPACITATEA

Ermuratski Vasili, Ermuratschii Vladimir (Institutul de Energetică al Academiei de Științe,)Ermuratski P. (Academia de stat a tehnologiilor chimice fine M.V. Lomonosov din Moscova) Rezumat. Este prezentată metoda precisă de calculul a regimurilor termice a încălzitoarilor solare de apă de tip capacitativ bazată pe utilizarea schemei termoelectrice echivalente și metoda nodurilor de potențial. Cuvinte cheie: încălzitor solar de apă, schema termoelectrică echivalentă, iradierea solara.

REFINED METHOD OF COMPUTING MODES OF OPERATING OF CAPACITY-TYPE SOLAR HEATERS OF WATER

Ermuratski Vasili, Ermuratski Vladimir (Institute of Power Engineering, Academy of Sciences of Moldova, Kishinev), Ermuratski P. (M.V. Lomonosov Moscow state academy of fine chemical technology, Moscow)

Abstract. The refined method procedure of thermal modes of solar heaters of water of the capacity type, based on use of an electro-thermal equivalent circuit and a method of central potentials is presented. **Keywords**: solar heaters of water, electro-thermal equivalent circuit, solar radiation

Объект. Рассматривается солнечный нагреватель воды (СНВ), в котором конструктивно совмещены солнечный коллектор и аккумулятор горячей воды. Такие СНВ перспективны не только для индивидуальных установок [1,2], но и для достаточно крупных систем горячего водоснабжения [3]. Вместе с тем, применение традиционных методик расчёта температур, производительности, полезной энергии, изложенных в вышеуказанных работах, приводит к погрешностям, которые обусловлены неточным заданием параметров и особенностью теплообмена таких СНВ с окружающей средой. Так, при горизонтальном расположении абсорбера могут существенно увеличиться радиационные потери в атмосферу и уменьшиться радиационный теплообмен с окружающими предметами. Кроме того, в отличие, например от гелиоустановок с разделёнными элементами, СНВ рассматриваемого вида, по-другому реагируют на переменный режим облучения, связанный с затенением при переменной облачности. Возможны разные варианты конструктивного исполнения прозрачного ограждения (число слоёв, вид материала, его толщина и т.д.) и абсорбера СНВ (селективность, форма). Характеристики СНВ могут сильно зависеть от наличия экранов-рефлекторов и их углов наклона. В связи с этими особенностями возникает необходимость в уточнении существующих методик расчёта температурных режимов СНВ ёмкостного типа.

Методика расчёта температурного режима СНВ

Примем следующие упрощающие допущения: температурное поле СНВ одномерное, температура воды равна температуре абсорбера, потребление горячей воды из СНВ осуществляется во второй половине дня по завершению процесса нагрева.

Для расчётов энергетических показателей и характеристик солнечного нагревателя воды ёмкостного типа применена электротепловая схема замещения, показанная на рис.1. На этом рисунке С - это теплоёмкость рабочего тела; резисторы $Y_1 - Y_5$ – тепловые проводимости; S_1, S_2 – источники тепла (поглощаемая прозрачным ограждением и абсорбером солнечная энергия); T_a – температура окружающей среды; T_{ae} – эквивалентная температура атмосферы. Значения этих величин зависят от конструкции, геометрических размеров нагревателя, а также от условий его работы/1,2/.



Рис.1 Электротепловая схема замещения СНВ ёмкостного типа.

Температуры T_1 , T_2 и T_3 в узлах схемы замещения соответствуют точкам, расположенных на внешней и внутренней поверхности прозрачного ограждения, а также в воде.

Теплоёмкость рабочего тела солнечного нагревателя воды определяется по известному выражению:

$$C = \rho V C_{v} \quad , \tag{1}$$

где ρ , V, C_v – плотность, объём и удельная теплоёмкость воды.

Тепловые проводимости $Y_1 - Y_5$ рассчитываются для каждого элемента конструкции СНВ, используя данные по определению удельных коэффициентов конвективного, кондуктивного и радиационного теплообмена, теплоотдачи, приведенные в работах [1,4,5] и в других источниках, соответствующие конструктивным особенностям и ориентации СНВ. Так, например радиационная тепловая проводимость Y_1 (между внешней поверхностью прозрачного ограждения и атмосферой), учитывая небольшое отличие абсолютных температур T_{ae} и T_1 , рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$Y_1 = \varepsilon \varphi F[0.005(T_1 + T_{ae})]^3 \quad , \tag{2}$$

где ε, φ – эквивалентная степень черноты и угловой коэффициент этой пары; T_{ae} – эквивалентное значение абсолютной температуры атмосферы; F – апертура СНВ. Особенностью здесь является то, что ε, φ и эквивалентная температура атмосферы должны определяться для условий с различной влажностью воздуха, индекса и характера облачности [1].

Проводимость *Y*₂ равна сумме двух проводимостей, определяемых для вышеуказанной поверхности по формулам конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой. При этом радиационная компонента находится по формуле (2), используя соответствующие значения коэффициентов и температур. Для расчётов конвективной компоненты применялась следующая формула [4]:

$$Y_c = F\left[A\left(V\right)^m + B\right] \tag{3}$$

где *А*, *B*, *m* - коэффициенты, зависящие от размеров поверхности, температур и режима движения воздуха; *V* - скорость ветра.

Аналогично рассчитываются остальные тепловые проводимости схемы замещения. При правильно найденных параметрах считаем эту схему эквивалентной по отношению к объекту. Значения тепловых проводимостей электротепловой схемы замещения зависят от температур отдельных частей СНВ и поэтому должны рассчитываться одновременно с расчётом теплового режима.

Основная сложность обеспечения результатов расчётов близких к реальным связана с моделированием метеорологических данных. Обычной практикой является формирование условий «типичного метеорологического года» (TMY [1]).

Интенсивность падающего на некоторую поверхность прямого солнечного излучения зависит от ориентации этой поверхности, месяца года, времени суток и степени прозрачности атмосферы [1]. Для поверхности перпендикулярной лучам эту величину предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$I = 1353K_1 K_2 \exp(-0.41M_a), \qquad (4)$$

где K_1, K_2 – индексы, учитывающие прозрачность атмосферы и характеристики облачности. Значение условной массы атмосферы определялась по следующему выражению:

$$M_a = 1/(0.96\cos(\theta_z) + 0.05)$$
(5)

Координаты Солнца на небосводе (зенитный угол Солнца (θ_z и азимут), а также плотность солнечного излучения, падающего на прозрачное ограждение СНВ рассчитываются по формулам, приведенным в работах [1,2].

Мощность источников S_1, S_2 рассчитывается в соответствии с рекомендациям работы [1], определяя пропускательную способность прозрачного ограждения как функцию угла падения солнечных лучей, а также приведенную поглощательную способность абсорбера.

Аппроксимация дневного хода температуры окружающей среды до момента начала её снижения осуществлялась экспоненциальной функцией следующего вида:

$$t_{a}[\tau] = t_{0}[N_{m}] + (t_{m}[N_{m}] - t_{0}[N_{m}])(1 - \exp(-\tau / B[N_{m}]))$$
(6)

где N_m – номер месяца года; $t_0 [N_m]$ – начальное значение температуры воздуха; $t_m [N_m]$ – максимальное суточное значение температуры; $B[N_m]$ – постоянная времени экспоненты суточного хода температуры. После момента начала снижения температуры воздуха (τ_1) выражение для её расчета имеет вид:

$$t_a[\tau] = t_a[\tau_1] \exp(-\tau / B_1[N_m])$$
(7)

Значения параметров в формулах (6) и (7) определяются по данным метеорологических наблюдений, приведенных, например, в работах [6,7].

Мощность потерь энергии определялась как сумма потоков теплообмена СНВ с окружающей средой:

$$\Delta Q = Y_1 \left(T_1 - T_{ae} \right) + Y_2 \left(T_1 - T_a \right) + Y_5 \left(T_3 - T_a \right)$$
(8)

Расчёт температур в узлах электротепловой схемы замещения (Рис.1) производится, используя метод узловых потенциалов, известный из электротехники [8]. Для того чтобы не решать систему уравнений, описывающую нестационарный тепловой процесс, связанный с учётом теплоёмкости воды, был применён следующий подход.

Интервал времени, в течение которого поглощается солнечная энергия, разбивается на ряд интервалов. Расчёт выполняется, начиная с первого интервала для которого известно начальное значение температуры воды, которое принято зависящим от месяца года или вида источника воды водопровод или, например, колодец. Система уравнений для узловых потенциалов решается как для стационарного процесса при задаваемой температуре воды (T_3), т.е. для схемы, показанной на Рис.1, составляется не три уравнения, а два. Температура воды на каждом интервале времени находится поисковым методом, в котором параметр поиска определяется из уравнения небаланса потоков тепла для схемы замещения:

$$D = S_1 + S_2 - (PP_1 + PP_2 + PP_3) - Q_3 \quad , \tag{9}$$

где PP_1 , PP_2 , PP_3 – потоки тепла через проводимости Y_1, Y_2, Y_5 (Рис.1).

Поток тепла, нагревающего воду, рассчитывается по формуле изменения внутренней энергии массы воды:

$$Q_3 = mc\Delta T_3 / \Delta \tau , \qquad (10)$$

где ΔT_3 - изменение температуры воды за интервал времени $\Delta \tau$. Поисковый процесс производится на каждом интервале времени. При этом в качестве начального значения температуры воды для следующего интервала времени используется значение этой величины, полученное на предыдущем интервале времени.

Для расчётов температур в различных точках конструкции СНВ ёмкостного типа по вышеприведенным формулам была разработана специальная программа (среда Дельфи, язык - Паскаль). Рассчитываются также значения таких величин, как полезная мощность и энергия, потери тепла и КПД СНВ на различных интервалах времени суток, месяцев и года.

Результаты математических и физических экспериментов

Для оценки применимости предложенной методики расчёта были выполнены измерения и расчёты температуры воды двух конструкций: СНВ1 (без корпуса и теплоизоляции) и теплоизолированного СНВ2 с полимерными абсорберами при 100л/м². На рис.2 и рис.3 приведены результаты экспериментов, проведенных в условиях ясных солнечных дней августа 2005.



Рис.3 Зависимости температуры воды и воздуха от времени суток для CHB2 с корпусом и теплоизоляцией с полимерным абсорбером и однослойным стеклянным ограждением

Из данных этих экспериментов следует достаточно хорошее совпадение временных зависимостей температуры воды. Систематическое расхождение данных физических и численных экспериментов вероятнее всего обусловлено неточностью определения эквивалентной температуры атмосферы, которая при расчётах была равна -7°С. Полное совпадение результатов численных и физических экспериментов имеет место при $t_{ae} = 0^{\circ}$ С. На рисунках также видно, что максимальные температуры воды в этих двух конструкциях отличаются и экстремум наблюдается в разное время. В это время целесообразно производить отбор горячей воды или же теплоизолировать прозрачное ограждение СНВ для более позднего отбора.

Заключение.

Разработана уточнённая методика расчёта тепловых режимов работы солнечных нагревателей воды ёмкостного типа, основанная на использовании электротепловой схемы замещения и метода узловых потенциалов. Методика позволяет учесть различные механизмы и условия теплообмена СНВ с окружающей средой, а также вариации солнечного излучения и температуры этой среды. Необходимо разработать более точный способ определения эквивалентной температуры атмосферы, учитывающий, в частности, влагосодержание воздуха, индекс облачности и её характер.

Литература

1. Duffie J.F., Beckman W.A.. Solar engineering of Thermal Processes. Second Edition. N-Y., 1991. John Willy & Sons.

2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М.: Энергоатомиздат, 1991.

3. Tsilingiris P.T. Design, analysis and performance of low-cost plastic film large solar water heating systems. Solar Energy 60, 5,(1997) 245-256.

4.Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л. Энергия, - 1968, - 359с.

5.Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд.4. М. Энергоиздат. 1981. 417с.

6. Климат Кишинёва / Под ред. В.Н. Бабиченко, Т.Г. Шевкун/ – Л., Гидрометеоиздат, 1982

7. Лассе Г.Ф. Климат Молдавской ССР Л.Гидрометеоиздат. 1978.

8. Основы теории цепей /Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил и др.-М.:Энергия, 1975.

Авторы:

Ермуратский Владимир Васильевич- доктор-хабилитат технических наук, заведующий лабораторией нетрадиционных источников энергии Института энергетики АНМ. Научные интересы связаны с исследованиями в области возобновляемых источников энергии и энергосбережения. Занимается разработкой и исследованиями низкотемпературных солнечных тепловых установок и устройств на их основе. <u>ermuratskie@gmail.com</u>

<u>Ермуратский Василий Владимирович</u>-инженер лаборатории управляемого электропривода Института энергетики АН РМ. Научные интересы связаны с разработкой методов и программ моделирования процессов в технических устройствах и системах.

<u>Ермуратский Пётр Васильевич</u> - доктор-хабилитат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, электроники, микропроцессорной техники им. А.В.Нетушила, Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова Научные интересы связаны с исследованиями в области планирования экспериментов и моделирования процессов в нелинейных электрических цепях.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ РЕФЛЕКТОРОВ В ГЕЛИОУСТАНОВКАХ

Ермуратский Василий, Ермуратский Владимир (Институт энергетики АН Молдовы), Ермуратский П. (Московская государственная академия тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова г. Москва)

Аннотация. Методом геометрической оптики получены выражения для расчёта эффективности применения плоских рефлекторов для повышения интенсивности солнечного излучения, падающего на прозрачное ограждение гелиоустановок.

Ключевые слова: солнечное излучение, плоские рефлекторы, гелиоустановки.

EFICIENTA UTILIZĂRII REFLECTOARELOR PLATE ÎN INSTALAȚII HELIOTERMICE

Ermuratski Vasili, Ermuratschii Vladimir (Institutul de Energetică al Academiei de Științe,)Ermuratski P. (Academia de stat a tehnologiilor chimice fine M.V. Lomonosov din Moscova)

Rezumat. Conform metodei opticei geometrie au fost obținute expresii pentru calculul eficienței utilizării reflectoarelor plate pentru majorarea intensivitații radiației solare, care cade pe membrana transparentă a instalațiilor heliotermice.

Cuvinte cheie: radiația solară, reflectoare plane, instalații heliotermice.

EFFICIENCY OF APPLIANCE OF FLAT REFLECTORS IN SOLAR DEVICES

Ermuratski Vasili, Ermuratski Vladimir (Institute of Power Engineering, Academy of Sciences of Moldova, Kishinev), Ermuratski P. (M.V. Lomonosov Moscow state academy of fine chemical technology, Moscow

Abstract: There were obtained expressions for the calculus of the efficiency of the use of flat reflectors using the methods of geometric optics. These expressions are used for calculations of the use of flat reflectors for increasing intensity of solar radiation which is directed to the transparent barrier of solar devices.

Key words: Solar radiation, flat reflectors, solar devices.

Объект исследования. В качестве объекта рассматривается система преобразования солнечного излучения в тепловую энергию, состоящая из плоских рефлекторов и поглотителя, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Такие системы являются одним из вариантов реализации гелио установок (ГУ) [1]. Плоские рефлекторы увеличивают плотность потока солнечного излучения, падающего на абсорбер ГУ, что повышает их эффективность. Обычно рефлектор имеет те же размеры, что и прозрачное ограждение ГУ, однако возможны случаи, когда это не соблюдается. В работе [1] имеются методика расчёта вклада плоских рефлекторов, базирующаяся на применении алгебры потоков радиационного теплообмена [2]. Однако по нашему мнению здесь более подходящими являются методы геометрической оптики, поскольку основной вклад от рефлекторов обусловлен прямым, а не рассеянным излучением. Кроме того, для правильной оценки энергетических показателей ГУ важно знать не только общее поступление солнечной энергии, но также учитывать, в какое время она поступает.

Методические основы расчёта эффективности применения плоских рефлекторов

Решение задачи для самого общего случая, когда произвольно заданы: азимуты ориентации поверхностей, углы наклона к горизонтальной плоскости прозрачного ограждения ГУ и рефлекторов, а также их размеров заключается в нахождении уравнений границ «солнечного зайчика» в плоскости прозрачного ограждения ГУ. Так как плоские рефлекторы обычно имеют прямоугольную форму, то вместо уравнений границ можно использовать координаты габаритных точек «солнечного зайчика». Несмотря на кажущуюся простоту поставленной задачи, её решение в общем случае приводит к довольно громоздким выражениям. Поэтому ниже покажем решение задачи для частных, но наиболее широко применяемых на практике вариантах, когда прозрачное ограждение ГУ и рефлектор имеют одинаковые размеры и располагаются под углом 90°. При этом рефлектор может быть вертикальным, а прозрачное ограждение - горизонтальным и наоборот. На рис.1 показана расчётная схема для случая вертикально расположенного плоского зеркально отражающего рефлектора и горизонтального прозрачного ограждения. Аналогичная схема легко строится для горизонтального расположения рефлектора.



Рис.1 Схематическое изображение ортогональной системы рефлектор – прозрачное ограждение

Поскольку при кажущемся перемещении Солнца по небосводу изменяется его азимут и угол высоты, то при неподвижном положении ГУ и рефлектора будут перемещаться

границы «солнечного зайчика». Для случая ориентации сторон ГУ и рефлектора строго по направлению стран света (ось У направлена на юг, а Х - на восток), используя схему рис.1, можно получить следующие выражения для координат точки встречи луча, отражённого от верхнего левого края рефлектора, с плоскостью прозрачного ограждения:

$$X_1 = H\sin a / tg\alpha \tag{1}$$

$$Y_1 = H \cos a / tg\alpha \tag{2}$$

где *H* – высота рефлектора; *a*, *α* – азимут и угол высоты Солнца. Последние величины рассчитываются по формулам, приведенным в работах [1,3]. В частности, азимут Солнца рассчитывается по формуле:

$$a(\dot{\omega}) = \arcsin(\cos(\delta)\sin(\dot{\omega})/\cos(\alpha(\dot{\omega})), \qquad (3)$$

где ω – часовой угол, который принят отрицательным для дополуденного солнечного времени и положительным в другой половине дня; δ – угол склонения Солнца, зависящий от порядкового номера дня года [1,3].

Так как при прямоугольной форме рефлектора «солнечный зайчик» имеет форму параллелограмма, то координата точки встречи луча, отражённого от верхнего правого угла рефлектора X_2 , определяется по формуле:

$$X_2 = X_1 + L, (4)$$

где *L* –длина рефлектора.

Эти координаты определяют положение и размеры «солнечного зайчика». Полезной компонентой, естественно, считаем ту часть площади «солнечного зайчика», которая является общей с прозрачным ограждением. На рис.1 эта часть (площадь перекрытия F) заштрихована.

Анализ показал, что при изменении азимута и угла высоты Солнца, а также соотношения сторон прозрачного ограждения (L, B = H) возможны три области, для которых площадь перекрытия должна рассчитываться по разным формулам. Условно эти области соответствуют малым, большим углам высоты Солнца, а также утренним и вечерним часам, когда азимут близок к $\pi/2$.

Площадь «солнечного зайчика», которая находится в пределах границ прозрачного ограждения ГУ, определяется по следующим формулам:

$$F = LB - 0.5B^2 tga \qquad Y_1 \ge B tga \le L/B \tag{5}$$

$$F = LY_1 - 0.5 Y_1^2 tga \qquad Y_1 \le B \qquad X_1 \le L \tag{6}$$

$$F = 0.5L^2 tg(\pi/2 - a) \qquad tga \ge L/B \qquad X_1 \ge L \tag{7}$$

Для варианта системы с горизонтально расположенным рефлектором и вертикальным прозрачным ограждением ГУ формулы для расчётов площади перекрытия имеют следующий вид:

$$F = LB - 0.5B^2 tg\psi \qquad tg\psi \le L/B \quad Z_1 \ge B \tag{8}$$

$$F = L Z_1 - 0.5 Z_1^{2} tg\psi \qquad Z_1 \le B \qquad X_1 \le L$$
(9)

$$F = 0.5L^2 tg(\pi/2 - \psi) \qquad tg\psi \ge L/B \quad X_1 \ge L \tag{10}$$

Координаты точки встречи луча, отражённого от угла периферии рефлектора, с вертикальной плоскостью, в которой расположено прозрачное ограждение, определяются по следующим формулам:

$$Z_1 = H tg\alpha / \cos a \tag{11}$$

$$X_1 = Htga \tag{12}$$

Угол ψ рассчитывается по формуле:

$$\psi = \arctan(\sin a \, tg\alpha) \tag{13}$$

Так как в зависимости от времени суток азимут Солнца может быть как положительным, так и отрицательным, а площадь перекрытия не зависит от знака азимута, то в формулах (4) – (13) используются его абсолютные значения. Особенностью определения азимута Солнца является также отбор подходящих корней уравнения (3).

Угол падения отражённых от рефлекторов лучей на прозрачное ограждение такой же, как и для непосредственно падающих солнечных прямых лучей, что является следствием ортогональности двух плоскостей, однако их интенсивность более низкая из-за того, что коэффициент отражения рефлекторов меньше единицы.

Поэтому мощность, падающего на прозрачное ограждение солнечного излучения, определяется по формуле:

$$Q = I(\tau, N_d) (LB + \rho_r F), \qquad (14)$$

где $I(\tau, N_d)$ – интенсивность прямых солнечных лучей, падающих на прозрачное ограждение, зависящая от времени суток τ , порядкового номера дня года N_d ; ρ_r - коэффициент отражения рефлектора.

Эффективность применения рефлекторов оценивается отношением энергетических показателей (мощностей, энергий, КПД, потерь тепла) или экономических показателей гелиоустановки, рассчитываемых при наличии и отсутствии рефлекторов.

Результаты расчётов. Предложенная методика реализована в виде программы – в среде Delphi. Были выполнены расчёты для системы, состоящей из ортогонально расположенных плоского рефлектора и прозрачного ограждения.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчётов суточного значения удельной энергии, падающей на прозрачное ограждение ГУ при отсутствии рефлекторов ($\rho_r = 0$) и

при их наличии ($\rho_r = 0.78$). В последнем случае варьировалось отношение сторон рефлектора. Расчёты выполнены для дней, находящихся в середине месячного интервала.

Таблица1

Удельная энергия (МДж/м²) при горизонтальном прозрачном ограждении

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\rho_r = 0$	3	5.9	10.7	16.3	20.1	21.9	21.7	18.7	13	7.4	3.74	2.44
L/B = 1	4.9	9.3	16	22	24.9	26	26.1	24.1	18.4	11.2	6	3.9
L/B = 2	5.2	10.	17.4	23.5	25.9	26.8	27	25.4	20.6	12.3	6.3	4.1
L/B = 3	5.3	10.2	17.9	24.1	26.2	27.1	27.3	25.8	21.4	12.6	6.4	4.2

Таблица 2

Удельная энергия (МДж/м²) при вертикальном прозрачном ограждении

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\rho_r = 0$	8.4	11.2	12.7	11.3	8.6	7.1	7.7	10.2	12.5	12	9.3	7.5
L/B = 1	10.8	15.6	19.6	17.2	11.6	8.4	9.7	14.4	18.6	17.4	12.1	9.3
L/B = 2	10.8	15.8	20.4	18.3	12.7	9.8	11.1	15.6	19.8	17.6	12.2	9.4
L/B = 3	10.8	15.8	20.6	18.9	13.6	10.8	12	16.7	21.2	17.6	12.2	9.4

В таблицах 3 и 4 приведены значения эффективности применения рефлекторов для случаев горизонтального и вертикального расположения прозрачного ограждения гелиоустановки при использовании в качестве критерия увеличение суточного значения энергии солнечного излучения.

Таблица 3

Эффективность применения рефлекторов для случаев горизонтального расположения прозрачного ограждения

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L/B=1	1.58	1.57	1.5	1.34	1.23	1.17	1.19	1.29	1.42	1.51	1.62	1.67
L/B=3	1.77	1.73	1.67	1.47	1.27	1.19	1.22	1.37	1.64	1.7	1.73	1.75

Таблица 4

Эффективность применения рефлекторов для случаев вертикального расположения прозрачного ограждения

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L/B=1	1.24	1.3	1.43	1.52	1.57	1.59	1.59	1.55	1.5	1.35	1.24	1.2
L/B=3	1.27	1.37	1.57	1.68	1.7	1.7	1.71	1.69	1.67	1.43	1.29	1.24

Из данных этих таблиц видно, что ориентация прозрачного ограждения и соответственно рефлекторов заметно и по-разному в течение года влияет на эффективность ИХ применения в гелиоустановках. Естественно, что оценку эффективности рефлекторов применения следует производить ПО суммарному

поступлению солнечной энергии на прозрачные ограждения в течение заданного интервала времени.

Можно также отметить, что отношение сторон вышеуказанных элементов сравнительно слабо отражается на эффективности применения рефлекторов, если в основе лежит оценка дневной энергии. Это обусловлено тем, что доля дневной энергии, падающей на прозрачные ограждения при больших углах азимута Солнца($a > \pi/3$), существенно меньше, чем для интервала малых значений этой величины.

Заключение

Предложены методические основы расчёта эффективности применения плоских зеркально отражающих рефлекторов путём определения результирующей плотности потока энергии, поступающей на прозрачное ограждение гелиоустановок в виде прямого солнечного излучения. Разработанная программа позволяет рассчитывать эффективность применения плоских рефлекторов для различных азимутальных углов ориентации системы. Дальнейшая наша работа направлена на решение задачи оценки эффективности применения рефлекторов при произвольной ориентацией по углам наклонов элементов системы, а также исследовании их влияния на КПД гелиоустановок, в том числе – эффекта экранирования рефлекторами рассеянной радиации солнечного излучения.

Литература

1. Duffie J.F., Beckman W.A. Solar engineering of Thermal Processes. Second Edition. N-W., 1991. John Willy & Sons.

2.Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд.4. М. Энергоиздат. 1981. 417с.

3. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М.: Энергоатомиздат, 1991.

<u>Ермуратский Владимир Васильевич</u> - доктор-хабилитат технических наук, заведующий лабораторией нетрадиционных источников энергии Института энергетики АНМ.

Научные интересы связаны с исследованиями в области возобновляемых источников энергии и энергосбережения. Занимается разработкой и исследованиями низкотемпературных солнечных тепловых установок и устройств на их основе. <u>ermuratskie@gmail.com</u>

<u>Ермуратский Василий Владимирович</u>-инженер лаборатории управляемого электропривода Института энергетики АН РМ. Научные интересы связаны с разработкой методов и программ моделирования процессов в технических устройствах и системах.

<u>Ермуратский Пётр Васильевич</u> - доктор-хабилитат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, электроники, микропроцессорной техники им. А.В.Нетушила, Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова. Научные интересы связаны с исследованиями в области планирования экспериментов и моделирования процессов в нелинейных электрических цепях.

ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ ПРИ СОГЛАСОВАННЫХ, ПРЕДЕЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

Римский В.К., Берзан В. П., Пацюк В.И., Карчева Н.Ф., Андрос И.В.

Институт энергетики Академии наук Молдовы www.ie.asm.md; e-mail: vrimschi@rambler.ru; berzan@cc.acad.md

Аннотация. Приведены точные формулы для расчета предельных значений передаваемой мощности и КПД линий переменного напряжения с активной нагрузкой на приемном конце. Определены критические сопротивления и потери мощности в зависимости от длины ВЛ класса напряжения 500...750 кВ. Исследованы аварийные режимы в нагруженной электропередаче.

Ключевые слова: телеграфные уравнения, активная мощность, коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности (КМ), критические сопротивления.

PIERDERILE DE PUTERE ACTIVĂ ÎN LINIILE LUNGI ÎN REGIMURILE RACORDATE, DE LIMITĂ ȘI DE AVARIE

Rimschi V.X., Berzan V.P., Pațiuc V.I., Carceva N.F., Andros I.V

Rezumat. Sunt obținute formule precise pentru calcularea valorilor de limită a puterii active transmise și a randamentului liniilor de curent alternative în regim de alimentare a sarcinii cu caracter activ (rezistiv). Sunt determinate valorile critice și pierderile de putere activă în funcție de lungimea liniei electrice aeriene cu tensiunea de 500 kV și 750 kV. S-au studiat regimurile de avarie în linia aflată sub sarcină.

Cuvinte-cheie: Ecuațiile telegrafiștilor, puterea activă, randamentul, coeficientul de putere, rezistențe critice

ACTIVE POWER LOSSES IN LONG LINES DURING COORDINATED, LIMITING AND MALFUNCTION BEHAVIOR

Rimschi V.X., Berzan V.P., Patsiuk V.I., Karcheva N.F., Andros I.V

Abstract. Exact formulas for calculation of limiting values of transmitted capacity and efficiency of lines of a variable voltage with active loading on the reception end are resulted. Critical resistance and losses of capacity are determined depending on length Air-lines of an electricity transmission of a class of a voltage 500 ... 750 kV. Emergency operation in the loaded electricity transmission is investigated.

Key words: cable equations, active capacity, efficiency, factor capacities, critical resistance.

Введение

Главными факторами, определяющими потери мощности при ее транспортировке переменным или постоянным током, являются активное продольное сопротивление R(x,t), поперечная проводимость изоляции G(x,t), длина и режим работы линии. При заданной мощности на входе линии потери энергии могут только увеличиваться если учитывать, к примеру, взаимовлияние проводов, наличие реактивных элементов в линии и нагрузке, частые включения—отключения потребителей и источников энергии, влияние внешних электромагнитных и температурных полей, параллельную работу нескольких генераторов на общие нагрузки и т.д. [1–6].

Поиск литературы не обнаружил источников, содержащих строгое обоснование методики расчета передаваемой мощности и коэффициента полезного действия (КПД) даже для самых простых нагрузочных режимов работы линии с переменными во времени параметрами. Почему-то оказались не решенными и задачи определения параметров активно-реактивной нагрузки, представленной в виде одной *RLC* – цепочки, при которых генерируемая и передаваемая мощность, КПД и коэффициенты мощности (КМ) достигают предельных значений. На наш взгляд для строгого решения этих задач необходимо, как минимум проинтегрировать телеграфные уравнения (законы Г. Кирхгофа для линейных электрических цепей) при заданных граничных

условиях и самом широком варьировании исходных значений распределенных и сосредоточенных постоянных.

Эта публикация открывает цикл статей, в которых с позиций математической физики будут рассмотрены различные варианты расчета потерь и увеличения передаваемой активной мощности с помощью продольной (поперечной) компенсации параметров нагрузки и линий, отдельные отрезки которых могут работать в различных (экстремальных) климатических условиях.

1. Определяющие уравнения и безразмерные величины

Распространение волн потенциала и тока по электрической цепи с распределенными параметрами описывается хорошо известными телеграфными уравнениями [7–9]:

$$L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0, \quad (1.1)$$

которые следует дополнить граничными и начальными условиями.

Пусть электрическая цепь (см. рис.1.1) присоединяется в начальный момент времени t = 0 к внешнему источнику напряжения

$$u = U_0(t)$$
 при $x = 0$,

а ее конец замкнут на *RLC* – нагрузку:



Рис 1.1. Линия переменного напряжения с *RLC*-нагрузкой на конце.

Очевидно, что при $R_s = L_s = 0$, $C_s = \infty$ получаем режим короткого замыкания: u = 0, а условие $R_s = \infty$ соответствует холостому ходу линии: i=0 (нагрузка отключена). Как известно, подобные вырожденные нагрузки (XX или K3) на практике встречаются сравнительно редко, однако их изучение представляет несомненный интерес как исходная ступень при переходе к реальным (невырожденным) нагрузочным режимам.

При решении начально-краевых задач целесообразно использовать безразмерные (нормированные) величины, переход к которым осуществляется по следующим формулам, причем начальные условия, как правило, полагаются нулевыми (электрический заряд в линии отсутствует):

$$u = \frac{u^{\circ}}{U^{\circ}}; \quad i = \frac{i^{\circ}Z_{B}^{\circ}}{U^{\circ}}; \quad t = \frac{t^{\circ}}{\Delta^{\circ}}; \quad x = \frac{x^{\circ}}{\lambda^{\circ}};$$

$$R = \frac{R^{\circ}\lambda^{\circ}}{Z_{B}^{\circ}}; \quad G = G^{\circ}\lambda^{\circ}Z_{B}^{\circ}; \quad Z_{B}^{\circ} = \sqrt{L^{\circ}/C^{\circ}};$$

$$R_{S} = \frac{R_{S}^{\circ}}{Z_{B}^{\circ}}; \quad L_{S} = \frac{L_{S}^{\circ}}{L^{\circ}\lambda^{\circ}}; \quad C_{S} = \frac{C_{S}^{\circ}}{C^{\circ}\lambda^{\circ}}.$$
(1.2)

В (1.2) приняты обозначения: U – некоторое номинальное напряжение; Z_B – волновое сопротивление идеальной линии; λ – длина волны на частоте источника электропитания цепи; Δ – время пробега волны по длине линии, равной λ : $\Delta = \lambda/a$; a – скорость распространения электромагнитных возмущений вдоль линии; значок градуса присутствует у размерных величин.

При синусоидальном напряжении $u = U_0 \sin(2\pi ft)$ номинальное значение мощности определяем из соотношения $P = \frac{U_0^2}{2Z_B}$ в размерном или $P = \frac{1}{2}$ в безразмерном виде. При постоянном напряжении на входе линии: $u = const = U_0$ получаем $P = \frac{U_0^2}{Z_B}$ или P = 1.

Для вторичных параметров длинной линии при синусоидальном напряжении (токе) и уравнений установившегося режима (УУР) в гиперболических функциях будем использовать следующие обозначения:

$$Z_{0} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}; \quad \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)};$$

$$Z_{S} = R_{S} + j \left(\omega L_{S} - \frac{1}{\omega C_{S}} \right); \quad Z_{BX} = Z_{0} \frac{Z_{S} + Z_{0} \text{th}(\gamma l)}{Z_{0} + Z_{S} \text{th}(\gamma l)};$$

$$U_{0} = Z_{BX} I_{0}; \quad U_{1} = Z_{S} I_{1};$$

$$U_{1} = U_{0} \text{ch}(\gamma l) - Z_{0} I_{0} \text{sh}(\gamma l); \quad I_{1} = \frac{U_{0}}{Z_{0}} \text{sh}(\gamma l) + I_{0} \text{ch}(\gamma l);$$

$$P = U^{*} I = |U| |I| \cos \varphi - j |U| |I| \sin \varphi,$$
(1.3)

где: $\omega = 2 \pi f$ – круговая частота; Z_0 – волновое сопротивление длинной линии с потерями; γ – постоянная распространения; Z_S – нагрузочное комплексное сопротивление; Z_{BX} – комплексное входное сопротивление цепи с распределенными и сосредоточенными параметрами; P – комплексная мощность.

2. Расчет потерь в режиме бегущих и стоячих волн

Для расчета нестационарных (нормальных, аварийных) и установившихся (нормальных, послеаварийных, ремонтных) режимов используется метод характеристик или универсальная разностная схема «Альбатрос», построенная на множестве узлов с целыми и полуцелыми индексами [10,11]:

$$(L+\tau\alpha)\frac{i^{n-1/2}-i_{n-1/2}}{\tau}+\frac{u^{n+1}-u^{n}}{h}+Ri_{n-1/2}=0;$$
$$(C+\tau\beta)\frac{u^{n-1/2}-u_{n-1/2}}{\tau}+\frac{i^{n+1}-i^{n}}{h}+Gu_{n-1/2}=0,$$

где

$$i^{n} = [i_{n-1/2} + i_{n+1/2} + aC(u_{n-1/2} - u_{n+1/2})]/2;$$
$$u^{n} = [u_{n-1/2} + u_{n+1/2} + aL(i_{n-1/2} - i_{n+1/2})]/2;$$
$$\alpha = \frac{R}{2} + \frac{GL}{C}; \quad \beta = \frac{G}{2} + \frac{RC}{L}; \quad \tau = h/a.$$

Схема обладает нулевой разностной диссипацией и минимальной дисперсией. Многочисленные сопоставления с аналитическими решениями показали, что точность численных расчетов составляет не менее трех значащих цифр даже в окрестности фронтов волн (сильных разрывов). Баланс энергии на разностном уровне соблюдается абсолютно точно независимо от шага сетки.

Рассмотрим для определенности один провод (фазу) ВЛ 500 кВ Волгоград – Балашов –Липецк – Арзамас – Шагол с общей длиной l = 2858 км и параметрами: L = 0.9 мГн/км; C = 13 нФ/км; R = 22 мОм/км, G = 62 нСм/км; $\lambda = 5856 \text{ км}$; a = 292803 км/c; $\Delta = 1/f = 0.02 \text{ с}$; $Z_B = 263.5 \text{ Ом}$; $Z_0 = 263.37 - j8.23 \text{ Ом}$; $\lambda L = 5.27 \text{ Гн}$; $\lambda C = 76.13 \text{ мкФ}$. Если воспользоваться формулами (1.2), то в безразмерном виде имеем l = 0.488; $U_0 = f = L = C = Z_B = \lambda = a = \Delta = 1$; R = 5G = 0.48.

В таблице 2.1 приведены потери мощности при работе линии на чисто активную нагрузку, равную волновому сопротивлению идеальной линии: $Z_s = R_s = Z_B$. При такой нагрузке имеет место квазиустановившийся волновой процесс, близкий к режиму бегущих волн и значение КПД полуволновой линии является максимально возможным. Заметим, что даже при работе линии на комплексную согласованную нагрузку $Z_s = Z_0$ в режиме бегущих волн (натуральной мощности), потери оказываются немного выше.

Как видно из представленных результатов для линии переменного напряжения длиной l = 2858 км потери составляют 24.48%, что на 1.64% больше таковых, приведенных в [12]. Как известно в эксперименте 1968 г. по передаче 985 МВт мощности потери в полуволновой трехфазной линии 500 кВ составили 225 МВт (22.84%). Если пренебречь утечкой тока через изоляцию: G = 0, то потери снижаются до 20.85%. Полное совпадение расчетных и экспериментальных данных можно достичь, если задать G = 32 нСм/км. Однако такое сопоставление вряд ли является правомочным, поскольку здесь не учитывается взаимовлияние проводов и в эксперименте 1968 г. полуволновая ВЛ 500 кВ явно работала в режиме смешанных, а не бегущих волн. На это обстоятельство указывает и амплитуда тока в начале линии, равняя 1.07 кА при напряжении 525 кВ. В режиме смешанных волн можно добиться увеличения передаваемой мощности, но относительные потери при этом тоже возрастут.

Обратимся к другому источнику, где рассматриваются потери в полуволновой линии переменного и постоянного напряжения [13]. Чтобы получить для рассматриваемой линии 750 кВ Сургут – Чернобыль (3000 км) потери мощности порядка 13%, как это утверждается в [13], то, как минимум должно выполняться неравенство $R \le 12$ мОм/км. При нарушении этого условия потери всегда будут больше чем 13%.

Для сравнения в последнем столбце таблицы 2.1 указаны потери мощности при ее передаче постоянным током. Как видим потери здесь всегда ниже, чем при переменном токе. Лишь для неискажающих линий, когда RC = GL, в которых имеет место только диссипация волн и полностью отсутствует их дисперсия, эти результаты совпадают. Но в сильноточных электрических цепях, как правило, RC > GL и поэтому отличия между КПД линии переменного и постоянного напряжения могут достигать нескольких процентов.

Таблица 2.1.

Потери мощности для различных значений отрезков длин линии l, продольного активного сопротивления R и поперечной проводимости изоляции G при $Z_s = Z_R$.

l	<i>R</i> , мОм/км	<i>G</i> , нСм/км	$\Delta P, \%$	ΔΠ, %
0.0516 λ	22	62	2.91	2.91
302 км	22	0	2.42	2.42
0.0949 λ	22	62	5.27	5.26
556 км	22	0	4.37	4.36
0.2684 λ	22	62	14.18	13.91
1572 км	22	0	11.85	11.41
0.4880 λ	22	62	24.48	23.38
2858 км	22	0	20.85	18.98
0.5123 λ 3000 км	22 22 12 12 22	62 0 0 175 311	25.53 21.77 12.91 24.17 38.85	24.34 19.74 12.15 24.17 38.85

На рис. 2.1 показано изменение средних (безразмерных) значений генерируемой и передаваемой мощности (кривые 1;2), КПД (3), КМ ($\cos \varphi$) источника и приемника (4;5) в зависимости от длины линии *x* при $Z_s = Z_0(a)$; $Z_B(b)$; R = 0.48, G=R/5. Как видно из графиков с увеличением длины линии передаваемая мощность и КПД монотонно убывают, а генерируемая мощность остается практически неизменной, испытывая лишь незначительные (в пределах 1...3 %) флуктуации при $Z_s = Z_B$.



Рис. 2.1. Зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от длины линии x при $Z_S = Z_0(a)$; $Z_B(b)$; R = 0.48; G = R/5.

На рис. 2.2. представлена зависимость исследуемых величин от длины линии *x* при $Z_s = Z_B + j\omega L_S(a)$; $Z_B - j/(\omega C_S)(b)$; $L_S = 1/8$ (0.66 Гн); $C_S = 1/5$ (15.23 мкФ); R = 0.48; G = R/5. Наличие реактивных элементов в нагрузочном сопротивлении приводит к резкому изменению входного сопротивления цепи и как следствие все величины, характеризующие процесс передачи мощности переменным током испытывают колебания на десятки процентов. Для полуволновой линии передаваемая мощность и КПД являются максимальными, когда нагрузка на ее приемном конце чисто активная.



Рис. 2.2. Зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от длины линии *x* при $Z_S = Z_B + j\omega L_S(\mathbf{a})$; $Z_B - j/(\omega C_S)(\mathbf{b})$; $L_S = 1/8$; $C_S = 1/5$; R = 0.48; G = R/5.

Рис. 2.3 отражает зависимость средней мощности генератора от длины линии при z = 1 ($R_s = \infty$); -1 ($R_s = 0$); R = 0.48 (*a*); R = 4.8 (*b*); G = R/5. В отличие от линии постоянного напряжения, где мощность генератора на холостом ходу всегда меньше, чем при коротком замыкании, здесь имеем по 4 точки пересечения этих кривых на каждом отрезке длины линии, равном λ . Координаты этих точек по длине линии

следующие: $l_1 = 0.1481; l_2 = 0.3809; l_3 = 0.6211; l_4 = 0.8619; l_5 = 1.1027; l_6 = 1.3434;$ $l_7 = 1.5842; l_8 = 1.825$

Для любой неискажающей линии: RC = GL мощности генераторов при XX и K3 совпадают в точках $x = \lambda/8$, $3\lambda/8$, $5\lambda/8$ и т.д. Если же RC > GL, то вследствие дифракции волн эти кривые несколько смещаются вправо: $x = 0.15\lambda$, 0.386λ , 0.63λ Таким образом, отсюда вытекает, что максимальный отбор мощности от линии переменного напряжения на участке: $0.15\lambda \le x \le 0.386\lambda$ возможен в режиме, близком к XX, а на участках: $0 < x \le 0.15\lambda$ и $0.386\lambda \le x \le 0.63\lambda$ в режиме, близком к K3. Такая ситуация повторяется через каждые отрезки длины линии, равные примерно $\lambda/4$.



Рис. 2.3. Зависимость от длины линии *x* мощности генератора *P* в режиме XX (1) и K3 (2) при R = 0.48 (*a*); R = 4.8 (*b*); G = R/5.

3. Максимальная передаваемая мощность, КПД и КМ

Для постоянного напряжения на входе линии с ненулевым погонным сопротивлением (R > 0) и идеальной изоляцией (G = 0) максимальная потребляемая мощность достигается при выполнении условия $R_s = R l$, т.е. когда активное сопротивление нагрузки равно полному сопротивлению всей линии (теорема Ленца–Ботто, 1844г.). В этом случае КПД линии не зависит от ее длины и равен 0.5. Для переменного напряжения это не так даже для сравнительно коротких линий: $l \sim \lambda/16$.

В [10, 11] были получены замкнутые формулы для точного определения средних установившихся значений передаваемой мощности и КПД при работе линии переменного напряжения на чисто активную нагрузку с сопротивлением $R_s \ge 0$:

$$P_{1} = \frac{U_{0}^{2}(\alpha^{2} + \beta^{2})}{Z_{B}} \frac{1 - z^{2}}{I_{z}}, \ \eta = \frac{2(\alpha^{2} + \beta^{2})(1 - z^{2})}{I_{r,0}}$$

где

$$I_{z} = (1+z)^{2} (\gamma_{R}\gamma_{G} + \omega^{2}) t_{\gamma} (ch2\alpha\Delta + cos2\beta\Delta) + (1-z)^{2} (\gamma_{R}^{2} + \omega^{2}) (ch2\alpha\Delta - cos2\beta\Delta) + (2(1-z^{2})[(\gamma_{R}\alpha + \omega\beta)sh2\alpha\Delta + (\gamma_{R}\beta - \omega\alpha)sin2\beta\Delta)]$$

$$\begin{split} I_{r,0} &= \left[(1+z)^2 (\gamma_G \alpha + \omega \beta) + (1-z)^2 (\gamma_R \alpha + \omega \beta) \right] \mathrm{sh} 2\alpha \Delta + \\ &+ \left[(1+z)^2 (\gamma_G \beta - \omega \alpha) + (1-z)^2 (\gamma_R \beta - \omega \alpha) \right] \mathrm{sin} 2\beta \Delta + \\ &+ (1-z^2) (\gamma_R \gamma_G + \omega^2) \left[(1+t_\gamma) \mathrm{ch} 2\alpha \Delta - (1-t_\gamma) \mathrm{cos} 2\beta \Delta) \right], \\ \gamma_R &= R/L, \ \gamma_G &= G/C, \ \Delta &= l/a, \ a &= 1/\sqrt{LC}, \ \omega &= 2\pi, \\ \alpha &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\gamma_R \gamma_G (t_\gamma + 1) + \omega^2 (t_\gamma - 1) \right]^{1/2}, \\ \beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\gamma_R \gamma_G (t_\gamma - 1) + \omega^2 (t_\gamma + 1) \right]^{1/2}, \\ \beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\gamma_R \gamma_G (t_\gamma - 1) + \omega^2 (t_\gamma + 1) \right]^{1/2}, \\ t_\gamma &= \sqrt{1 + \frac{\omega^2 (\gamma_R - \gamma_G)^2}{(\gamma_R \gamma_G + \omega^2)^2}}, \ z &= \frac{R_S - Z_B}{R_S + Z_B}. \end{split}$$

Поставим задачу определить значения сопротивления $R_s \ge 0$ на приемном конце линии синусоидального напряжения, при которых передаваемая мощность и КПД максимальны. Если исследовать на экстремум указанные функции, то для сопротивления R_s получим следующие выражения:

$$\begin{split} \max_{R_s} P_0 & \text{при } z_{0k} = \begin{cases} z^-, & \text{если } \left| z^- \right| \leq 1\\ 1, & \text{если } z^- > 1\\ -1, & \text{если } z^- < -1 \end{cases} \\ z^- &= \frac{-(a_{13} + a_{23}) - 2\sqrt{a_{13}a_{23} + a_{12}^2}}{a_{13} - a_{23} - 2a_{12}}, \\ a_{12} &= a_1b_2 - a_2b_1, a_{13} = a_1b_3 - a_3b_1, a_{23} = a_2b_3 - a_3b_2, \\ a_1 &= (\gamma_G \alpha + \omega\beta)\text{sh}2\alpha\Delta + (\gamma_G \beta - \omega\alpha)\text{sin}2\beta\Delta, \\ a_2 &= (\gamma_R \alpha + \omega\beta)\text{sh}2\alpha\Delta + (\gamma_R \beta - \omega\alpha)\text{sin}2\beta\Delta, \\ a_3 &= (\gamma_R \gamma_G + \omega^2) [(1 + t_\gamma)\text{ch}2\alpha\Delta - (1 - t_\gamma)\text{cos}2\beta\Delta], \\ b_1 &= (\alpha^2 + \beta^2)(\text{ch}2\alpha\Delta + \cos 2\beta\Delta), \\ b_2 &= (\gamma_R^2 + \omega^2)(\text{ch}2\alpha\Delta - \cos 2\beta\Delta), \end{split}$$

$$b_{3} = 2[(\gamma_{R}\alpha + \omega\beta)\operatorname{sh}2\alpha\Delta + (\gamma_{R}\beta - \omega\alpha)\sin 2\beta\Delta],$$

$$\max_{R_{s}} P_{1} \operatorname{при} z_{1k} = \left[-(1 + \tilde{t}_{\gamma}^{2})\operatorname{ch}2\alpha\Delta - (\tilde{t}_{\gamma}^{2} - 1)\operatorname{cos}2\beta\Delta + 2\tilde{t}_{\gamma}\sqrt{\operatorname{ch}^{2}2\alpha\Delta - \cos^{2}2\beta\Delta}\right] \cdot \left[(\tilde{t}_{\gamma}^{2} - 1)\operatorname{ch}2\alpha\Delta + (1 + \tilde{t}_{\gamma}^{2})\operatorname{cos}2\beta\Delta\right]^{-1},$$

$$\tilde{t}_{\gamma}^{2} = \frac{\alpha^{2} + \beta^{2}}{\gamma_{R}^{2} + \omega^{2}},$$

$$\max_{R_{s}} \eta \operatorname{прu} z_{\eta k} = \frac{-(a_{1} + a_{2}) + 2\sqrt{a_{1}a_{2}}}{a_{1} - a_{2}}.$$

На рис. 3.1 представлено изменение генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника (кривые 1-5) в зависимости от параметра z при l = 0.0516 (подстанция Балашов); R = 0.48(a); 4.8(b); G = R/5; $Z_s = R_s$. Эти графики наглядно иллюстрируют тот факт, что максимумы всех исследуемых здесь функций достигаются при различных значениях сопротивления нагрузки R_s . С увеличением потерь в линии наблюдается «разбегание» критических сопротивлений для генерируемой и передаваемой мощности, тогда как точки максимума для КПД и КМ остаются практически неподвижными. Таким образом, при вариации параметра R_s для любого отрезка длины линии можно получить полное представление о перетоках мощности, что позволяет выбрать оптимальный режим исходя из тех или иных критериев.



Рис. 3.1. Зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от сопротивления нагрузки R_s при l = 0.0516; R = 0.48(a); 4.8(b); G = R/5; $Z_s = R_s$, где $1 - P_1$; $2 - P_2$; $3 - \eta$; $4 - \cos\varphi_1$; $5 - \cos\varphi_2$

Рис. 3.2 иллюстрирует зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от параметра *z* при $Z_s = R_s - j/(\omega C_s)$; $C_s = 1$ (17.57мкФ). Здесь и в дальнейшем R = 0.48, G = R/5. Продольная компенсация параметров нагрузки для этой длины линии увеличивает максимальную передаваемую мощность, но уменьшает КПД и $\cos \varphi$.

На рис. 3.3 показана зависимость генерируемой и максимальной передаваемой мощности, КПД и критического сопротивления z_{1k} от длины линии (кривые 1–4).

Увеличению (уменьшению) передаваемой мощности по мере изменения длины линии всегда сопутствует уменьшение (увеличение) КПД. Для четвертьволновой линии максимум мощности имеет место в режиме, близком к XX ($R_s = 13.93 Z_B$), а для полуволновой линии в режиме, близком к K3 ($R_s = 0.14 Z_B$).



Рис. 3.2. Зависимость от сопротивления нагрузки R_s генерируемой (1) и передаваемой мощности (2), КПД (3) и КМ источника (4) и приемника (5) при l = 0.0516; R = 0.48; G = R/5; $Z_s = R_s - j/(\omega C_s)$; $C_s = 1$.



Зависимость генерируемой, передаваемой мощности, максимального КПД и критического сопротивления $z_{1\eta}$ от длины линии *x* отражает рис. 3.4. Здесь особенно заметно, что максимальному КПД, который ненамного выше, чем при работе линии на согласованную нагрузку, вовсе не соответствует максимум передаваемой мощности.



Рис. 3.4. Зависимость генерируемой (1), передаваемой (2) мощности, максимального КПД (3) и критического сопротивления $z_{\eta}(4)$ от длины линии x при R = 0.48; G = R/5.

4. Аварийные режимы в нагруженной электропередаче

Проведенная в [12] серия аварийных режимов в нагруженной полуволновой электропередаче показала относительно высокую устойчивость последней при динамических переходах. Внутренние перенапряжения на различных подстанциях не превосходили расчетного уровня изоляции ВЛ 500 кВ. Наибольшая зарегистрированная кратность перенапряжений в переходном процессе при КЗ длительностью 130...190 мс составила 1.75...1.95. Проверим, как эти экспериментальные данные согласуются с теоретическими расчетами на основе точных решений соответствующих краевых задач для телеграфных уравнений в динамической постановке.

Для большей наглядности и сравнительного анализа смоделируем две внезапные аварийные ситуации: ХХ (обрыв) и КЗ длительностью $\Delta t = 6.5$ (130 мс) на приемном конце линии в процессе ее работы на чисто активную нагрузку: $Z_s = R_s = Z_B$. Результаты расчетов показаны на рис. 4.1 в виде временных зависимостей напряжения (*a*) и потребляемой активной мощности (*b*) при ХХ и КЗ в точке подключения нагрузки на подстанции Шагол.



Рис. 4.1. Мгновенные напряжения (*a*) и мощность (*b*) при XX и КЗ в точке подключения нагрузки на подстанции Шагол (2858 км).

Как легко можно заметить из графиков, кратность перенапряжений на нагрузке равна 3, а броски амплитуд мгновенной мощности после выхода из режима K3 на порядок превышают таковые в установившемся нагрузочном режиме. Еще большие перенапряжения имеют место на подстанции Арзамас. Как видно из данных, представленных на рис. 4.2 за время K3 напряжение здесь становится почти в 6 раз выше номинального. Ситуация с перенапряжениями и бросками мощности радикально не меняется, если отбор мощности на подстанции Шагол уменьшить или увеличить, изменяя сопротивление нагрузки R_s .

В этих результатах нет ничего неожиданного, если вспомнить, что в короткозамкнутой полуволновой линии максимальные напряжения в установившемся режиме наблюдаются в середине линии и кратность перенапряжений равна 7. При этом время выхода на установившийся режим не превышает 400 мс при рассматриваемых здесь потерях в линии [11].



Исследуем аналогичные аварийные ситуации для линии, несколько превышающей по длине четвертьволновую разместив для этого такую же нагрузку на подстанции Арзамас. Уменьшение длины линии при прочих равных условиях приводит к тому, что перенапряжения и броски мощности наблюдаются уже не при КЗ, а при обрыве. Причем амплитуды скачков напряжения и мощности повысились до 8 и 16 «номиналов» соответственно (см. рис. 4.3). Таким образом, для четвертьволновых линий переход на режим XX практически невозможен, поскольку возникающие при этом перенапряжения даже превосходят таковые в короткозамкнутой полуволновой линии. Поэтому для четвертьволновых линий всегда применяются различные варианты компенсирующих устройств типа шунтирующих или управляемых реакторов трансформаторного типа в сочетании с продольной емкостной компенсацией индуктивного сопротивления линии [14].

Напрашивается теперь перемещение нагрузки в точку x = 3/8 с тем, чтобы определить какой из рассмотренных выше аварийных режимов является там наиболее опасным. Из временных диаграмм, изображенных на рис. 4.4 видно, что здесь только на стадии XX имеют место относительно небольшие перенапряжения кратностью 2.2, а броски мощности в отличие от предыдущих вариантов отсутствуют и вовсе в

послеаварийных режимах, вызванных разрывом линии или КЗ. Схожая картина наблюдается при укорачивании этой линии на четверть и более длины, т.е. для точек подключения нагрузки $x \le 1/8$.

Столь большие расхождения опытных и расчетных данных требуют тщательного анализа и дополнительных экспериментальных исследований. Возможно, моделирование XX или K3 посредством мгновенного задания нулевых значений для тока или напряжения в точке аварии не вполне соответствует действительности и спад этих значений до нуля происходит не внезапно, а более «плавно».



Рис. 4.3. Мгновенные напряжения (*a*) и мощность (*b*) при XX и K3 в точке подключения нагрузки на подстанции Арзамас (1572км).



точке *x* = 3/8 (2196 км).

В заключение приведем несколько примеров, существенно ограничивающих, на наш взгляд, область применения символического метода. В таблице 4.1 представлены ударные и установившиеся значения для амплитуд тока в начале линии при КЗ и ХХ. Используя УУР в гиперболических функциях (1.3) невозможно рассчитать переходной процесс, который всегда носит явно выраженный несинусоидальный характер. Однако, как видно из приведенных табличных данных, УУР дают неверные результаты и для установившихся вырожденных режимов в идеальных цепях. Такая же ситуация наблюдается и для чисто реактивных нагрузок, не содержащих активные (диссипативные) элементы.

И последнее замечание. Длительность нестационарных процессов пропорциональна длине линии и существенно увеличивается с уменьшением потерь в ней. Например, для рассмотренных здесь случаев время выхода на установившийся

режим достигает долей секунды, и это обстоятельство уже нельзя игнорировать как второстепенный фактор влияния. Также не следует забывать, что всякий установившийся процесс является следствием нестационарных явлений.

Таблица 4.1.

l	R_{s}	R	G	$\left I_{0}\right _{ya}$	$\left I_{0}\right _{\mathrm{yc}}$	$ I_0 _{\rm yyp}$
		0	0	4.93	4.93	2.41
1/16	0	0.48	0.48	4.43	2.41	2.41
		0.48	0.096	4.44	2.41	2.41
		0	0	4.18	4.18	2.41
3/16	œ	0.48	0.48	3.38	2.36	2.36
		0.48	0.096	3.92	2.40	2.40
		0	0	2.23	2.23	4
	0	0.48	0.48	2.03	1	1
1 /0		0.48	0.096	2.03	1	1
1/0		0	0	2.23	2.23	4
	∞	0.48	0.48	1.77	1	1
		0.48	0.096	1.85	1	1

Ударные и установившиеся значения амплитуд тока в начале линии синусоидального напряжения при КЗ и XX.

Заключение

- 1. На основе точных решений телеграфных уравнений получены замкнутые формулы для определения предельных значений передаваемой мощности, КПД и КМ источника переменного напряжения и приемника с чисто активной нагрузкой. Рассмотрены установившиеся режимы бегущих, стоячих и смешанных волн.
- Исследовано влияние различных факторов, какими являются параметры линии и нагрузки, диссипация и дисперсия волн на потери мощности. В рамках развитого и строго обоснованного подхода впервые удалось выявить ряд нелинейных зависимостей и получить полную картину о процессах передачи мощности по цепям переменного и постоянного тока.
- 3. Следует различать режимы работы линии при максимальной передаваемой мощности, КПД, КМ и максимальной отдаче энергии генератором синусоидального напряжения.
- 4. Рассмотрены аварийные ситуации в нагруженной электропередаче. Показано, что в полуволновой и четвертьволновой линии кратность перенапряжений при XX и K3 длительностью 130 мс доходит до 6...8.

Литература

- 1. *Ковалев Г.Ф., Лебедева П.М.* Планетарная электроэнергетическая система. Энергия, 2006, №9, с. 27-34.
- 2. *Черненко П.А., Волхонский А.С.* Оперативное определение потерь активной мощности (нагрузочных и на корону) в высоковольтных линиях. http://www.rql.kiev.ua/ted/sb2051.s11.html
- 3. Ольшванг М.В. Сферические векторные диаграммы развитых электрических сетей и их применение. Сборник научных трудов "ВЭИ 80 лет" под общей редакцией В.Д. Ковалева, т.1, М.: ВЭИ, 2001, С.90-106.
- 4. Ольшванг М.В. Особенности кросс-трансформаторной технологии транспортирования энергии по сетям 110-765 кВ. Электро, 2004, №2
- Добрусин Л.А., Ольшванг М.В. О совершенствовании техники управления маршрутами потоков активной мощности в сетях 110 - 765 кВ на основе специальных фазосдвигающих трансформаторов. Доклад на Всероссийском электротехническом конгрессе РАН и РАЭН "ВЭЛК 2005". Тезисы – в "Материалах конгресса" – М: РАЭН, 2005.
- 6. *Курбацкий В*.Г., Томин Н.В. Анализ потерь энергии в электрических сетях на базе современных алгоритмов искусственного интеллекта. Электричество, 2007, №4, с. 12 21.
- 7. *Круг К*.А. Переходные процессы в линейных электрических цепях. М. –Л.: ГЭИ, 1948. –344с
- 8. Хаяси С. Волны в линиях электропередачи. М. –Л.: ГЭИ, 1960. –343с.
- 9. Dragan G., Golovanov N., Mazzeti C. şi al. Tehnica tensiunilor înalte. Vol. II. București: Editura AGIR, 2001. –732p.
- 10. Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И. и др. Волновые явления в неоднородных линиях. Т.З. Передача мощности по цепям постоянного и переменного напряжения. Под ред. Постолатия В.М. –Кишинев: Типография АНМ, 2007. 328с.
- 11. *Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И. и др.* Как увеличить передаваемую мощность в десятки раз. Кишинев: Типография АНМ, 2007. 178с.
- 12. 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.
- 13. Зильберман С.М., Самородов Г.И. Возможные перспективы импорта электроэнергии в Республику Молдова из Тюменского региона. В кн.: Энергетика Молдовы 2005. Сборник докладов. Кишинев: Типография АНМ, 2005, с. 104–110.
- 14. Александров Г.Н., Ле Тхань Бак. Уменьшение потерь мощности в дальних линиях электропередачи с управляемыми реакторами. Электричество, 2007, №3, с. 8-15.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ И ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ЭНЕРГОСЕКТОРЕ МОЛДОВЫ С ПОЗИЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Быкова Е.В., Институт энергетики АН Молдовы elena-bicova@rambler.ru

Аннотация. В статье выполнен анализ динамики индикаторов блока топливоснабжения системы индикаторов энергетической безопасности. Также приведены результаты расчетов выбросов диоксида углерода для блока экологического блока системы индикаторов энергетической безопасности.

Ключевые слова. Энергетическая безопасность, индикатор, топливоснабжение, эмиссии.

ANALIZA STRUCTURII CONSUMULUI COMBUSTIBILULUI ȘI EVACUĂRILOR BIOXIDULUI DE CARBON ÎN SECTORUL ENERGETIC AL REPUBLICII MOLDOVA DIN PUNCT DE VEDERE AL SECURITĂȚII ENERGETICE

Bîcova E.

Rezumat: În lucrarea este efectuată analiza dinamicii indicatorilor blocului de consum a combustibilului al sistemului de indicatori a securității energetice. Deasemenea sunt prezentate rezultatele calculului indicatorilor emisiilor de bioxid de carbon pentru blocul ecologic al sistemului de indicatori a securității energetice.

Cuvinte cheie. Securitatea energetică, indicator, furnizare, combustibil, emisiile de bioxid de carbon.

THE ANALYSIS OF FUEL CONSUMPTION STRUCTURE AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS BY VIEW OF ENERGY SECURITY IN ENERGETICS OF THE REPUBLIC OF MOLDOVA

Bikova E.V.

Summary. It is presented the analysis of dynamics of the change of indicators of fuel supply block of energy security system. Calculations results of carbon dioxide emissions in energy security indicators system ecological block are presented as well.

Keywords. Energy security, indicator, fuel consumption, carbon dioxide emissions

Введение

Исследования вопросов энергетической безопасности проводятся в Республике Молдова в течение нескольких последних лет на основе индикативного анализа [1]. Для мониторинга состояния энергетической безопасности сформирована расширенная система индикаторов, которая разделена на 10 блоков [2], в том числе: топливоснабжения (1), производства энергии передачи И распределения электроэнергии(3), импорта электроэнергии (4). (2),экологического(5), потребителей(6), экономического (7), инвестиций(8), прогнозирования (9), социологического в энергетике (10). Каждый из перечисленных блоков содержит наиболее представительные и отражающие ситуацию индикаторы соответствующей направленности. Работа по сбору, обработке и систематизации исходных данных для расширенной системы индикаторов и расчету их значений за период 1990-2006 гг. в настоящее время проводится одновременно с разработкой вычислительной модели по мониторингу индикаторов энергетической безопасности и анализу состояния ТЭК в целом с позиций энергетической безопасности.

Целью данной работы является анализ индикаторов блока №1- топливоснабжения и индикаторов блока №5- экологического. Блок топливоснабжения фактически является ключевым, так как Республика Молдова практически не имеет собственных ископаемых топлив и импортирует все необходимые виды топлива. Рассмотрим подробнее каждый из блоков.

Блок топливоснабжения

Блок топливоснабжения включает 6 индикаторов, отражающих обеспеченность, гибкость и заменяемость в структуре топливных ресурсов и энергоэффективность использования топлива. В данный блок входят следующие индикаторы: потребление топлива в целом,

потребление для производства электрической и тепловой энергии, потребление в коммунально-бытовом секторе, доля доминирующего вида топлива в общей структуре топлива, удельные расходы топлива на выработку электрической и тепловой энергии (тепловой энергии - в централизованном теплоснабжении). Для данных индикаторов выполнен сбор, подготовка и систематизация исходных данных в ретроспективном периоде 1990-2006 гг. Источниками данных являются официально опубликованные ТЭБ, Статистические ежегодники и другие издания Национального Бюро Статистики Молдовы. Рассмотрим подробнее индикаторы общего потребления топлива, потребления топлива для производства электрической и тепловой энергии, использования топлива в коммунально-бытовом секторе и индикатор доли доминирующего вида топлива в общей структуре топлива.

Динамика изменения индикаторов данного блока топливоснабжения.

1) Динамика изменения индикаторов потребления топлива в целом и доли доминирующего вида топлива приведена на рис.1. Как видно из приведенных данных суммарное потребление топлива всех видов снизилось с 15 млн. тут (1990) до 2,7 млн. тут (2006) или более чем в 5 раз. Структура потребляемого топлива также значительно изменилась. Так, потребление бензина и дизельного топлива, несмотря на рост количества автомашин, снизилось в 3 раза, потребление мазута уменьшилось более чем в 10 раз, угля - в 20 раз, природного газа - в 2,9 раза. В долевом соотношении к концу 2006 бензин составлял около10%, дизельное топливо - 20%, уголь – 5 %. Доминирующим видом топлива является природный газ, доля которго возросла с 30 % (1990) до 55 % (2006) в суммарном потреблении топлива.



Наибольшее снижение потребления произошло по мазуту и углю, эти виды топлива оказались замененными природным газом (в 1990 г. доля угля в общей структуре топлива составляла около 30 %, мазута – 20 %). Такое изменение структуры потребляемого топлива является угрозой энергетической безопасности, особенно если принять во внимание отсутствие диверсифицированности в поставках доминирующего вида топлива.

Структура потребления топлива по видам (твердое, жидкое, газообразное), иллюстрируется графиками на рис. 1, показывает снижение использования твердых видов топлива и рост использования газообразных видов топлива. Наметилась тенденция роста потребления биотоплива. Для Молдовы - это, в основном, древесина, древесные и сельскохозяйственные остатки (заметим, что леса занимают всего 8 % территории страны). И рост потребления биотоплива за исследуемый период в 1,5 раза скорее связан с недоступностью приобретения населением в энергетических целях других видов топлива, например, угля, в связи с ростом цены на него.

2). Динамика изменения индикатора потребления топлива для производства электрической и тепловой энергии и индикатора потребления топлива в коммунально-бытовом секторе приведена на рис. 2. Потребление топлива для производства электрической и тепловой энергии снизилось более чем в 9 раз для Молдовы в целом. Это связано с сокращением производства электроэнергии на МГРЭС - самом крупном источнике электроэнергии Молдовы, на которой в последние годы работает только1-2 блока вместо ранее работавших 6-8 блоков. В Правобережье весь период все имеющиеся ТЭЦ работают, хотя не всегда максимально загружены.

В долевом соотношении доля угля и мазута для целей выработки электроэнергии снизилась практически до 0%, в то время как доля природного газа в производстве энергии составляет более 90% (для Правобережья).

Индикатор потребления топлива в коммунально-бытовом секторе показывает некоторый рост за последние 6 лет в основном за счет увеличения использования природного газа (до 70% в 2006 г). Снижение потребления угля населением произошло более чем в 2 раза (с 257 тыс. тонн в 1994 г до 93 тыс. тонн в 2006). В Правобережье уголь в некоторой мере замещен древесиной (рост более чем в 2 раза) и природным газом (рост с 217 млн. куб м. (1994) до 375 млн. куб.м. (2006)).



Рис.2. Динамика изменения индикатора потребления топлива для производства электрической и тепловой энергии и индикатора потребления топлива в коммунальнобытовом секторе за период 1990-2006 гг. в РМ.

Снижение доли потребления угля в энергетических целях населением (в основном, это сельские жители) фактически означает снижение уровня жизни населения, которое затрачивает свое время и финансовые средства на заготовку и приобретение древесины, древесных и сельскохозяйственных остатков, которые к тому же имеют более низкую теплотворную способность, чем уголь. Ряд населенных пунктов на данный момент пока не имеет природного газа. Имеется Программа газификации населенных пунктов, однако темпы прокладки газопроводов и подключения их к сети недостаточны, чтобы можно было говорить об отсутствии угроз энергетической безопасности, особенно если учитывать ее социальную составляющую.

Экологический блок включает два индикатора, отражающих величины выбросов СО₂ на единицу сожженного топлива и в расчете на 1 жителя. Выбросы СО₂ в РМ составляют 99% (в СО2-эквиваленте) общих выбросов газов с прямым парниковым эффектом (СО2, CH4, N2O). Расчеты выбросов газов с косвенным парниковым эффектом (Nox, CO, NMVOC, SO₂) производятся в разделе «экологическая безопасность», выделенном в отдельное направление из расширенной системы индикаторов энергетической безопасности (в данной работе они не рассматриваются ввиду малых значений по сравнению с выбросами СО₂).

Для расчета эмиссий CO₂ использована методология МГЭИК (IPCC), которая используется во многих странах при подготовке Национальных Сообщений по инвентаризации парниковых газов. Эмиссии рассчитываются на основе данных по потреблению различных видов топлива и коэффициентов выбросов, принимаемых либо с учетом местных данных (национальных), либо по умолчанию согласно [3].

Для расчетов выбросов CO₂ в PM использованы данные по потреблению топлива согласно ТЭБ НБС (для Правобережья), приведенные и систематизированные в блоке №1, и коэффициентов выбросов по умолчанию. Для Левобережья (ЛБ) полных официальных данных по потреблению различных видов топлива на данный момент не имеется, за исключением потребления в сельскохозяйственной отрасли для нескольких видов топлива [4]. Для ЛБ приняты расчетные данные, которые получены косвенным путем по величине произведенной электроэнергии на МГРЭС (ввиду того, что в энергетическом секторе ЛБ на данном источнике потребляется наибольшее количество топлива). В дальнейшем, при наличии более точных официальных сведений по количеству потребленного топлива, эти величины могут быть уточнены. Результаты расчетов выбросов СО₂ приведены в таблицах 1и 2.

Таблица 1.

Выбросы CO ₂ , ра	ссчитанные по методологии	МГЭИК-96,	по данным	ГЭБ (Правобережь	.e),
	Гигаграм	IM (ΓΓ)***			

	1990	1991*	1992*	1993	1994**	1995	1996
СО ₂ ,Гг	32864,47	25485,53	19494,82	15593,76	6517,05	6009,07	6182,18

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
СО ₂ ,Гг	5932,00	5096,73	3915,45	3322,27	3618,36	3959,46	4428,17	4619,85

*)принято по данным Первого национального сообщения по инвентаризации парниковых газов в Молдове, в эти годы ТЭБ не составлялся.

**) с 1994 и в последующие годы СО₂ подсчитано по потреблению топлива только для Правобережья ввилу того, что ТЭБ составлен также.

***) 1 Гигаграмм=1*10E+9 грамм=1 тыс. тонн

	2005	2006			
СО ₂ ,Гг	4007,50	4901,08			

Таблица 2.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
СО ₂ (по данным ТЭБ)-ПБ	В эти	годы	потребле	ние на	6517,02	5987,23	6182,18	5932,0
CO_2 (ТЭБ+МГРЭС)-	МГРЭС	учитын	валось в	общей	13143,63	10225,94	10484,75	8719,63
Молдова	сумме							
Отдельно МГРЭС-ЛБ					6626,61	4238,71	4302,57	2787,63
Oldesibile will to e sib					0020,01	1230,71	1502,57	2101,05

Выбросы СО₂ с учетом МГРЭС (Левобережья), Гг.

Продолжение 1 таблицы 2

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
СО ₂ (по данным ТЭБ)	5096,73	3912,33	3322,31	3618,36	3959,46	4428,17	4619,85	4007,85
СО ₂ (ТЭБ+МГРЭС)*	7228,89	5504,32	4776,71	5604,62	5697,74	6074,17	6324,15	6599,98
Отдельно МГРЭС-ЛБ	2132,16	1591,99	1454,4	1986,26	1738,28	1646,0	1704,3	1592,48

*)Величины выбросов на МГРЭС для 1999-2006 гг. рассчитаны, исходя из величины удельного потребления топлива на выработку 1 кВтч электроэнергии, величины выработки в год и предположения, что основным видом топлива в настоящее время является природный газ.

Продолжение 2 таблицы 2

	2006	2007			
СО ₂ (по данным ТЭБ)-ПБ	4901,08				
СО2 (МГРЭС)-ЛБ	813,99				
СО2-Молдова	5715,07				

Как видно из анализа данных таблиц, уменьшение эмиссий произошло для Правобережья более чем в 5 раз, для Молдовы в целом – более чем в 4 раза. Для индикаторов данного блока кризисным пороговым значением является величина, составляющая 50% от уровня 1990 г по Молдове в целом - или 16432 Гг. Фактические величины выбросов значительно меньше кризисной границы и индикаторы находятся в зоне нормального состояния.

Заключение.

А. Проведенный анализ индикаторов блока топливоснабжения расширенной системы индикаторов показывает наличие угроз энергетической безопасности в данном блоке в связи:

1) с резким снижением объемов потребляемого топлива для выработки электрической и тепловой энергии и в коммунально-бытовом секторе, и ухудшением в связи с этим уровня жизни населения;

2) с изменением структуры потребляемых видов топлива в сторону преобладания одного вида - природного газа и недопустимо малой доли потребления других видов – мазута и угля, в связи с чем от поставок природного газа зависит не только уровень жизни населения, но и социальная стабильность в стране; договоренности в газовой сфере становятся предметом политических аргументов, что не способствует не только энергетической безопасности, но и национальной безопасности государства.

3) В качестве основного мероприятия по улучшению группы описанных индикаторов может служить диверсификация потребляемых топлива с целью выравнивания структуры видов используемых топлив, как для производства энергии, так и для потребления напрямую населением.

В. По экологическому блоку состояние индикаторов находится в норме и на данный момент не имеется угроз энергетической безопасности, исходящих от данного блока.
Литература

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

2. Быкова Е.В. Методы расчета и анализ показателей энергетической безопасности. Монография. Кишинев, Типография АН РМ, 2005, 158 с.

3.IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan on behalf of the IPCC. 1996, 2006.

4. Государственная служба статистики Министерства Экономики Приднестровской Молдавской Республики. Статистический ежегодник Приднестровской Молдавской Республики – 2006: Статистический сборник (за 2001-2005 г.г.). ПМР. – Тирасполь, 2006. – 188 с.