

**С. В. Гошовский**, д-р техн. наук, профессор, директор Украинского государственного геологоразведочного института, ukrdgr@ukrdgr.gov.ua, ORSID-0000-0002-8312-6244,

**А. В. Зурьян**, заведующий отделом инновационных технологий Украинского государственного геологоразведочного института, alexey\_zuryan@ukr.net, ORSID-0000-0002-2391-1611

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ С НЕСКОЛЬКИМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

*В работе рассмотрены новые подходы к методике оптимизации построения и функционирования системы, которая использует несколько возобновляемых источников энергии. Определены критерии принятия решений о реализации алгоритмов построения и управления энергетическими системами. Предложен алгоритм поиска возможных вариантов источников энергии и методики оптимизации режима работы комбинированных систем.*

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, методические основы, моделирование, построение комплексов энергетических систем, энергоснабжение, альтернативная энергетика, возобновляемые источники энергии.

В мировой практике уже давно используют возобновляемые источники энергии. Они все больше становятся альтернативой таким традиционным энергоресурсам как нефть, газ и атомная энергетика. И этому есть объяснимые как экономические причины, так и причины, связанные с экологической безопасностью. В Украине успешно реализуются крупные проекты, связанные с ветровой и солнечной энергетикой. Широкое применение находят как в промышленности, так и частном секторе теплонасосные технологии с использованием в качестве первичного источника энергии – низкопотенциальную энергию окружающей среды. Расчет параметров и построение систем управления таких моносистем отработаны и не вызывают трудностей у инженеров-проектировщиков. Другое дело, когда для оптимизации системы и уменьшения потребления энергоресур-

сов строится система, которая использует несколько источников энергии, в том числе возобновляемых, и при этом имеет модульную структуру, изменяющуюся в зависимости от изменения внешних условий функционирования системы. По этой причине необходимо создание научно обоснованного алгоритма поиска возможных вариантов источников энергии и разработка методики оптимизации режима работы комбинированных систем.

Комбинированные системы – системы, в которых одновременно используется несколько различных источников энергии. В них наряду с традиционными системами отопления применяются альтернативные источники тепла: солнце, ветер, земля. Создание комбинированной системы может значительно повысить эффективность энергосистемы и соответственно понизить затраты на энергию и повысить экологическую безопасность.

Построение комбинированных энергетических систем базируется на следующих принципах [3]:

- энергию получают из всех источников, доступных на данный момент;
- запасы энергии создаются, сохраняются, накапливаются и рационально распределяются;
- экономичное энергообеспечение можно создать не только на стадии проектирования, но и на основе любой уже существующей.

Основным параметром при построении энергетических систем является ее мощность, которая в свою очередь определяется мощностью каждого источника энергии, включенного в общую систему. Для решения обоих поставленных задач необходимо определить критерии, по которым будет осуществляться как выбор структуры системы, так и управление ею в процессе работы. Для этого воспользуемся математическим аппаратом, предложенным в работе [9].

Расчет показывает, что если в качестве дополнительного альтернативного источника энергии в комбинированной энергосистеме использовать солнечную энергию, то уменьшение количества электрической энергии, потребляемой от существующей электрической сети, может быть найдено следующим образом:

$$W_c = nP_c, \quad (1)$$

где  $n$  – число часов солнечной активности в году;  $P_c$  – средняя активная мощность преобразованной солнечной энергии в течение времени солнечной активности.

Количество энергии, которой можно покрыть расход потребляемой от существующей электрической сети за счет использования ветрогенераторов, можно вывести, исходя из следующих зависимостей:

$$W_B = \frac{m\vartheta_B^2}{2}, \quad (2)$$

где  $W_B$  – значение кинетической энергии ветра;  $m$  – масса воздуха;  $\vartheta_B$  – скорость ветра.

Масса воздуха, который проходит за 1 с через определенную площадь пространства, определяется следующим образом:

$$m = \rho S\vartheta_B, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $S$  – площадь используемого пространства ветровой установкой.

Подставим формулу (3) в (2) и получим выражение мощности воздушного потока

$$P_b = \frac{1}{2} \rho S\vartheta_B^3. \quad (4)$$

Принимаем для определенных условий  $\rho = 1,32 \text{ кг/м}^3$ . Тогда выражение (4) запишется следующим образом:

$$P_B = \frac{S\vartheta_B^3}{1500}, \quad (5)$$

где  $P_B$  – мощность ветрового потока. Так как в течение времени  $t$  скорость ветра  $\vartheta_B$  непрерывно изменяется, то количество ветровой энергии, преобразованной в электрическую, за определенное время может быть найдено следующим образом:

$$W_B = \frac{S}{1500} \int_0^t \vartheta_B^3 dt. \quad (6)$$

Мы предлагаем рассмотреть также вариант покрытия расходов потребляемой от существующей электрической сети энергии за счет использования теплонасосных технологий. Это может быть использование в качестве первичного низкотемпературного источника энергии – энергии воздуха, воды или грунта.

В теплонасосных системах в качестве основного показателя эффективности теплового насоса применяется коэффициент преобразования или отопительный коэффициент COP (coefficient of performance), равный отношению теплопроизводительности теплового насоса к мощности, потребляемой компрессором. В режиме охлаждения для оценки эффективности применяется холодильный коэффициент EER (energy efficiency ratio),

равный отношению холодопроизводительности теплового насоса к мощности, потребляемой компрессором.

Количество сэкономленной электрической энергии в этом случае может быть найдено, исходя из соотношения

$$COP = \frac{Q_R}{N} = \frac{Q_c + N}{N} = EER + 1 = \frac{T_0}{T_k - T_0} + 1, \quad (7)$$

где  $Q_R$  – энергия, отдаваемая потребителю;  $Q_c$  – тепловая энергия, отбираемая у источника тепла;  $N$  – затраченная электроэнергия;  $T_k$  и  $T_0$  – температуры конденсации и кипения в тепловом насосе.

$$EER = \frac{Q_C}{N}. \quad (8)$$

Когда в тепловых насосах одновременно используется тепло и холод (например, охлаждение холодильных камер и нагрев офисных помещений), то

$$COP + EER = \frac{Q_R + Q_C}{N}. \quad (9)$$

При равнопотенциальном цикле  $Q_R = Q_C$

$$COP + EER = \frac{2Q_C}{N} + 1 = 2EER + 1. \quad (10)$$

Теоретически коэффициент преобразования теплового насоса может достигать 12, что характеризует высокую энергетическую эффективность теплового насоса. Реальные  $COP$  несколько ниже и составляют порядка 3–5.

В качестве альтернативы также может быть использовано твердое топливо: уголь, дрова, разнообразные горючие отходы сельскохозяйственного производства [4].

Вследствие чего суммарная мощность теплоносителей при комбинированной системе отопления жилых домов и коммунальных объектов, как было показано ранее, может складываться из: мощности электрического котла  $P_{\text{э}}$ , мощности газового котла  $P_{\text{г}}$ , мощности твердотопливного котла  $P_{\text{т}}$ , мощности ветроэнергетической установки  $P_{\text{в}}$ , мощности гелиоустановки  $P_{\text{с}}$  и мощности теплового насоса  $P_{\text{тн}}$ :

$$P = P_{\text{э}} + P_{\text{г}} + P_{\text{т}} + P_{\text{в}} + P_{\text{с}} + P_{\text{тн}}. \quad (11)$$

Таким образом, предлагается при создании алгоритмов и моделей проектирования энергетических систем за критерий принятия решения о вариантах их построения выбрать местные условия (географические, экологические, экономические и т. п.), а за критерий принятия решения системой управления конфигурацией и режимами работы данной системы принимать минимальную стоимость суммарного количества энергии от различных источников за счет регулирования мощности и конфигурации подсистем, которые работают внутри комбинированной системы.

Решение первой поставленной нами задачи заключается в нахождении такого состава оборудования, который в соответствии с заданным критерием оптимальности будет вырабатывать максимальную мощность при заданных финансовых затратах или иметь минимальную стоимость в пределах требуемой мощности [3].

Алгоритм работы при построении энергетических комплексов состоит из нескольких этапов. На первом этапе происходит отбор типов оборудования, которые будут входить в состав комбинированной системы, исходя из заданного региона. На втором этапе происходит поиск моделей оборудования согласно техническим требованиям, которым удовлетворяют заданные условия. На третьем этапе из выбранных моделей составляют комбинированную систему, вырабатывающую необходимую или большую мощность в равном или меньшем ценовом диапазоне, определенном пользователем. Таким образом, целевая функция примет следующий вид

$$Z = \begin{cases} \sum_{i=1}^k N_i \geq N \\ \sum_{i=1}^k Q_i \leq Q \end{cases}, \quad (12)$$

где  $N_i$  – мощность, вырабатываемая одной единицей оборудования комбинированной системы;  $N$  – мощность, заданная пользователем;  $Q_i$  – стоимость одной единицы

оборудования, входящего в состав комбинированной системы;  $Q$  – стоимость, заданная пользователем;  $k$  – общее количество единиц оборудования.

На четвертом этапе после нахождения всех возможных комбинаций состава оборудования выполняется оптимизация найденных решений и предлагается наиболее оптимальная конфигурация.

Одним из входных параметров для работы программы является критерий оптимальности, то есть пользователь сам определяет, что ему важнее получить: максимальную мощность при заданных финансовых ограничениях или произвести минимальные затраты при получении требуемой мощности. Таким образом, задача оптимизации в случае предпочтения максимальной мощности примет вид

$$Z = N_i \rightarrow \max, \quad (13)$$

$$Q_i \leq Q$$

и в случае предпочтения минимальной стоимости

$$Z = Q_i \rightarrow \min \quad (14)$$

$$N_i \geq N$$

Входными данными для поиска оборудования являются параметры, заданные пользователем:

- географический регион расположения помещения;
- требуемая мощность потребления электроэнергии;
- площадь помещения, требующая отопления;
- стоимость всей комбинированной системы;
- критерий оптимизации;
- подбор независимого источника питания.

Решение второй поставленной нами задачи заключается в разработке методики, позволяющей оптимизировать алгоритм управления комбинированными системами энергоснабжения.

Современное производство во всех

сферах характеризуется высокой сложностью и многообразием технологических процессов. Системы управления характеризуются в статическом режиме структурой связей и свойствами ее элементов. В динамическом режиме система характеризуется последовательностью состояний. Основным подходом к рассмотрению систем управления на всех этапах жизненного цикла этих систем (проектирование – создание – эксплуатация – ремонт и восстановление – выведение из эксплуатации) является математическое моделирование [5].

Моделирование – это описание определенного объекта. В области систем управления технологическими объектами моделирования являются соответственно сами технологические объекты, системы и процессы управления ими, а также их составные части. Моделирование можно рассматривать как отражение объекта на множество его описаний. Если объектом моделирования является система управления технологическим объектом, то модель должна отражать зависимость состояния объекта от задачи с учетом структурных характеристик и параметров системы. В простейшем виде это отражает рис. 1.

$$\theta_Y = F[\theta_X], \quad (15)$$

где  $\Theta_Y$  – набор характеристик состояния системы – модель состояния  $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ ;  $\Theta_X$  – набор характеристик входных воздействий – модель воздействия  $X = \{x_1, \dots, x_m\}$ ;  $F$  – функция преобразования – модель системы.

Совокупность этих трех моделей (воздействия, состояния и системы) составляет модель функционирования или модель процесса управления (рис. 1).

В зависимости от способа получения результатов моделирования различают математические модели:

- аналитические,
- имитационные.

Аналитическое моделирование (analytical modeling) – нахождение характеристик объекта на основе формальной или

алгоритмической модели путем выполнения определенных математических преобразований

Имитационное моделирование (simulation) – проведение на ЭВМ численных экспериментов с математической моделью, описывающей поведение сложной системы в течение определенного периода времени. Применяется, как правило, в тех случаях, когда аналитические способы исследования модели отсутствуют, а их поиск требует очень больших затрат.

Основой имитационного моделирования является метод статистических испытаний – метод Монте-Карло. Этот метод наиболее эффективен при исследовании сложных систем, на функционирование которых оказывают существенное влияние случайные факторы.

Имитационная модель – это модель, отражающая поведение системы при заданных потоках требований, поступающих на входы системы. Параметры входных потоков требований – внешние параметры, определяемые требованиями пользователя. Выходными параметрами являются величины, характеризующие свойства системы – качество ее функционирования [5].

Для автоматизированного управления установкой теплоснабжения необходимо знать свойства этой установки в целом и отдельных её элементов [11].

Рассмотрим установку теплоснабжения, которая состоит из следующих элементов:

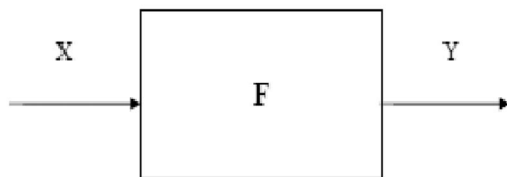


Рис. 1. Упрощенная схема объекта моделирования

- солнечный коллектор;
- аккумулятор тепла;
- грунтовый теплообменник;
- потребитель;
- дополнительный источник тепла.

Основным элементом рассматриваемой установки является плоский солнечный коллектор. Структурная схема солнечного коллектора представлена на рис. 2.

Солнечный коллектор условно разбит на два звена.

Звено 1 отражает связь между удельным тепловым потоком солнечной инсоляции  $q$ , коэффициентом теплоотдачи от стенки солнечного коллектора к теплоносителю  $\alpha$ , который является функцией скорости теплоносителя, температурой теплоносителя на выходе солнечного коллектора  $t_{m2}$  и температурой стенки солнечного коллектора  $t_k$ .

Звено 2 отражает связь между расходом теплоносителя через солнечный коллектор  $G_m$ , температурами теплоносителя на входе солнечного коллектора  $t_{m1}$ , стен-

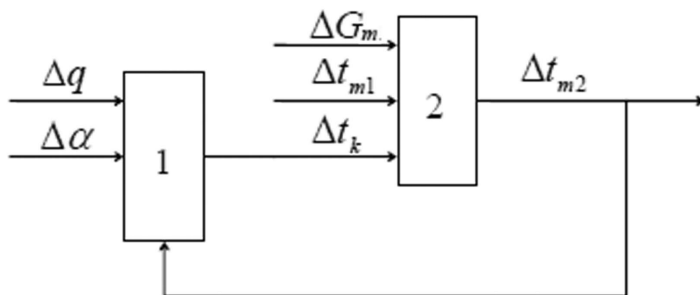


Рис. 2. Параметрическая схема солнечного коллектора

ки солнечного коллектора  $t_k$  и температурой теплоносителя на выходе солнечного коллектора  $t_{m2}$ . Исходя из приведённой структурной схемы и теплового баланса для рассматриваемого элемента установки, была получена система дифференциальных уравнений, которая устанавливает связь между указанными параметрами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dt_k}{d\tau} = -\frac{\alpha F_k}{m_k c_{pk}} \Delta t_k + \frac{F_k}{m_k c_{pk}} \Delta q - \\ - \frac{F_k (t_k - t_{m2})}{m_k c_{pk}} \Delta \alpha + \frac{\alpha F_k}{m_k c_{pk}} \Delta t_{m2} \\ \frac{dt_{m2}}{d\tau} = -\frac{(G_m c_{pm} + \alpha F_k)}{m_m c_{pm}} \Delta t_{m2} + \\ + \frac{c_{pm} (t_{m1} - t_{m2})}{m_m c_{pm}} \Delta G_m + \frac{G_m c_{pm}}{m_m c_{pm}} \Delta t_{m1} + \frac{\alpha F_k}{m_m c_{pm}} \Delta t_k \end{array} \right. , (16)$$

где  $F_k, F_m$  – площади теплообмена со стороны теплового потока от солнца и стенки солнечного коллектора соответственно;  $m_k, m_m$  – массы солнечного коллектора и теплоносителя соответственно;  $c_{pk}, c_{pm}$  – удельные теплоёмкости стенки солнечного коллектора и теплоносителя соответственно;  $\Delta$  – изменение соответствующей величины. Переходя к описанию свойств солнечного коллектора в матричной форме записи динамических систем, были получены следующие матрицы:

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \end{pmatrix},$$

$$C = (01), D = (0 \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$\text{где } A_{11} = \frac{-\alpha F_k}{m_k c_{pk}}, A_{12} = \frac{\alpha F_k}{m_m c_{pm}}, A_{21} = \frac{\alpha F_k}{m_k c_{pk}}, \\ A_{22} = \frac{-(G_m c_{pm} + \alpha F_k)}{m_m c_{pm}}, B_{11} = \frac{F_k}{m_k c_{pk}}, \\ B_{12} = \frac{-F_k (t_k - t_{m2})}{m_k c_{pk}}, B_{21} = \frac{t_{m1} - t_{m2}}{m_m}, B_{22} = \frac{G_m}{m_m}.$$

Следующим элементом установки является аккумулятор тепла. Для рассма-

триваемой установки теплоснабжения выбран аккумулятор теплоты ёмкостного типа для краткосрочного аккумулирования. Параметрическая схема бака-аккумулятора тепла изображена на рис. 3.

Температура в аккумуляторе  $t_a$  зависит от температуры теплоносителя на входе в аккумулятор  $t_{m1}$ . На основе данной схемы и теплового баланса для бака-аккумулятора получено дифференциальное уравнение

$$\frac{dt_a}{d\tau} = -\frac{G_m}{m_a} \Delta t_a + \frac{G_m}{m_a} \Delta t_{m1}, \quad (17)$$

где  $G_m$  – расход теплоносителя, проходящего через аккумулятор;  $m_a$  – масса конструкции аккумулятора.

Для описания свойств рассматриваемого аккумулятора в матричной форме записи динамических систем были получены следующие матрицы:

$$A = (A_{11}), B = (B_{11}), C = (1), D = (0),$$

$$\text{где } A_{11} = -\frac{G_m}{m_a}, B_{11} = \frac{G_m}{m_a}.$$

Следующим элементом установки теплоснабжения является грунтовый теплообменник. Поле грунтовых теплообменников является источником тепловой энергии либо аккумулятором тепловой энергии в зависимости от температур теплоносителя и грунта. Поле грунтовых теплообменников – набор трубок Фильда, расположенных в грунте на некотором расстоянии друг от друга. Грунтовый теплообменник-аккумулятор представляет собой трубку Фильда, погруженную в грунт. Расчётная схема теплообменника приведена на рис. 4а. Теплообменник можно представить в виде цилиндра диаметром  $d_z$  и высотой  $h_z$ . Структурная схема грунтового теплообменника представлена на рис. 4б.

Грунтовый теплообменник условно разбит на два звена. *Звено 1* отражает связь между температурой теплоносителя на выходе грунтового теплообменника  $t_{m2}$  и температурой грунта  $t_z$ . *Звено 2* отражает связь между температурами объёма



грунта теплообменника  $t_z$ , теплоносителя на входе теплообменника  $t_{m1}$  и температурой теплоносителя на выходе  $t_{m2}$ .

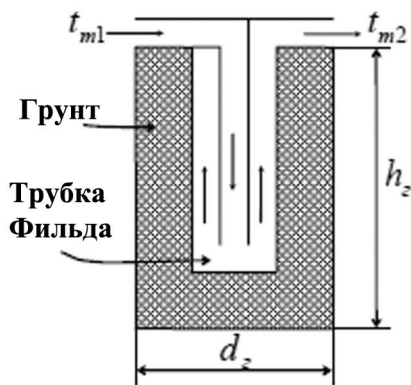
$$\begin{cases} \frac{dt_{m2}}{d\tau} = -\frac{(G_m c_{pm} + \alpha F)}{m_m c_{pm}} \Delta t_{m2} + \frac{G_m}{m_m} + \frac{\alpha F}{m_m c_{pm}} \Delta t_z \\ \frac{dt_z}{d\tau} = -\frac{\alpha F}{m_z c_{pz}} \Delta t_z + \frac{\alpha F}{m_z c_{pz}} \Delta t_{m2} \end{cases}, \quad (18)$$

где  $G_m$  – расход теплоносителя;  $c_{pm}$ ,  $c_{pz}$  – удельные теплоёмкости теплоносителя и грунта теплообменника соответственно;  $m_m$ ,  $m_z$  – массы теплоносителя, проходящего через теплообменник и объём грунта теплообменника соответственно;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к объёму грунта теплообменника;  $F$  – площадь теплообмена со стороны теплоносителя. Переходя к описанию свойств грунтового теплообменника в матричной форме записи динамических систем, были получены следующие матрицы:

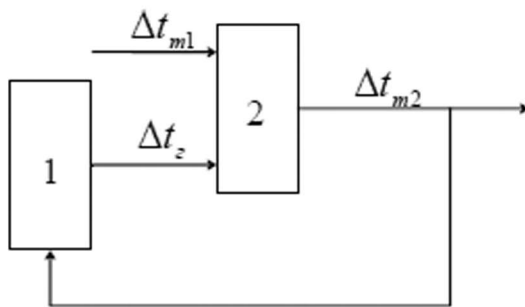
$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_{11} \\ 0 \end{pmatrix}, C = (0 \ 1), D = (0),$$

где  $A_{11} = \frac{-(G_m c_{pm} + \alpha F)}{m_m c_{pm}}, A_{12} = \frac{\alpha F}{m_m c_{pm}},$

$$A_{21} = -\frac{\alpha F}{m_z c_{pz}}, A_{22} = \frac{\alpha F}{m_z c_{pz}}, B_{11} = \frac{G_m}{m_m}.$$



а



б

Рис. 4. Расчетная (а) и параметрическая (б) схемы грунтового теплообменника

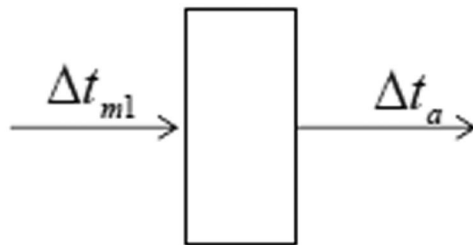
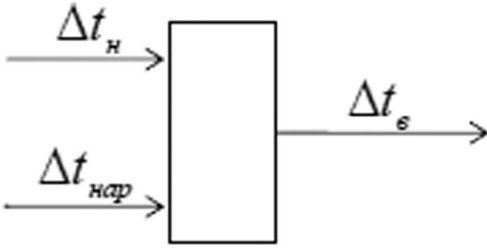


Рис. 3. Параметрическая схема бака-аккумулятора

В качестве следующего элемента установки теплоснабжения рассмотрим помещение потребителя. Для данной установки теплоснабжения рассматривается помещение жилого дома. Параметрическая схема помещения изображена на рис. 5.

Помещение представляет собой прямоугольную комнату с окном площадью  $F_{ок}$ , стенами общей площадью  $F_c$  и установленным нагревателем с площадью теплообмена  $F_n$ . Данная схема отражает связь между температурами окружающей среды  $t_{нар}$ , поверхности нагревателя  $t_n$  и воздуха в помещении  $t_a$ . Приведённая схема и тепловой баланс для помещения потребителя являются основой для полученного дифференциального уравнения, которое устанавливает связь между указанными параметрами:



**Рис. 5. Параметрическая схема помещения потребителя**

$$\frac{dt_b}{d\tau} = \frac{-(\alpha_n F_n + k_c F_c + k_{ok} F_{ok})}{m_в c_{pв}} \Delta t_с + \frac{\alpha_n F_n}{m_в c_{pв}} \Delta t_n + \frac{k_c F_c + k_{ok} F_{ok}}{m_в c_{pв}} \Delta t_{нар}, \quad (19)$$

где  $m_в$  – масса воздуха в помещении;  $c_{pв}$  – удельная теплоёмкость воздуха в помещении;  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи от нагревателя воздуха в помещении;  $k_c$ ,  $k_{ок}$  – коэффициенты теплопередачи через стену и окна помещения соответственно. Матрицы, полученные при переходе к описанию свойств солнечного коллектора в матричной форме записи динамических систем, имеют вид

$$A=(A_{11}), B=(B_{11} B_{12}), C=(1), D=(0 0),$$

$$\text{где } A_{11} = \frac{-(\alpha_n F_n + k_c F_c + k_{ok} F_{ok})}{m_в c_{pв}},$$

$$B_{11} = \frac{\alpha_n F_n}{m_в c_{pв}}, B_{12} = \frac{k_c F_c + k_{ok} F_{ok}}{m_в c_{pв}}.$$

Следующий элемент рассматриваемой установки теплоснабжения – дополнительный источник тепла, в качестве которого выбран водонагревательный котёл на газообразном топливе. Динамические свойства таких котельных агрегатов достаточно подробно описаны в работах [10, 12].

Приведённые матрицы элементов установки теплоснабжения можно объединить в единую систему матриц. Однако структура полученной системы является

переменной и зависит от режима работы установки теплоснабжения.

Рассмотренные модели позволяют составить обобщённую модель установки теплоснабжения при различных видах взаимосвязей между данными элементами, что позволит синтезировать обобщенный прототип комплексной энергетической системы, которая использует несколько источников энергии, в том числе возобновляемых, и имеет модульную структуру, которая изменяется.

За основу методики анализа задачи разработки комплексных энергетических систем с изменяемой структурой и альтернативными источниками энергии избран объектно-ориентированный анализ. Методика анализа задачи разработки комплексных энергетических систем с изменяемой структурой и альтернативными источниками энергии описывается в три этапа [7].

На первом этапе анализа осуществляется декомпозиция на подсистемы. Синтезируются информационные модели, описывающие связи и атрибуты концептуально важных объектов, которые составляют подсистемы.

На втором этапе синтезируют модели состояний, формализуют жизненные циклы объектов. Эти модели представляются в виде диаграмм, которые содержат состояния объектов, переходы в состояния и события, обуславливающие эти переходы.

Третий этап посвящен разработке технологических алгоритмов, учитывающих специфику технологического процесса, который подлежит автоматизации.

Результаты анализа по предложенной методике позволяют: определить и обосновать структуру системы, возможные режимы работы и конфигурации, необходимые для обеспечения потребностей потребителя; рассмотреть свойства элементов системы и их поведение во времени; определить алгоритмы функционирования контроллера, учитывая выбор целесообразной конфигурации в зависимости от потребностей потребителя, возмож-



ностей системы или на основе критерия, который учитывает суммарные затраты различных видов энергетических ресурсов.

Система с изменяемой структурой и альтернативными источниками энергии для обеспечения заданной температуры в процессе поставки теплоносителями потребителя, как кортеж  $S$ , имеет вид

$$S = \{M_{итэ}, M_{тс}, M_c\}, \quad (20)$$

где  $M_{итэ}$  – множество источников тепловой энергии;  $M_{тс}$  – множество технических средств;  $M_c$  – множество структур.

Для объекта управления, представленного в таком виде, необходима система управления, которая позволяет выбрать лучший вариант из предложенных множеств источников энергии, технических устройств и структур объекта. При этом она должна соответствовать потребностям потребителя, параметрам теплоносительной системы и условиям окружающей среды.

Для оценки эффективности комплексной энергетической системы, которая использует альтернативные источники энергии и имеет изменяемую структуру, предложен критерий  $k$ , являющийся отношением суммарных затрат энергии (электроэнергии и энергии органического топлива) для обеспечения заданной температуры в помещениях:

$$k = \min \left( \frac{\sum_{i=1}^n E_i \Delta t_i}{\int_0^{\tau} Q(t) dt} \right), \quad (21)$$

где  $E_i$  – первичные энергетические ресурсы, используемые системой для обеспечения заданной температуры;  $Q(t)$  – текущая нормативная потребность в энергии для обеспечения заданной температуры;  $t$  – конечный временной интервал, на котором проходит обмен и потребление энергоресурсов;  $n$  – количество различных видов энергетических ресурсов системы.

При расчете критерия различные варианты структур приводятся к одинаковому полезному эффекту.

По методике [7] выделены путем декомпозиции две подсистемы анализа “Объект управления” и “Система управления”.

Информационные модели подсистем отражают статику системы и информацию об элементах системы, их свойства и отношения между ними.

Модели состояний объектов подсистем отражают их поведение во времени, как правило, выражаются через состояния “включено – выключено – неисправность” или “открытие – закрытие – неисправность” и соответствующие переходы. Жизненный цикл контроллера формализован в восемь состояний, которые отражают проверку работоспособности системы, обработку принятых сигналов, анализ изменений, выбор конфигурации системы, установки параметров регуляторов.

В эвристическом алгоритме температура в помещении  $t_n$  сравнивается с заданной температурой  $t_s$ , которая определена как комфортная для потребителя. Эти сравнения позволяют выбрать режим работы системы и соответствующую структуру системы (конфигурацию ее основных элементов).

Алгоритм на основе критерия оценки эффективности системы  $k$  имеет преимущество перед эвристическим алгоритмом, так как позволяет выбрать структуру системы, в которой минимально используются первичные энергоресурсы на момент выполнения расчета. Продолжительность расчетов  $N$  конфигураций элементов системы по этому алгоритму существенно меньше времени переходных процессов системы.

Математическая модель окружающей среды учитывает изменения интенсивности суммарной инсоляции и температуру воздуха и описывает возмущающие воздействия, поступающие в систему.

Для определения температуры воздуха  $T'(t, m)$  в заданный день года исходными

данными являются значения времени  $t$  и месяца  $m$ . Для заданного дня определяется максимальная  $T_p^{\max}(m)$  и минимальная  $T_p^{\min}(m)$  годовая температура. Для  $t = 4$  и  $15$  часов заданного дня соответственно определяется максимальная  $T_\delta^{\max}(m)$  и минимальная  $T_\delta^{\min}(m)$  суточная температура. Определяется масштабный коэффициент  $Scale_T(m)$ , на основе которого определяется температура воздуха для заданных значений.

$$T_p^{\max}(m) = 0,0036 t^5 - 0,1013 t^4 + 0,8979 t^3 - 3,1137 t^2 + 8,465 t - 4,6261; \quad (22)$$

$$T_p^{\min}(m) = 0,0035 t^5 - 0,1018 t^4 + 0,9818 t^3 - 3,8951 t^2 + 9,8625 t - 8,8486; \quad (23)$$

$$T_\delta^{\max}(m) = T_c(t), t = 4, T_\delta^{\min}(m) = T_c(t), t = 15; \quad (24)$$

$$T_c(t) = 0,0004 t^4 - 0,0221 t^3 + 0,3816 t^2 - 1,7265 t + 19,5; \quad (25)$$

$$Scale_T(m) = (T_p^{\max}(m) - T_p^{\min}(m)) / (T_\delta^{\max}(m) - T_\delta^{\min}(m)); \quad (26)$$

$$I'(t, m) = Scale_T(m) \cdot T_c(t), \quad (27)$$

где  $T_c(t)$  – зависимость средней температуры от времени суток  $t$  для каждого месяца  $m$  по начальным данным распределения температуры воздуха в течение года.

Для определения суммарной инсоляции  $I'(t, m)$  в заданный день года также задаются значения времени  $t$  и месяца  $m$ . Для заданного дня определяется максимальная годовая суммарная инсоляция  $I_p^{\max}(m)$ . Для  $t = 12:00$  заданного дня определяется максимальная суточная суммарная инсоляция  $I_\delta^{\max}(m)$ . Определяется масштабный коэффициент  $Scale_I(m)$ , на основе которого определяется суммарная инсоляция для заданных значений.

$$I_p^{\max}(m) = 0,4497 t^4 - 11,755 t^3 + 85,929 t^2 - 122,53 t + 191,42; \quad (28)$$

$$I_\delta^{\max}(m) = I(t); t = 12; \quad (29)$$

$$I(t) = 0,2 t^4 - 8,3 t^3 + 140,2 t^2 - 919,3 t + 2028,4; \quad (30)$$

$$Scale_I(m) = I_p^{\max}(m) / I_\delta^{\max}(m); \quad (31)$$

$$I'(t, m) = Scale_I(m) \cdot I(t) \cdot I^*(t, m), \quad (32)$$

где  $I(t)$  – выражение для суммарной инсоляции без учета длины светового дня;  $I^*(t, m)$  – функция, которая задает длину светового дня.

Для сбора исходной информации разработаны математические модели основных элементов системы, которые учитывают их теплофизические свойства, и рассмотрены в линейном приближении как объекты с сосредоточенными параметрами. Энергетические балансы для объектов обобщенного объекта “технический прибор” подсистемы “объект управления” в виде дифференциальных уравнений первого порядка позволили построить следующие математические модели: для солнечного коллектора

$$qF^c = \alpha^c F^c (t_m^c - t_{m2}^c) + m_m^c c_p \frac{dt_m^c}{d\tau}, \quad (33)$$

$$G_m^c c_{pm} t_{m1}^c + \alpha^c F^c (t_m^c - t_{m2}^c) = G_m^c c_{pm} t_{m2}^c + m_m^c c_{pm} \frac{dt_{m2}^c}{d\tau}, \quad (34)$$

для аккумулятора-бака тепловой энергии

$$m_m^a c_{pm} \frac{dt_{m2}^a}{d\tau} = G_m^a c_{pm} t_{m1}^a - G_m^a c_{pm} t_{m2}^a, \quad (35)$$

для грунтового теплообменника-аккумулятора

$$m_m^c c_{pm} \frac{dt_{m2}^c}{d\tau} = G_m^c c_{pm} t_{m1}^c - \alpha^c F^c (t_{m2}^c - t_m^c) - G_m^c c_{pm} t_{m2}^c, \quad (36)$$

$$m_m^c c_p \frac{dt_m^c}{d\tau} = \alpha^c F^c (t_{m2}^c - t_m^c), \quad (37)$$

для резервного источника энергии

$$G_z Q_p^h = \alpha^p F^p (t_M^p - t_{m2}^p) + m_m^p c_p^p \frac{dt_M^p}{dt}, \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \alpha^p F^p (t_M^p - t_{m2}^p) + G_m^p c_{pm} t_{m1}^p = \\ = G_m^p c_{pm} t_{m2}^p + m_m^p c_{pm} \frac{dt_{m2}^p}{dt}, \end{aligned} \quad (39)$$

для теплового насоса

$$\begin{aligned} G_m^6 c_{pm} t_{m1}^6 = G_m^6 c_{pm} t_{m2}^6 + k^6 F^6 \left( \frac{t_{m1}^6 + t_{m2}^6}{2} + t_{x4} \right) + \\ + m_m^6 c_{pm} \frac{dt_{m2}^6}{dt}, \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} k^6 F^6 \left( \frac{t_{m1}^6 + t_{m2}^6}{2} + t_{x4} \right) + G_{x1} h_{x4} = \\ = G_{x1} h_{x1} + m_x^6 \frac{dh_{x1}}{dt}, \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} G_{x1} h_{x1} + N_\kappa = v_p p_p + \\ + G_{x2} [c_{px} (t_{x2} - t_x) + h_x] + V_p \frac{dp_p}{dt}, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} v_p p_p + G_{x2} [c_{px} (t_{x2} - t_x) + h_x] = \\ = G_{x2} h_{x3} + k^k F^k (t_{x2} - \frac{t_{m1}^k + t_{m2}^k}{2}) + m_x^k c_{px} \frac{dt_{x2}}{dt}, \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} k^k F^k (t_{x2} - \frac{t_{m1}^k + t_{m2}^k}{2}) + G_m^k c_{pm} t_{m2}^k = \\ = G_m^k c_{pm} t_{m1}^k + m_m^k c_{pm} \frac{dt_{m1}^k}{dt}, \end{aligned} \quad (44)$$

для потребителя при отоплении

$$\begin{aligned} G_m^o c_{pm} t_{m1}^o = G_m^o c_{pm} t_{m2}^o + \\ + m_m^o c_{pm} \frac{dt_{m1}^o}{dt} + \alpha^o F^o (t_{m1}^o - t_M^o), \end{aligned} \quad (45)$$

$$\alpha^o F^o (t_{m1}^o - t_M^o) = \alpha^n F^o (t_M^o - t_n) + m_m^o c_p^o \frac{dt_M^o}{dt}, \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \alpha^n F^o (t_M^o - t_n) = m_n c_{pn} \frac{dt_n}{dt} + \\ + k^{cm} F^{cm} (t_n - t_{306}) + k^{eik} F^{eik} (t_n - t_{306}), \end{aligned} \quad (47)$$

где  $q$  – удельный тепловой поток инсоляции, который поступает на поверхность солнечного коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;  $G_z$  – рас-

ход органического топлива резервного источника энергии, кг/с;  $Q_p^h$  – теплотворная способность топлива, Дж/кг;  $t_{x4}$ ,  $t_{x2}$ ,  $t_x$  – входные температуры рабочего вещества через испаритель, конденсатор теплового насоса и вспомогательная температура, К;  $h_{x1}$ ,  $h_{x4}$ ,  $h_{x3}$ ,  $h_x$  – энтальпии рабочего вещества на выходе, в ходе испарителя, выходе конденсатора теплового насоса и вспомогательная энтальпия, Дж/кг;  $G_{x1}$ ,  $G_{x2}$  – затраты рабочего вещества через испаритель и после ресивера теплового насоса, кг/с;  $p_p$  – давление в ресивере теплового насоса, Па;  $N_\kappa$  – мощность компрессора теплового насоса, Вт;  $v_p$  – объемный расход рабочего вещества через ресивер теплового насоса, м<sup>3</sup>/с;  $V_p$  – объем ресивера теплового насоса, м<sup>3</sup>;  $t_n$  – температура воздуха в помещении, К;  $t_{306}$  – температура воздуха окружающей среды, К;  $m_n$  – масса воздуха в помещении, кг.

Коэффициенты теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>:  $a^c$  – от стенки коллектора к теплоносителю;  $a^g$  – от теплоносителя к почве теплообменника-аккумулятора;  $a^p$  – от внутренних труб резервного источника энергии теплоносителю;  $a^o$ ,  $a^n$  – от теплоносителя к стенке теплообменника отопления и от стенки к воздуху помещения.

Теплоемкости, Дж/кг·К:  $c_{pm}$  – теплоносителя (через все элементы проходит одинаковый теплоноситель);  $c_{px}$  – рабочего вещества;  $c_{pn}$  – воздух.

Общие переменные основных элементов системы:  $t_{m1}$ ,  $t_{m2}$  – входная и выходная температуры теплоносителя, К;  $t_m$  – температура материала, К;  $G_m$  – расход теплоносителя, кг/с;  $F$  – поверхность теплоотдачи, м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициенты теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $c_p$  – теплоемкость материала, Дж/кг·К;  $m_m$ ,  $m_x$  – массы теплоносителя и материала, кг;  $m_x$  – масса рабочего вещества, кг.

Верхние индексы для общих переменных определяют, к какому основному элементу системы (или его части) они относятся:  $c$  – солнечный коллектор;  $a$  – аккумулятор-бак;  $g$  – почвенный теплообменник аккумулятора;  $v$  – испаритель теплового насоса;  $\kappa$  – конденсатор

теплового насоса; *o* – теплообменник отопления; *ст* – стена потребителя; *ок* – окно потребителя.

Для потребителя при охлаждении и горячем водоснабжении используются подобные уравнения.

Полученные модели предоставляют возможность выявить свойства автоматизированной системы управления и позволили разработать структуру и алгоритмы ее изменения.

### Выводы

В работе проанализированы возможные решения научно-прикладной задачи, которая заключается в разработке автоматизированной энергетической системы, имеющей изменяемую структуру, использующей несколько источников энергии, в том числе альтернативных, и минимально задействующей первичные энергоресурсы в процессе поставки теплоносителей потребителю. Предложены новые подходы к методике оптимизации построения и функционирования данных системы. Предложенное моделирование режимов работы позволяет повысить экологическую безопасность эксплуатации комбинированных энергетических систем.

На основе предварительно проведенного анализа существующих энергетических систем с альтернативными источниками энергии определен обобщенный прототип систем. На основе анализа прототипа выбраны источники тепловой энергии и режимы работы системы для обеспечения эффективного ее функционирования. Синтезировано энергетическую систему с изменяемой структурой путем совершенствования прототипа. Условия работы данной системы определяются потребностями потребителя и состоянием (параметрами) окружающей природной среды, исходя из которых, на основе предложенной методики строится алгоритм поиска возможных вариантов источников энергии и определяется наиболее оптимальный режим ее работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдикеев Н. М.* Проектирование интеллектуальных систем в экономике: Учебник. – М.: Экзамен, 2004. – 528 с.
2. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Проектирование экспертных систем на основе системного моделирования: [Монография]/ Науч. ред. Г. Г. Куликов. – Уфа: Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 1999. – 223 с.
3. *Антипова Е. И.* Исследование и разработка экспертной системы определения оптимального состава оборудования комбинированной системы энергоснабжения жилого помещения с использованием возобновляемых источников энергии//Магистерская диссертация. – Алматы, 2014. – 54 с.
4. *Денисова А. Є.* Оцінка ефективності біогазових електростанцій/А. Є. Денисова, Нго Мінь Хієу//Збірник наукових праць національного університету кораблебудування НУК ім. адм. Макарова. – 2014. – № 5–6. – С. 118–122.
5. *Дубовой В. М.* Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування//Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 309 с.
6. *Кудрявцев Е. М.* GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
7. *Максименко І. М.* Автоматизація систем забезпечення заданої температури з альтернативними джерелами енергії//Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів/Одеський національний політехнічний університет. – Одеса, 2007. – 20 с.
8. *Румянцева Е. Л., Слюсарь В. В.* Информационные технологии. – М.: Форум, Инфра-М, 2007. – 256 с.
9. *Овчаров С. В., Стребков А. А., Бурык А. В.* Разработка комбинированной системы отопления жилых домов и коммунальных объектов в сельской местности//Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 1 (21). – Т. 1. – С. 46–51.
10. *Остапенко Ю. О.* Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: Задруга, 1999. – 422 с.
11. *Тодорцев Ю. К., Беглов К. В., Максименко И. Н.* Модели элементов установки теплоснабжения как объекта автоматизации// Моделирование объектов и систем управления. АЭКС. – 2005. – № 2 (16). – С. 227–231.

## REFERENCES

1. *Abdikeev N. M.* Proektirovanie intellektualnykh sistem v ekonomike. – Moskva: Jekzamen, 2004. – 528 p. (In Russian).
2. Avtomatizirovanoe proektirovanie informacionno-upravljajushchih sistem. Proektirovanie ekspertnykh sistem na osnove sistemnogo modelirovanija: (Monografija)/Science editor G. G. Kulikov – Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 1999. – 223 p. (In Russian).
3. *Antipova E. I.* Issledovanie i razrabotka ekspertnoj sistemy opredelenija optimalnogo sostava oborudovanija kombinirovannoj sistemy energosnabzhenija zhilogo pomeshhenija s ispolzovanijem vozobnovliaemykh istochnikov energii// Master's dissertation. – Almaty, 2014. – 54 p. (In Russian).
4. *Denysova A. Ye., Nho Min Khieue.* Otsinka efektyvnosti biohazovykh elektrostantsii//Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho universytetu korablebuduvannia NUK im. adm. Makarova. [Admiral Makarov National University of Shipbuilding]. – 2014. – № 5–6. – P. 118–122. (In Ukrainian).
5. *Dubovoi V. M.* Identifikatsiia ta modelivannia tekhnolohichnykh ob'ektiv i system keruvannia. – Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University, 2009. – 309 p. (In Ukrainian).
6. *Kudrjavcev E. M.* GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovanija razlichnykh sistem. – Moskva: DMK Press, 2004. – 320 p. (In Russian).
7. *Maksymenko I. M.* Avtomatizatsiia system zabezpechennia zadanoi temperatury z alternatyvnymy dzhherelamy enerhii//Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.07 – Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv/Odesa National Polytechnic University. – Odesa, 2007. – 20 p. (In Ukrainian).
8. *Rumjanhceva E. L., Sljusar V. V.* Informacionnye tehnologii. – Moskva: Forum, Infra-M, 2007. – 256 p. (In Russian).
9. *Ovcharov S. V., Strebkov A. A., Burjak A. V.* Razrabotka kombinirovannoj sistemy otoplenija zhilykh domov i kommunalnykh ob'ektov v selskoj mestnosti//Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva. – 2015. – №. 1 (21). – Vol. 1. – P. 46–51. (In Russian).
10. *Ostapenko Yu. O.* Identifikatsiia ta modelivannia tekhnolohichnykh ob'ektiv keruvannia. – Kyiv: Zadruga, 1999. – 422 p. (In Ukrainian).
11. *Todorcev Ju. K., Beglov K. V., Maksimenko I. N.* Modeli jelementov ustanovki teplosnabzheniia kak obekta avtomatizatsii//Modelirovanie ob'ektov i sistem upravlenija [Journal of Modeling of objects and control systems]. AJEKS. – 2005. – № 2 (16). – P. 227–231. (In Russian).

Р у к о п и с о т р и м а н о 28.07.2016.

**С. В. Гошовський**, ukrdgr@ukrdgr.gov.ua, ORSID-0000-0002-8312-6244,

**О. В. Зур'ян**, alexey\_zuryan@ukr.net, ORSID-0000-0002-2391-1611

(Український державний геологорозвідувальний інститут)

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

У праці розглянуто нові підходи до методики оптимізації побудови та функціонування системи, яка використовує декілька відновлюваних джерел енергії. Визначено критерії прийняття рішень щодо створення алгоритмів побудови й управління енергетичними системами. Запропоновано алгоритм пошуку можливих варіантів джерел енергії й методики оптимізації режиму роботи комбінованих систем.

**Ключові слова:** екологічна безпека, методичні основи, моделювання, побудова комплексів енергетичних систем, енергопостачання, альтернативна енергетика, відновлювані джерела енергії.

**S. V. Goshovskyi**, Ukrainian State Geological Research Institute, ukrdgr@ukrdgr.gov.ua, ORSID-0000-0002-8312-6244,

**A. V. Zurian**, Ukrainian State Geological Research Institute, alexey\_zuryan@ukr.net, ORSID-0000-0002-2391-1611

## SIMULATION OF THE SYSTEM WITH SEVERAL SOURCES OF RENEWABLE ENERGY

In the world are already using renewable energy sources. They are increasingly becoming an alternative to traditional energy sources such as oil, gas and even nuclear power. And this is understandable as economic reasons and reasons relating to environmental safety.

*Dimensioning and construction of such mono systems control systems worked and do not cause difficulties for design engineers. Another thing, when in order to optimize the system and reduce the energy consumption based system that uses multiple sources of energy, including renewable and thus has a modular structure, which varies depending on the change in external conditions. For this reason, the creation of science-based algorithm to find possible energy options and develop techniques to optimize the operating mode of the combined systems.*

*Combined systems – systems that simultaneously use a number of different energy sources. In these alternative heat sources are used in addition to traditional heating systems: solar, wind, earth. Creating a combined system can significantly improve the efficiency of the energy system and consequently lower energy costs.*

*The main setting is its capacity with the construction of energy systems, which in turn is determined by the capacity of each energy source included in the overall system. To solve both tasks necessary to define the criteria which will be used as the selection of the system structure and control it during operation.*

*It is proposed to create algorithms and models of designing energy systems for decision-making criteria for the construction of their options to choose local conditions (geographical, ecological, economic, politetcheskie etc.). A criterion for decision-making system management and configuration modes of the system to take the minimum value of the total amount of energy from different sources at the expense of power and configuration control subsystems that operate within the combined system.*

*One of the input parameters for the program is the optimality criterion, ie the user determines that it is more important to get the most power for the given financial limits, or minimum cost to produce in the preparation of the required power.*

*The decision of the second of our mission statement is to develop a method which allows to optimize the control algorithm combined power systems.*

**Keywords:** *ecological safety, methodical basis, modeltrovanie, building complexes energy systems, energy, alternative energy, renewable energy sources.*