

УДК 658.264:681.5

О.Б. Максимова, канд. техн. наук,
Т.С. Добровольская, магистр,
Одес. нац. политехн. ун-т

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

О.Б. Максимова, Т.С. Добровольська. **Оптимальне керування системою теплопостачання зі змінною структурою.** На прикладі котеджу розглянуто можливість керування системою зі змінною структурою. Вихідними даними прийнято математичну модель теплопостачання. Для розв'язання задачі оптимального керування використано метод генетичного алгоритму.

Ключові слова: система теплопостачання, нормована величина, генетичний алгоритм, оптимальне керування.

О.Б. Максимова, Т.С. Добровольская. **Оптимальное управление системой теплоснабжения с переменной структурой.** На примере коттеджа рассмотрена возможность управления системой с переменной структурой. В качестве исходных данных рассмотрена математическая модель теплоснабжения. Для решения задачи оптимального управления использован метод генетического алгоритма.

Ключевые слова: система теплоснабжения, нормированная величина, генетический алгоритм, оптимальное управление.

O.B. Maksimova, T.S. Dobrovolskaya. **Optimal control of heat supply system with variable structure.** On the example of a cottage the possibility of controlling the system with variable structure is considered. The initial data considered is the mathematical model of the heating system. The method of genetic algorithm was used to solve the problem of optimal control.

Keywords: heat supply/heating system, normalized quantity, genetic algorithm, optimal control.

Для теплоснабжения используются органическое и ядерное топливо, геотермальная и солнечная энергия. К искусственным видам энергии, которые используются для теплоснабжения, относятся “вторичные энергоресурсы” промышленных предприятий и электрическая энергия.

Выбор источников тепла зависит от материальных затрат на ресурсы, которые постоянно изменяются. Поэтому для обеспечения эффективности и надежности системы теплоснабжения генерацию тепловой энергии предлагается производить различными взаимозаменяемыми установками. В результате чего возникает задача управления теплогенерирующим оборудованием, что приводит к образованию системы с изменяемой структурой.

Одним из первых управлением системой с переменной структурой еще в 60-е годы XX ст. занимался С.В. Емельянов [1]. Особенностью управления тогда и до сих пор является изменение структуры регулятора. Поэтому рассмотрим изменение структуры объекта управления на примере системы теплоснабжения, состоящей из следующих теплогенерирующих технических средств: двух газовых котлов (ГК) и теплонасосной установки (ТНУ). Такая система теплоснабжения отапливает помещения жилого комплекса.

Для решения задачи управления следует синтезировать критерий, который будет определять эффективность работы системы управления. Для оценки эффективности принята дискретная функция [2] с аргументами плана переключений технических средств x за время t

$$J(x, t) = \sqrt{(w_r R_n(x, t))^2 + (w_q Q_n(x, t))^2 + (w_e E_n(x, t))^2 + (w_s S_n(x, t))^2}. \quad (1)$$

Дискретная функция включает в себя следующие параметры: вероятность отказа системы $R(t)$, качество работы системы управления $Q(t)$, стоимость затраченных энергоресурсов $S(t)$ и эффективность преобразования энергии $E(t)$, а также равноценные весовые коэффициенты w_r , w_q , w_e , w_s , сформированные по экспертным оценкам и равные 0,25. Согласно этой функции текущее состояние системы теплоснабжения определяется вектором r в пространстве координат $(R(t), Q(t), S(t), E(t))$.

Вероятность отказа системы рассчитывается как

$$R_n(x, t) = \sqrt{\sum \alpha_i^2(x, t)}, \quad (2)$$

где $\alpha_i = \frac{t_i K_{oc} K_{мощн} + N_{sw} R_{sw}}{2t}$,

t_i — время работы i -й единицы оборудования в интервале времени $[t_0, t]$,

$K_{oc}, K_{мощн}$ — поправочные коэффициенты на параметры окружающей среды и текущей мощности, соответственно,

N_{sw} — суммарное количество переключений i -го оборудования,

R_{sw} — время работы оборудования за одно переключение.

Нормированная величина качества поддержания заданной температуры определяется по формуле

$$Q_n(x, t) = \sqrt{((T_{max} - T_{min})/\Delta t_1)^2 + ((T_s - T_p)/\Delta t_2)^2}, \quad (3)$$

где T_{max}, T_{min} — максимальная и минимальная температура воздуха в помещении в интервале моделирования,

T_s, T_p — средняя и заданная температура воздуха в помещении в интервале моделирования,

$\Delta t_1, \Delta t_2$ — величины нормировки, которые равны соответственно 2 и 0,5 °C.

Нормированная величина эффективности системы управления имеет вид

$$E_n(x, t) = 1 - \eta_e, \quad (4)$$

где η_e — энергетический коэффициент, учитывающий преобразование первичных энергоресурсов в тепло, которое было затрачено на систему теплоснабжения при текущем плане переключений и рассчитывается как

$$\eta_e = \frac{\sum_{i=1}^N E^{вх}}{\sum_{i=1}^N E^{вых}}, \quad (5)$$

$E^{вх}, E^{вых}$ — входной и выходной энергетические потоки, соответственно.

Нормированное значение стоимости затраченных ресурсов

$$S_n(x, t) = \sum_{i=1}^k G_i \cdot S_i / S_{max}, \quad (6)$$

где G_i — расходы i -го ресурса в текущем интервале времени,

S_i — стоимость i -го ресурса,

S_{max} — стоимость ресурсов с учетом функционирования системы работающего оборудования во всем интервале моделирования,

k — количество использованных первичных источников.

Полученная задача оптимизации двух переменных относится к классу задач дискретного программирования. Ее решение заключается в выполнении условия

$$J(x, t) \rightarrow \min_{x \in X, t \in T}. \quad (7)$$

Полученный критерий позволяет оценить эффективность системы теплоснабжения на некотором интервале времени. Очевидно, что для управления процессом теплоснабжения необходимо решить задачу прогнозирования, т.е. смоделировать работу объекта управления и найти план переключения оборудования, соответствующий условию (7).

Для поиска оптимального плана переключения используется метод генетического алгоритма [3]. Принято, что изменение структуры объекта управления происходит в соответствии с правилами:

— если средняя температура поверхности пола ниже минимально допустимой температуры T_{min}^k и оба котла отключены, то следует включить котел с меньшим износом;

— если средняя температура поверхности пола на 0,5° ниже минимально допустимой температуры T_{min}^k , то следует включить оба котла;

— если средняя температура поверхности пола выше максимально допустимой температуры T_{\max}^k и оба котла включены, то следует выключить котел с большим износом;

— если средняя температура поверхности пола на $0,5^\circ$ выше максимально допустимой температуры T_{\max}^k , то необходимо выключить оба котла;

— если температура воздуха в помещении ниже минимально допустимой температуры T_{\min}^{THY} , то следует включить теплонасосную установку;

— если температура воздуха в помещении выше максимально допустимой температуры T_{\max}^{THY} , то необходимо выключить теплонасосную установку.

Величина настройки T_{\min}^k , T_{\max}^k , T_{\min}^{THY} , T_{\max}^{THY} за один интервал времени образует ген. Множество генов за рассматриваемый промежуток времени формируют хромосому. Было принято, что настройки регулятора не изменяются в течение часа. Таким образом, один ген соответствует одному часу работы. Длина хромосомы была принята равной 24 генам или 24 часам.

Для окончательного решения задачи прогнозирования и поиска оптимального плана переключений необходимо разработать модель системы теплоснабжения. В основу тепловой модели коттеджа положены выражения тепловых балансов при теплообмене Q и теплопередаче Q_m :

$$Q = \frac{mCp(T_2 - T_1)}{\tau}, \quad (8)$$

где m — масса воздуха в помещении, кг;

Cp — удельная теплоемкость среды, Дж/(кг·К);

T_1, T_2 — начальная и конечная температура поверхности теплообмена, соответственно, К,

$$Q_m = kF(T_{\text{cp}} - T_{\text{cp}0}) \quad (9)$$

или

$$Q_m = \sum_i F_i \cdot (T_{\text{cp}} - T_{\text{cp}0}) \cdot \lambda_i / \delta_i, \quad (10)$$

k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

F — площадь поверхности теплообмена, м²;

$T_{\text{cp}0}, T_{\text{cp}}$ — температура сред, находящихся на границе теплопередачи, К;

λ — теплопроводность среды i -го сегмента, Вт/(м·К);

δ — толщина между средами, м.

Количество затраченного полезного тепла газовым котлом рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{газ}} = G_{\text{газ}} q_{\text{газ}} \eta, \quad (11)$$

где $G_{\text{газ}}$ — массовый расход газа на выходе из котла, кг/с;

$q_{\text{газ}}$ — теплопроводная способность газа, Дж/кг;

η — коэффициент полезного действия котла.

Характеристики теплонасосной установки вычислялись на основе T-S диаграммы для фреона R22 по термодинамическим свойствам, которые были аппроксимированы полиномами:

$h''(T) = -0,008T^3 - 0,786T^2 + 414,4T + 288329$ — энтальпия насыщенного пара;

$s''(T) = -0,00004T^3 + 0,0046T^2 - 0,4688T + 2344$ — энтропия насыщенного пара;

$h_2 = k(T)s'' + b(T)$ — энтальпия жидкости, где $k(T) = 0,1118T^3 + 6,7452T^2 + 555,83T + 287759$;

$b(T) = -0,254T^3 - 17,8451T^2 - 716,8T - 386442$;

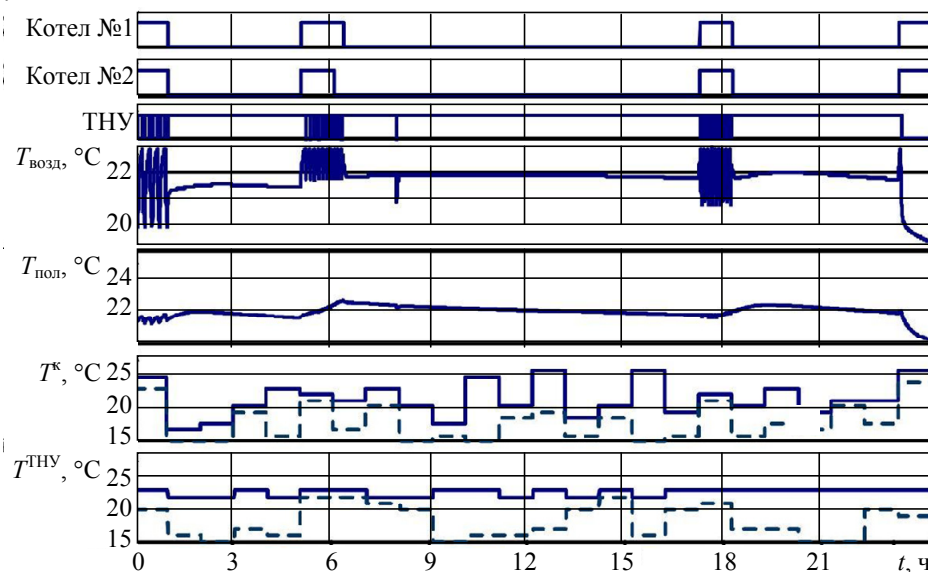
$h'(T) = 0,0083T^3 + 1,3179T^2 + 909,63T + 134942$ — энтальпия насыщенной жидкости;

$r(T) = -0,0167T^3 - 2,0952T^2 - 468,07T + 153383$ — теплота парообразования.

Исходя из этого, определялись температура испарителя и температура конденсатора. КПД компрессора принимался равным 0,9, температура окружающей среды — -15°C .

Таким образом, разработана модель системы теплоснабжения, выбран критерий оценки эффективности системы и синтезирован алгоритм поиска оптимального плана переключения оборудования.

Результаты имитационного моделирования работы системы теплоснабжения представлены на рисунке.



Результат моделирования работы системы теплоснабжения

Результаты моделирования представляют собой временные диаграммы переключения котлов и ТНУ, график изменения температуры воздуха внутри коттеджа, средней температуры воздуха, величин T_{\min}^k и $T_{\min}^{\text{ТНУ}}$ (пунктирная линия), T_{\max}^k и $T_{\max}^{\text{ТНУ}}$ (сплошная линия). Нормированные значения составляющих оптимального критерия управления составляют $Q_n=0,314$, $R_n=0,232$, $S_n=0,42$, $E_n=0,19$. Критерий управления для рассматриваемого интервала времени составил 0,457. Суммарные затраты на газ и электроэнергию за моделируемый интервал составляют 214,9 грн. Модель системы адаптируется к внешним возмущающим воздействиям. Управляющий алгоритм полностью удовлетворяет требованиям инженерной практики. Разработанная модель системы теплоснабжения показала, что управление по структуре не уступает качественно системе управления по параметрам, а также дает возможность задействовать все оборудование не в полной мере, сохраняя при этом ее работоспособность, при этом учитывает материальные затраты на работу системы.

Данная система позволяет получить оптимальные параметры управления при ограниченных ресурсах и изменении их стоимости, что делает возможным разработку долгосрочной технической системы с ограниченным использованием ресурсов, позволяющей работать в нормальном режиме при низкой достоверности исходных данных.

Литература

1. Емельянов, С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой / С.В. Емельянов. — М.: Наука, 1970. — 592 с.
2. Максимова, О.Б. Методика расчета критерия управления структурой сложных технических систем / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов, В.М. Тонконогий // Вісн. Сумськ. держ. ун-ту. Серія Техн. науки. — Суми, 2011. — № 3. — С. 19 — 23.
3. Бураков, М.В. Генетический алгоритм: Теория и практика: Учеб. пособие / М.В. Бураков — СПб: ГУАП, 2008. — 163 с.

References

1. Yemel'yanov, S.V. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy. [Automatic control systems with variable structure] / S.V. Yemel'yanov — Moscow: Nauka, 1970. — 592 p.
2. Maksimova, O. B. Metodika rascheta kriteriya upravleniya strukturoy slozhnykh tekhnicheskikh sistem [The method of computing the criterion for controlling the structure of complex engineering systems] / O. B. Maksimova, V. O. Davydov, V. M. Tonkonogiy // Visnik Sumskogo derzhavnogo universytetu. Seriya Tekhnichni nauky. [Bulletin of Sumy State University. Series Engineering Science.] — Sumi, 2011. — # 3. — pp. 19 — 23.
3. Burakov, M.V. Geneticheskiy algoritm: Teoriya i praktika: Ucheb. posob. [Genetic Algorithm: Theory and Practice: Teaching manual] / M.V. Burakov — St. Petersburg: GUAP [Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation], 2008. — 163 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Кравченко В.П.

Поступила в редакцию 23 мая 2013 г.

УДК 621.313.043.3:621.548

Г.А. Оборский, д-р техн. наук, проф.,
Б.А. Моргун, канд. техн. наук, доц.,
А.Н. Бундюк, канд. техн. наук, доц.,
Одес. нац. политехн. ун-т

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТАМИ РОТОРА

Г.О. Оборський, Б.О. Моргун, А.М. Бундюк. Побудова математичної моделі вітроелектричної установки як об'єкта управління обертами ротора. Розроблено математичну модель вітроелектричної установки, яка дозволяє оцінити вплив зовнішніх чинників на динаміку установки. Запропоновано електронну модель динаміки вітроелектричної установки в пакеті MATLAB.

Ключові слова: вітроелектрична установка, управління обертами ротора, повітряний потік, електронна модель, математична модель, вплив зовнішніх факторів.

Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, А.Н. Бундюк. Построение математической модели ветроэлектрической установки как объекта управления оборотами ротора. Разработана математическая модель ветроэлектрической установки, позволяющая оценить влияние внешних факторов на динамику установки. Предложена электронная модель ветроэлектрической установки в пакете MATLAB.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, управление оборотами ротора, воздушный поток, электронная модель, математическая модель, влияние внешних факторов.

G.A. Oborsky, B.A. Morgun, A.N. Bundyuk. Construction of a mathematical model of wind-electric installation as an object of rotor speed control. The mathematical model of a wind-electric installation, which allows to estimate the influence of external factors on dynamics of the installation, is developed. The electronic model of dynamics of wind-electric installation in MATLAB is proposed.

Keywords: wind-electric installation, rotor speed control, air flow, E-model, mathematical model, influence of external factors.

В соответствии с планами Украины по внедрению ветроэнергетики эксплуатируются ветроэлектрические станции (ВЭС) суммарной мощностью 38,37 МВт. К 2030 г. общая мощность