

УДК 697.34:004.942

А. М. Шурыгин, Е. Г. Авдюнин, В. С. Малышев, М. Н. Шурыгин

Моделирование элементов энергетических систем при транспортировании тепловой энергии

Теплоснабжение промышленных предприятий и объектов жилого сектора является в последние годы экономической и технической проблемой. Следует учитывать, что эффективность работы теплогенерирующего оборудования зависит не только от его технического совершенства, вида топлива, но и работы распределяющей сети, учитывающей тепловые, гидравлические потери, характеристик и режимов использования объектов теплоснабжения – зданий и технологических процессов. Возможность отпуска из системы теплоснабжения максимального расхода теплоты с учетом несовпадения максимумов и видов потребляемого ресурса у отдельных потребителей должна обеспечиваться правильным выбором набора оборудования источников энергии, а также пропускной способностью транспортных систем и возможностью ее регулирования. Крайне важно настраивать систему на эффективную работу не только на расчетном режиме (обычно на режиме максимальной нагрузки), но и всем диапазоне нагрузок, ибо расчетный режим во времени зачастую занимает относительно небольшую часть эксплуатационного времени. Таким образом, эффективность работы систем теплоснабжения во многом определяется используемым методом ее регулирования, включающим возможности регулирования работы основных агрегатов и элементов системы. В статье определены управляющие факторы, влияющие на эффективность работы системы. Представлены математические модели элементов системы, позволяющие регулировать количество отпущенной потребителям тепловой энергии в функции от режима работы системы. Отдельно рассмотрена и реализована математическая модель системы управления работой приводов электрических машин, используемых в системе.

Ключевые слова: тепловые сети, регулирование сетей, математическое моделирование работы сетей, оптимизация сетей.

Введение

Регулирование потребления теплоты в системах теплоснабжения предусматривается: центральное – на источнике теплоты, групповое – на центральном тепловом пункте и индивидуальное – на индивидуальных тепловых пунктах. Для водяных тепловых сетей применяется, как правило, качественное регулирование отпуска теплоты по нагрузке на отопление или по совмещенной нагрузке на отопление и горячее водоснабжение согласно графику изменения температуры воды в зависимости от температуры наружного воздуха.

Материалы и методы

В основу центрального качественного регулирования закладывается закон изменения отопительной нагрузки от температуры наружного воздуха [1]:

$$Q_o = \frac{\varepsilon_o W_o}{\frac{\varepsilon_o W}{q_o V} + 1} (\tau_{o1} - t_n), \quad (1)$$

где ε_o – безразмерная удельная тепловая нагрузка отопительной установки; W_o – водяной эквивалент сетевой воды, Вт/К; τ_{o1} – температура воды в подающей линии, °С; q_o – удельная тепловая нагрузка, Вт; V – объем здания; t_n – температура наружного воздуха.

Количественный метод регулирования отопительной нагрузки заключается в определении эквивалента расхода воды и ее температуры в обратной линии в зависимости от тепловой нагрузки. В связи с этим температура наружного воздуха, соответствующая точке излома $t_{н.т.и}$ температурного графика, и соответствующие ей $\tau_{o1т.и}$, $\tau_{o2т.и}$ температуры в подающей и обратной линиях, принимаются за расчетные [1]. Тогда относительная нагрузка при любом значении $t_n > t_{н.т.и}$ равна:

$$\bar{Q}_o = Q_o / Q_{o.т.и} = (t_{вп} - t_n) / (t_{вп} - t_{н.т.и}), \quad (2)$$

где Q_o – расчетная тепловая нагрузка на отопление; $Q_{o.т.и}$ – тепловая нагрузка на отопление в точке излома; $t_{вп}$ – расчетная температура воздуха внутри помещений.

Относительный расход воды на отопление из характеристического уравнения отопительных установок составит:

$$\bar{G}_o = G_o / G_{o.т.и} = \frac{\bar{Q}_o}{\frac{\Delta t_{o.т.и} (1 - \bar{Q}_o^{0,8})}{\delta t_{o.т.и} - 0,5 \theta_{o.т.и}}}, \quad (3)$$

где G_o – расчетный расход воды на отопление; $G_{o,т.и}$ – расход воды на отопление в точке излома; $\delta\tau_{o,т.и}$ – температурный напор между прямой и обратной магистралью в точке излома; $\theta_{o,т.и}$ – температурный напор между температурой у абонента и температурой в обратной магистрали в точке излома; $\Delta\tau_{o,т.и}$ – температурный напор между средней температурой воды у абонента и расчетной температурой внутреннего воздуха.

Температура воды на выходе из отопительной системы

$$\tau_{o2} = \tau_{o1,т.и} - (\tau_{o1,т.и} - \tau_{o2,т.и}) \times \frac{\overline{Q_o}}{G_o}. \quad (4)$$

Таким образом, для обеспечения расчетного расхода воды в тепловой сети и температуры воды на выходе от потребителя необходимо осуществлять регулирование угловой скорости электродвигателя насосной системы, подающей теплоноситель в тепловую сеть.

Результаты и обсуждение

Современные автоматизированные средства управления технологическими процессами в энергетических системах основаны на интеграции достижений в областях гидродинамики, электромеханики, микроэлектроники, компьютерной техники и представляют собой совокупности устройств непрерывного и дискретного действия. Поскольку для решения практических задач, связанных с проектированием, настройкой и эксплуатацией системы, необходима информация о ее статических и динамических характеристиках, возникает необходимость разработки имитационной модели, адекватно имитирующей формирование и обработку сигналов датчиков, используемых в системе управления и реально действующих внешних возмущений. Процесс разработки адекватной оригиналу имитационной модели неразрывно связан с решением задачи о выборе рационального метода моделирования, обеспечивающего высокое быстродействие, простоту построения и удобство применения модели для расчета переходных процессов.

При моделировании автоматизированных систем признано целесообразным использование численно-аналитического метода представления пространства состояний, позволяющего определить значения переменных в дискретные моменты времени t , соответствующие моментам переключения отдельных блоков системы. Данный метод исключает промежуточные вычисления без потери точности расчета [2].

В общем случае элемент непрерывного действия описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, которая, однако, может быть линеаризована и представлена матричным уравнением состояния [3]

$$\frac{d}{dt}[x] = [A][x] + [B][u], \quad (5)$$

где $[x]$ – вектор состояния; $[u]$ – вектор управления; $[A]$ – матрица состояния; $[B]$ – матрица управления.

Аналитическое решение уравнения состояния (5) имеет достаточно высокий уровень сложности и оказывается неудобным для моделирования. Поэтому при составлении исходного матричного уравнения моделируемого объекта используется допущение о том, что в течение малого времени шага расчета Δt компоненты вектора управления $[u]$ остаются неизменными. При этом получаемая система дифференциальных уравнений устройства непрерывного действия является по сути уравнением состояния

$$\frac{d}{dt}[x_r] = [A_r][x_r], \quad (6)$$

где $[x_r]$ – расширенный вектор состояния; $[A_r]$ – расширенная матрица состояния.

Решение уравнения состояния (6) в произвольный момент времени $t = t_{нач} + \Delta t$ имеет следующий вид [3]:

$$[x_r] = e^{[A_r]\Delta t} [x_{r,нач}], \quad (7)$$

где $[x_{r,нач}]$ – значение расширенного вектора состояния $[x_r]$ в начальный момент времени $t_{нач}$.

При моделировании вычисления организуются следующим образом. Состояние устройств дискретного действия определяется в момент времени $t = t_{нач}$ и принимается неизменным в течение приращения времени Δt [4]. На каждом расчетном интервале Δt сначала формируется расширенная матрица состояния $[A_r]$, определяются значения коэффициентов ее характеристического уравнения с применением метода Леверье, и рассчитываются ее собственные числа с использованием формул Берстоу и Ньютона [5]. Затем вычисляется переходная матрица состояния с применением теоремы Сильвестра [3]

$$e^{[A_r]\Delta t} = \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i \Delta t} \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^N ([A_r] - \lambda_j [I])}{\prod_{j=1, j \neq i}^N (\lambda_i - \lambda_j)}, \quad (8)$$

где N – порядок расширенной матрицы состояния $[A_r]$; λ – собственные числа матрицы $[A_r]$; $[I]$ – единичная матрица, и определяется расширенный вектор состояния $[x_r]$ по выражению (7).

Значение вектора $[x_r]$, полученное в момент времени $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$, и значение времени t принимаются начальными для расчета на следующем интервале. Затем процесс вычислений повторяется.

Таким образом, основной задачей при использовании метода пространства состояний является приведение исходных дифференциальных уравнений моделируемого устройства непрерывного действия к форме матричного уравнения состояния (6). Рассмотрим алгоритм решения задачи для синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), который применим в приводах энергетических систем при транспортировании тепловой энергии.

Уравнения СДПМ [6] в неподвижной относительно статора системе координат α, β , составленные при традиционных допущениях, имеют вид:

$$\begin{cases} u_\alpha = \frac{d\psi_\alpha}{dt} + R_s i_\alpha, \\ u_\beta = \frac{d\psi_\beta}{dt} + R_s i_\beta, \\ \psi_\alpha = L_s i_\alpha + \Psi_{\text{пм}} \cos \theta, \\ \psi_\beta = L_s i_\beta + \Psi_{\text{пм}} \sin \theta, \\ M_{\text{эм}} = \frac{m}{2} p_n \Psi_{\text{пм}} (i_\beta \cos \theta - i_\alpha \sin \theta), \\ \frac{1}{p_n} J_{\text{пр}} \frac{d\omega_p}{dt} = M_{\text{эм}} - M_c, \end{cases} \quad (9)$$

где $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta$ – напряжения, токи и потокосцепления обмоток статора по осям α, β ; R_s, L_s – активное сопротивление и полная индуктивность обмотки фазы статора; $\Psi_{\text{пм}}$ – потокосцепление, обусловленное постоянными магнитами; m – число фаз; p_n – число пар полюсов двигателя; θ – угол поворота ротора; ω_p – угловая скорость ротора двухполюсной машины ($\omega_p = d\theta/dt$); $J_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции.

На основе первых четырех уравнений системы (9) получаем:

$$\begin{cases} u_\alpha = L_s \frac{di_\alpha}{dt} + R_s i_\alpha + e_\alpha, \\ u_\beta = L_s \frac{di_\beta}{dt} + R_s i_\beta + e_\beta, \end{cases} \quad (10)$$

где e_α, e_β – противо- э.д.с. обмоток статора по осям α, β , определяемые как

$$\begin{cases} e_\alpha = (-\Psi_{\text{пм}}) \omega_p \sin \theta, \\ e_\beta = \Psi_{\text{пм}} \omega_p \cos \theta. \end{cases} \quad (11)$$

При использовании допущения, что в течение малого времени шага расчета Δt изменением угловой скорости ω_p можно пренебречь, выражения (10) и (11) записываются в виде единой системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = \frac{1}{L_s} (u_\alpha - R_s i_\alpha - e_\alpha), \\ \frac{di_\beta}{dt} = \frac{1}{L_s} (u_\beta - R_s i_\beta - e_\beta), \\ \frac{de_\alpha}{dt} = (-\omega_p) e_\beta, \\ \frac{de_\beta}{dt} = \omega_p e_\alpha. \end{cases} \quad (12)$$

Система уравнений (12) представляется в форме матричного уравнения состояния (5) и принимает вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & (-\omega_p) \\ 0 & 0 & \omega_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Полагая напряжения обмоток статора u_α, u_β неизменными в течение расчетного интервала Δt , запишем дифференциальные уравнения (12) в форме матричного уравнения (6), удобной для моделирования:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} & 0 & \frac{u_\alpha}{L_s} \\ 0 & \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} & \frac{u_\beta}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & (-\omega_p) & 0 \\ 0 & 0 & \omega_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Движение вала двигателя описывается линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{пр}} (M_{эм} - M_c), \quad (15)$$

где $\omega = p_n \omega_p$ – угловая скорость ротора многополюсной машины при допущении, что в течение малого времени шага расчета Δt изменением момента сопротивления M_c можно пренебречь, а изменение электромагнитного момента $M_{эм}$ по времени на расчетном интервале определяется как

$$(M_{эм} - M_{эм \text{ нач}}) / \Delta t,$$

где $M_{эм \text{ нач}}, M_{эм}$ – электромагнитные моменты двигателя в моменты времени $t = t_{\text{нач}}$ и $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$ соответственно, которые могут быть определены на основании уравнения для $M_{эм}$ системы (9) с учетом выражения (11).

Аналитическое решение уравнения (15) при вышеуказанных допущениях позволяет рассчитать угловую скорость двигателя ω в момент времени $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$ по выражению

$$\omega = \frac{\Delta t}{J_{пр}} (M_{эм \text{ нач}} + 0,5 M_{эм} - M_c) + \omega_{\text{нач}}, \quad (16)$$

где $\omega_{\text{нач}}$ – значение скорости ω в начальный момент времени $t_{\text{нач}}$.

Таким образом, формирование фазовых напряжений статора в функции угла поворот ротора θ в замкнутой системе управления позволяет регулировать угловую скорость ω в широком диапазоне.

Заключение

1. Качественная работа энергетических систем теплоснабжения во многом определяется правильным выбором оборудования источников энергии, оптимальной пропускной способностью транспортных систем и эффективностью использования топливно-энергетических ресурсов.

2. Выделены и определены основные управляющие факторы, влияющие на качество работы системы теплоснабжения, предложен количественный метод регулирования отопительной нагрузки.

3. Применение численно-аналитического метода пространства состояний позволяет при моделировании СДПМ, используемого в качестве силового элемента непрерывного действия замкнутой системы управления, получить статические и динамические характеристики СДПМ, сочетающие достоинства бесконтактных машин переменного тока с возможностью достижения широкого диапазона и высокой точности регулирования скорости ротора.

Библиографический список

1. Авдюнин Е. Г., Ершов Ю. Г., Шарафутдинова Н. К. Системы теплоснабжения промышленных предприятий. В 2 ч. Ч. 1. Тепловые сети и тепловые пункты систем теплоснабжения. Иваново : ИГЭУ, 2004. 108 с.

2. Шурыгин А. М. Разработка методов управления импульсно-фазовыми электроприводами с бесколлекторными двигателями для испытательной техники : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2007. 201 с.
3. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. М. : Наука, 1970. 620 с.
4. Шурыгин А. М., Шурыгин М. Н. Разработка объектно-ориентированных моделей приводных устройств // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии : XVI Бенардосовские чтения : материалы науч.-техн. конф., 27–29 мая 2015 г. Иваново : ИГЭУ, 2015. Т. 3 : Электротехника. С. 352–355.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров (определения, теоремы, формулы). М. : Наука : Главная редакция физико-математической литературы, 1973. 832 с.
6. Шурыгин А. М., Шурыгин М. Н., Масляева А. А. Математическое описание бесколлекторного двигателя в неподвижной системе координат // Состояние и перспективы развития электротехнологии : XVI Бенардосовские чтения : сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф. Иваново : ИГЭУ, 2011. Т. 3 : Электротехника. С. 154–156.

References

1. Avdyunin E. G., Ershov Yu. G., Sharafutdinova N. K. Sistemy teplosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Heating systems of industrial enterprises]. V 2 ch. Ch. 1. Teplovye seti i teplovye punkty sistem teplosnabzheniya. Ivanovo : IGEU, 2004. 108 p.
2. Shurygin A. M. Razrabotka metodov upravleniya impulsno-fazovymi elektroprivodami s beskollektornymi dvigatelyami dlya ispytatel'noy tehniky [Development of management methods of pulse-phase electric with brushless motors for testing equipment] : dis. ... kand. tehn. nauk. Ivanovo, 2007. 201 p.
3. Derusso P., Roy R., Klouz Ch. Prostranstvo sostoyaniy v teorii upravleniya [The state space control theory]. M. : Nauka, 1970. 620 p.
4. Shurygin A. M., Shurygin M. N. Razrabotka ob'ektno-orientirovannykh modeley privodnykh ustroystv [Development of object-oriented models of drive devices] // Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotehnologii : XVI Benardosovskie chteniya : materialy nauch.-tehn. konf., 27–29 maya 2015 g. Ivanovo : IGEU, 2015. V. 3 : Elektrotehnika. P. 352–355.
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov (opredeleniya, teoremy, formuly) [Mathematical handbook for scientists and engineers (definitions, theorems, formulas)]. M. : Nauka : Glavnaya redaksiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1973. 832 p.
6. Shurygin A. M., Shurygin M. N., Maslyayeva A. A. Matematicheskoe opisanie beskollektornogo dvigatelya v nepodvizhnoy sisteme koordinat [The mathematical description of brushless motor in the fixed coordinate system] // Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotehnologii : XVI Benardosovskie chteniya : sb. nauch. trudov mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Ivanovo : IGEU, 2011. V. 3 : Elektrotehnika. P. 154–156.

Сведения об авторах

Шурыгин Андрей Михайлович – ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, Россия, 153003; Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, канд. техн. наук, доцент

Shurygin A. M. – 34, Rabfakovskaya Str., Ivanovo, Russia, 153003; Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor

Авдюнин Евгений Геннадьевич – ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, Россия, 153003; Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, д-р техн. наук, профессор; e-mail: avdunin16@yandex.ru

Avdyunin E. G. – 34, Rabfakovskaya Str., Ivanovo, Russia, 153003; Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: avdunin16@yandex.ru

Малышев Владимир Сергеевич – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, факультет арктических технологий, кафедра энергетики и транспорта, канд. техн. наук, доцент, e-mail: malyshevvs@mstu.edu.ru

Malyshev V. S. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Faculty of Arctic Technologies, Department of Energy and Transport, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: malyshevvs@mstu.edu.ru

Шурыгин Михаил Николаевич – ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, Россия, 153003; Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, канд. техн. наук, доцент

Shurygin M. N. – 34, Rabfakovskaya Str., Ivanovo, Russia, 153003; Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor

A. M. Shurygin, E. G. Avdyunin, V. S. Malyshev, M. N. Shurygin

Modeling elements of energy systems for thermal energy transportation

Heating industrial facilities and the residential sector in recent years is the economic and technical challenge. It has been noted that the efficiency of the heat generating equipment depends not only on its sophistication, fuel type, but also on work of the distributing network taking into account the thermal, hydraulic losses, characteristics and modes of use of heating objects – buildings and technological processes. Possibility of supplying maximum heat flow from the heating system considering mismatch of highs and types of resources consumed from individual consumers should be provided by the right choice of energy equipment set, as well as bandwidth of transport systems and possibility of its regulation. It is important not just to configure the system to work effectively in the current mode (usually at the maximum load), but in the entire load range, as the calculated mode often takes a relatively small portion of the operating time. Thus, the efficiency of heating systems is largely determined by the method used for its control, including the possibility of regulating the main units and elements of the system. The paper considers the factors affecting the system efficiency. Mathematical models of the system elements allowing adjust the amount of released heat energy for consumers have been presented. Separately the mathematical model of the control system of electric drive vehicles used in the system has been considered and implemented.

Key words: heat network, network regulation, mathematical modeling of network, network optimization.