

УДК 658.264:004.4

КРИТЕРИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ КОМПЛЕКСАХ МЕГАПОЛИСОВ

Крицкий А.Б., Дементьев Ю.Н.

*ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: tpu@tpu.ru*

Рассматриваются теплоснабжающие комплексы мегаполисов (ТКМ). Анализируются свойства и характеристики ТКМ как больших объектов управления и контроля. Предлагаются решения проблемы оптимизации режимов работы ТКМ на основе гео-информационных программно-имитационных комплексов интегрированных с SCADA-системами, частотно-регулируемых асинхронных электроприводов насосных агрегатов и специальных подходов к процессам управления электротехническими комплексами ТКМ на основе единой базы данных. Определяется, какие существуют возможности достижения требуемого функционирования ТКМ, каким образом можно достичь подобного состояния, которое характеризуется как функционал эталонного режима – FER. Определяются критерии энергоэффективности ТКМ. Первый критерий оценивает состояние технических координат ТКМ. Второй критерий оценивает минимизацию энергетических затрат для достижения FER. Оцениваются возможные результаты оптимизации критериев в различных по технической оснащенности вариантах ТКМ.

Ключевые слова: теплоснабжающий комплекс, управление, наладка, эксплуатация, моделирование, решения, электропривод, насосные агрегаты, критерии, информационные технологии, многосвязные объекты, системы

CRITERIA OF POWER EFFICIENCY IN HEATSUPPLYING COMPLEXES OF MEGALOPOLISES

Kritskiy A.B., Dementev Y.N.

FGBOU «National research Tomsk polytechnical university», Tomsk, e-mail: tpu@tpu.ru

Heatsupplying complexes of megalopolises (TKM) are considered. Properties and TKM characteristics as big objects of management and control are analyzed. Solutions of the problem of optimization of operating modes of TKM on a basis geo-information program and imitating complexes integrated with SCADA-systems, frequency adjustable asynchronous electric drives of pump units and special approaches to management of the TKM electrotechnical complexes on the basis of a uniform database are offered. Will be defined what there are possibilities of achievement of demanded functioning of TKM how it is possible to reach a similar condition which is characterized as a functional of a reference mode – FER. Criteria of power efficiency of TKM are defined. The first criterion estimates a condition of technical coordinates of TKM. The second criterion estimates minimization of power expenses for achievement of FER. Possible results of optimization of criteria in various on technical equipment TKM options are estimated.

Keywords: a heatsupplying complex, management, adjustment, operation, modeling, decisions, the electric drive, pump units, criteria, information technologies, multicoherent objects, systems

Системы теплоснабжения во многом определяют жизнеспособность мегаполисов в странах с резко континентальным климатом. Структурная сложность теплоснабжающих комплексов мегаполисов (ТКМ) в первом приближении прямо пропорциональна количеству народонаселения [1, 2]. Очевидно, что подобные комплексы относятся к классу больших распределённых систем. Основные элементы ТКМ: источники теплоснабжения (ИТ), магистральные тепловые сети (МТС), насосные станции (НС), индивидуальные и центральные тепловые пункты (ИТП и ЦТП).

Режимы работы ИТ определяются случайным характером изменения сезонных атмосферных явлений, прогнозируемых с достаточной высотой вероятностью на основе многолетних наблюдений и по данным анализа ежедневных наблюдений и измерений. Зависимости, характеризующие ат-

мосферные явления, исследованы многими учеными и могут рассматриваться как случайные процессы с нормальными законами распределения [3, 4]. Это позволяет в процессах исследования и разработки систем автоматического управления, регулирования и контроля машин, агрегатов, установок и технологических процессов ТКМ использовать методы анализа и синтеза стохастических систем, в том числе для: статистической оценки реально измеряемых сигналов (давлений, расходов и температуры теплоносителей, частот вращения валов двигателей и насосов, токов, напряжений и мощностей двигателей и преобразователей); оценки ненаблюдаемых сигналов в тепловых сетях, например с помощью метода математического расхода меромера [5], и/или ненаблюдаемых сигналов с помощью наблюдателей (фильтров Калмана – Бьюси) в переходных режимах электроприводов

насосных агрегатов (НА); синтеза оптимальных управлений, обеспечивающих минимизацию энергетических затрат и динамической нагруженности насосных агрегатов. Оценка результатов работы ТКМ различных городов показывает [3, 4], что наблюдается существенное отклонение (как в положительную, так и в отрицательную сторону) теплотребления абонентов от требуемых норм.

Очевидно, что ТКМ работоспособны, хотя многие из них малоэффективны и имеют большие энергетические потери практически во всех технологических частях. Основная причина подобных фактов заключается в трудности управления гигантскими по своей размерности системами теплоснабжения мегаполисов традиционными средствами, на которые делал упор основоположники теории теплоснабжения мегаполисов.

Поэтому одним из основных направлений, позволяющих найти решения задачи обеспечения качественного теплоснабжения, является повышение уровня информативности системы управления ТКМ, использование новых подходов к вопросам построения систем управления ТКМ на основе современной теории управления [6], в которой объекты, подобные ТКМ, относятся к классу многосвязных, распределенных, стохастических, а также в совершенствовании оснащенности и режимов работы электротехнических комплексов ТКМ, начиная с электроприводов насосных агрегатов и регулирующих органов на магистральных участках тепловой сети и заканчивая уровнем SCADA-систем.

При этом принципиально важно определить, какие существуют возможности достижения требуемого функционирования ТКМ, каким образом можно достичь подобного состояния, которое характеризуем как функционал эталонного режима-FER. FER зависит от:

- свойств и характеристик элементов ТКМ как объектов управления; вариантов состояний ТКМ;

- экономических возможностей (Э) конкретных ТКМ; отклонения фактических координат ТКМ $h(t_i)$ в узлах и на участках от допустимых значений $h(t_i)$;

- алгоритмов управления электроприводами в статических и динамических режимах (применительно к электроприводу насосных агрегатов).

С учетом всех рассмотренных выше обстоятельств, свойств, характеристик и перспектив развития ТКМ целью статьи является определение возможных форм представления критериев работы ТКМ и вариантов их оптимизации.

Системы теплоснабжения мегаполисов как объекты управления и контроля

Повышение эффективности и энергосбережения существующих структур ТКМ возможно путем постепенного внедрения единого информационного пространства, системы поддержки принятия решений (СППР), системы оперативного контроля и управления насосными агрегатами с частотно-управляемыми преобразователями, эвристической системой обучения и контроля знаний производственных служб ТКМ, интеграции SCADA-систем с геоинформационными системами (ГИС) [2].

Теплоснабжающие комплексы мегаполисов как многосвязные объекты объединены единой базой данных – информационным пространством, имеют свойства и характеристики, определяющие форму критериев оптимизации. Эти свойства и характеристики могут быть формализованы в виде следующих положений:

- Изменения атмосферных явлений, рассматриваемые как вектор основного возмущения $F(t)$, действующего на ТКМ, определяются в первом приближении характеристикой независимой переменной – температурой наружного воздуха $T(t)$.

- В районах с преобладающей отопительной нагрузкой центральное регулирование отпуска теплоты целесообразно осуществлять по эквивалентной наружной температуре (по температурному графику качественного регулирования отопительной нагрузки).

- В режимах пуска, остановки и аварийных отключений насосных агрегатов в тепловых сетях возможны переходные режимы, в том числе экстремальные, типа «гидравлические удары».

- Параметры моделей динамических режимов ТКМ (например, магистральных тепловых сетей) существенно зависят от их конструктивных особенностей. Тепловые сети ТКМ относятся к классу нестационарных и нелинейных объектов управления. Для целей синтеза и анализа САУ ТКМ можно использовать стационарные и квазистационарные линеаризованные модели.

Исследования динамических режимов элементов ТКМ проводились в работах [2–5], из которых следует, что динамические процессы ТКМ относятся к классу нестационарных случайных процессов и могут быть приведены к стационарным путем вычитания из исходных процессов их математических ожиданий. Некоторые элементы ТКМ, например трубопроводы, могут рассматриваться как объекты управления с запаздыванием. В работах [6–9], в динамических режимах выходные координаты подобного распределенного объек-

та (с параметрами: расход (Q), давление (p) и температура (t) – $\{h(t)\}$) связаны со скоростью перемещения теплоносителя и протяженностью трубопровода интегральным соотношением

$$h(t) = \{t \text{ } ^\circ\text{C}, p, Q\},$$

$$h(t) = f \left(\int_{t-\tau_p}^{\tau_p} V_n(t) dt \right)$$

и описываются дифференциальными уравнениями

$$\left. \begin{aligned} dh / dt = f(v_n(t) - v_n(t - \tau_p), v_n(t) = \phi_{v_n}(t)), \\ \text{при } \tau_p \leq t \leq t_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\tau_p = 2\pi i_p / \omega_p(t) \cdot i_3, \quad (2)$$

где $v_n(t)$, $\omega_p(t)$ – линейная скорость теплоносителя и угловая скорость вала двигателя насосного агрегата; τ_p – время запаздывания, равное времени, в течение которого поток теплоносителя проходит расстояние L между выходом насоса (коллектором) и точкой измерения координаты; i_p – коэффициент передачи редуктора насоса; i_3 – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства теплоносителя; $\phi_{v_n}(t)$ – начальная функция, определяющая состояние насосного агрегата в моменты времени, предшествующие началу интервала управления.

Дифференциальное уравнение (1) относится к классу дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом.

Приведенный выше анализ свойств ТКМ и внешней среды – атмосферных явлений позволяет сделать следующие, важные выводы:

- при исследовании динамических режимов ТКМ его следует рассматривать как объект, подверженный действию случайных и детерминированных сигналов;

- динамические свойства ТКМ, его элементов и устройств могут быть описаны для целей синтеза алгоритмов управления теплопотреблением (расходом, давлением и температурой теплоносителя и электротехнические параметры электроприводов), линеаризованными стационарными (квазистационарными) моделями, учитывающими нестационарность, нелинейность и наличие запаздывающих составляющих в векторе $h(t)$.

Критерии эффективности ТКМ

Глобальной целью управления является получение экономического эффекта – \mathcal{E} от ТКМ за период отопительного сезона, а для потребителей тепловой энергии – в получении требуемого количества тепловой энергии по цене, установленной владельцем теплоэнергетической компании.

Если $\bar{\mathcal{E}}$ является случайной величиной, равной разности между доходом $\bar{\mathcal{E}}_d$ и за-

тратами $\bar{\mathcal{E}}_z$, то с вероятностью λ экономический эффект \mathcal{E} определяется в некотором доверительном интервале I_λ

$$P((\mathcal{E} - \bar{\mathcal{E}}) < \varepsilon_\lambda) = \lambda, \quad (3)$$

где $\bar{\mathcal{E}}$ – несмещенная оценка \mathcal{E} , которая определяется в виде математического ожидания $M(\mathcal{E}) = \bar{\mathcal{E}}$, у.е.

Диапазон возможных значений \mathcal{E} при замене ее на $\bar{\mathcal{E}}$ будет равен $\pm\varepsilon$ и выражение (3) можно будет переписать в виде

$$P((\bar{\mathcal{E}} - \varepsilon_\lambda) < \mathcal{E} < (\bar{\mathcal{E}} + \varepsilon_\lambda)) = \lambda. \quad (4)$$

Из (4) следует, что значение \mathcal{E} с вероятностью λ попадает в интервал

$$I_\lambda = \{(\bar{\mathcal{E}} - \varepsilon_\lambda), (\bar{\mathcal{E}} + \varepsilon_\lambda)\}. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае величина \mathcal{E} неслучайна, однако случайным является величина интервала I_λ , положение интервала I_λ , которое определяется центром $\bar{\mathcal{E}}$, и длина интервала, равная $2\varepsilon_\lambda$.

Тогда следует вывод: если ТКМ весь отопительный период T_d обеспечивает теплом потребителей, то экономический эффект можно определить по следующему выражению:

$$\mathcal{E} = \bar{\mathcal{E}}_d - \bar{\mathcal{E}}_z, \text{ у.е.} \quad (6)$$

Причем увеличение \mathcal{E} возможно путем минимизации затрат и увеличения доходов, однако в любом случае экономический эффект – \mathcal{E} – является случайной величиной и должен соответствовать условию (5).

Если существует возможность контролировать количество тепловой энергии на коллекторах ТЭЦ – $Q_{\text{тэц}}$, в местах распределения тепла – $Q_{\text{цпп}}$ и непосредственно в абонентских пунктах потребителей – $Q_{\text{ап}}$, то

в этом случае можно потери тепла определить по следующим зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n Q_{ТЭЦ_i} - \sum_{j=1}^m Q_{ЦТП_j} &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m Q_{ТЭЦ-ЦТП_{ij}}, \\ \sum_{j=1}^m Q_{ЦТП_j} - \sum_{k=1}^p Q_{АП_k} &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p Q_{ЦТП-АП_{jk}}, \end{aligned} \right\} (7)$$

где $\sum_{i=1}^n Q_{ТЭЦ_i}$ – количество тепловой энергии

на коллекторах ТЭЦ; $\sum_j Q_{ЦТП_j}$ – количество

тепла, транспортируемое по тепловым магистральным сетям для распределения на

ЦТП; $\sum_{k=1}^p Q_{АП_k}$ – количество тепла, потребляемое абонентами ТКМ; $\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m Q_{ТЭЦ-ЦТП_{ij}}$ – по-

тери тепловой энергии в процессе передачи её от ТЭЦ к ЦТП; $\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p Q_{ЦТП-АП_{jk}}$ – потери

тепловой энергии в процессе передачи её от ЦТП к потребителям (в абонентские пункты – АП).

Как видно из зависимостей (7), повышение эффективности ТКМ возможно путем минимизации потерь $\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m Q_{ТЭЦ-ЦТП_{ij}}$ и

$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p Q_{ЦТП-АП_{jk}}$.

Так как в ТКМ производится периодическое сканирование состояния магистральных тепловых сетей SCADA-системой, то состояние технических координат возможно оценить критерием, который определяется следующим образом:

$$CF_1 = \{ |h(t_i) - h_{доп}(t_i)| \leq \Delta h(t_i) \}, \quad (8)$$

где $\Delta h(t_i)$ – отклонения фактических координат ТКМ в узлах и на участках от допустимых значений $h_{доп}(t_i)$. Фактические $h(t_i)$ измеряются и архивируются SCADA-системой [2]. Допустимые $h_{доп}(t_i)$ рассчитываются, хранятся и извлекаются из единой базы данных (ЕБД). При превышении отклонений $\Delta h(t_i)$ система планирования и принятия решений анализирует состояние ТКМ и определяет необходимые воздействия на исполнительные механизмы магистральной тепловой сети и на электроприводы насосных агрегатов, например переход к новой скорости вращения вала насоса с целью изменения производительности насоса.

Критерии оптимального управления электроприводами, обеспечивающие мини-

мизацию энергетических затрат, требуемые динамические и статические характеристики, формируются по следующим зависимостям:

$$CF_2 = \{ V_{nc} = \text{const}, \rho_H(t) = \text{const};$$

$$0 < T_{j_{\Sigma}} < T_{j_{\text{max_онт}}};$$

$$Q_{ncj} = k \cdot V_{nc}(t) \cdot T_j = \left| \bar{Q}_{ncj} \pm \Delta Q_{nc} \right|;$$

$$QG \leq \left| \overline{QGZ} \pm \Delta QGZ \right|; \quad U(t) \leq U(t)_{\text{max}};$$

$$\dot{Z}(t) = f(Z(t), U(t), Z_3(t), f(t));$$

$$Z(t) = f(Y(t), U(t));$$

$$Y(t) = [I_{nc}, I_{Пр}, \Phi_{Пр}, U_{Пр}, \{h(t)\}, \omega_{nc}];$$

$$Z_3(t) = [Q_{ncj}, V_{nc}, T_{j_{\text{max_онт}}}, Y_3(t), \overline{QGZ}], \quad (9)$$

где $Y(t)$, $U(t)$ – векторы реально измеряемых координат и управляющих воздействий электроприводов НА ТКМ; I_{nc} и $I_{Пр}$, $\Phi_{Пр}$ и $U_{Пр}$ – соответственно токи статорных обмоток асинхронных двигателей и частотных преобразователей, частота и выходное напряжение преобразователей; $h(t) = \{h(t) = \{\text{давление, температура, расход теплоносителя}\} –$ вектор параметров ТКМ; ω_{nc} – угловая частота вращения вала электродвигателя насосного агрегата; $T_{j_{\Sigma}}$ – время пуска/остановки электроприводов НА; $T_{j_{\text{max_онт}}}$ – формируемое супервизорной системой управления электротехнического комплекса ТКМ значение максимального времени включения электроприводов НА из условия обеспечения глобальной целевой функции (6); $Z(t)$, $Z_3(t)$ – векторы фактических и заданных выходных измерений сигнала систем управления электроприводов НА; Q_{ncj} , V_{nc} , $Y_3(t)$, QGZ – формируемые заданные значения основных координат статических и динамических режимов электроприводов насосных агрегатов.

Выводы

1. Определен функционал эталонного режима, позволяющий обеспечить качественное теплоснабжение мегаполиса.

2. Определен критерий экономической эффективности функционирования ТКМ. Установлено, что повышение экономической эффективности возможно минимизацией его тепловых потерь.

3. Определен критерий состояния технологических координат электроприводов насосных агрегатов ТКМ. Установлены зависимости, необходимые для оптимального управления электроприводом.

Список литературы

1. Фешин Б.Н., Крицкий А.Б. и др. Информационно-управляющие технологии оптимизации функционирования теплоснабжающих комплексов // Вестник автоматизации. – Алматы, 2013. – № 1 (39). – С. 36–39.

2. Крицкий Б.Н., Фешин Б.Н. Энергосберегающие технологии теплоснабжающих комплексов мегаполисов средствами частотно управляемых электроприводов насосных станций // Электроприводы переменного тока: труды международной пятнадцатой научно-технической конференции. 12–16 марта 2012 г. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. – С. 207–210.

3. Отчет НИР. № гос. регистрации 0112РК02313. «Исследование и разработка иерархических информационно-управляющих технологий оптимизации функционирования теплоснабжающих комплексов мегаполисов» – Караганда: КарГТУ, 2012. – 226 с.

4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. – 8-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с.

5. Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М. и др. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.

References

1. Feshin B.N., Kritsky A.B., etc. Manment-information technologies of optimization of functioning of heatsupplying complexes. Almaty. Magazine «Messenger of automation», no. 1 (39), March, 2013. pp. 36–39.

2. Hasilev V.Ya., Merenkov A.P., Kaganovich B.M., etc. Methods and algorithms of calculation of thermal networks. M.: Energy, 1978. 176 p.

3. Kritsky B.N., Feshin B.N. Energy saving technologies of heatsupplying complexes of megalopolises means it is frequency operated electric drives of pump stations. Works of the international fifteenth scientific and technical conference «Electric drives of an alternating current». On March 12–16 2012. Yekaterinburg: ФГАОУ ВПО «URFA name of the first President of Russia B.N. Yeltsin», 2012. 207–210 p.

4. NIR report. No. state. registration 0112PK02313. «Research and development of hierarchical manment-information technologies of optimization of functioning of heatsupplying complexes of megalopolises». Karaganda. КарГТУ. 2012. 226 p.

5. Sokolov E.Y. Central heating and thermal networks: the textbook for higher education institutions. 8 edition. M.: MEI publishing house, 2006. 472 p.

Рецензенты:

Брейдо И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда;

Хомченко В.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и робототехника», Омский государственный технический университет, г. Омск.

Работа поступила в редакцию 23.09.2014.