

УДК 697.34: 697.97-5

Махотіло Костянтин Володимирович, канд. техн. наук., старш. наук. співроб., професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707-65-45, email: kvmahotilo@gmail.com, (ORCID iD: 0000-0001-7081-071X)

СТАБІЛІЗАЦІЯ СЕРЕДНЬОГОДИННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗВОРОТНОГО ТЕПЛОНОСІЯ НА ТЕЦ

Запропоновано методику побудови нейромережевого регулятора середньогодинної температури теплоносія на ТЕЦ для компенсації впливу навантаження гарячого водопостачання. Синтезовано нейрорегулятор для Харківської ТЕЦ-5. Аналіз якості управління показав, що він забезпечує заданий добовий відпуск тепла і компенсує коливання середньогодинної температури зворотного теплоносія на ТЕЦ.

Ключові слова: нейрорегулятор, температура теплоносія, ТЕЦ, централізоване теплопостачання

Махотило Константин Владимирович, канд. техн. наук., ст. науч. сотр., профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 707-65-45, email: kvmahotilo@gmail.com, (ORCID iD: 0000-0001-7081-071X)

СТАБИЛИЗАЦИЯ СРЕДНЕЧАСОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАТНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТЭЦ

Предложена методика построения нейросетевого регулятора среднечасовой температуры теплоносителя на ТЭЦ для компенсации влияния нагрузки горячего водоснабжения. Синтезирован нейрорегулятор для Харьковской ТЭЦ-5. Анализ качества управления показал, что он обеспечивает заданный суточный отпуск тепла и компенсирует колебания среднечасовой температуры обратного теплоносителя на ТЭЦ.

Ключевые слова: нейрорегулятор, температура теплоносителя, ТЭЦ, централизованное теплоснабжение

Makhotilo Konstantin Vladimirovich, PhD, SRF, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, Frunze St., 21, Kharkiv, Ukraine, , 61002, tel. +38 (057) 707-65-45, email: kvmahotilo@gmail.com, (ORCID iD: 0000-0001-7081-071X)

STABILIZATION OF THE CHP-PLANT RETURN WATER HOURLY TEMPERATURE

The method of creation of CHPP supply water hourly temperature neurocontroller to compensate the hot tap water load is proposed. The neurocontroller for Kharkiv CHPP-5 was synthesized. Control quality analysis showed that it provides a reference daily heat output and compensates fluctuations of return water hourly temperature on the CHPP.

Keywords: neurocontroller, supply water temperature, CHP-plant, District Heating

Введение

В Украине системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) страдают не только от физического износа оборудования и инфраструктуры, но и от устаревших неэффективных принципов управления. Действующий способ центрального качественного регулирования отпуска тепла по температурному графику (ТГ) рассчитан на то, что в тепловых сетях поддерживается стационарный тепловой режим. Тепловая инерция зданий делает это допущение справедливым для нагрузки отопления, но нагрузка горячего водоснабжения (ГВС) носит принципиально переменный характер. Ее доля составляет от 10 до 20 % общей нагрузки СЦТ, и поэтому она оказывает существенное влияние на эффективность работы системы.

Для ТЭЦ это влияние проявляется в утреннем повышении температуры обратного теплоносителя [1]. На Харьковской ТЭЦ-5 его величина составляет около 5 °С, т. е. 20 % от всего диапазона изменения температуры обратного теплоносителя за отопительный сезон. Утреннее повышение температуры теплоносителя вызвано ночным снижением потребления горячей воды. Оно показывает, что ночью в квартиры потребителей поступает перегретый теплоноситель, вызывая перетоп. Не отдав тепло, теплоноситель интенсивнее теряет его по пути назад. Но и вернувшись на ТЭЦ в период утреннего пика в энергосистеме, он

продолжает негативно влиять на ее экономическую эффективность. Например, при работе по тепловому графику прирост температуры обратного теплоносителя на 5 °С снижает электрическую мощность блоков Т-100-130 на 7 %. А при работе по электрическому графику – увеличивает удельный расход топлива на производство электроэнергии на 5 %. Поэтому разработка методов компенсации колебаний температуры обратного теплоносителя за счет централизованного управления на ТЭЦ среднечасовой температурой прямого теплоносителя является актуальной научной задачей.

При выборе способа управления среднечасовой температурой теплоносителя необходимо учесть следующие особенности СЦТ как объекта управления:

- объект содержит запаздывание, как по входу, так и по выходу;
- определяющее влияние на выход объекта оказывают внешние факторы, зависящие от времени суток;
- инерционность объекта превышает периодичность изменения внешних факторов;
- объект относится к типу «много входов – один выход».

Построение предсказывающей обратной модели такого объекта с точностью, требуемой для замкнутой системы управления, крайне сложно. Поэтому наиболее простым и надежным выбором является создание разомкнутой системы управления с нейросетевым регулятором температуры теплоносителя (НРТТ), осуществляющим программное управление по времени суток с учетом действия внешних факторов. На рис. 1 представлена общая схема разомкнутой системы управления с НРТТ.

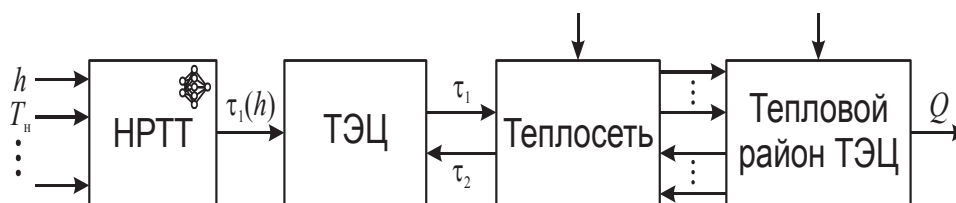


Рис. 1. Разомкнутая система управления температурой теплоносителя

В работах [1,2] предложены методики синтеза НРТТ, обеспечивающего стабилизацию температуры обратного теплоносителя на среднесуточном уровне. Однако их недостатком является наличие резких скачков температуры обратного теплоносителя при переходе между сутками, отличающимися величиной наружной температуры. В данной работе рассматривается усовершенствованный подход к решению задачи стабилизации температуры теплоносителя на ТЭЦ, обеспечивающий более гладкое управление.

Постановка задачи синтеза НРТТ

Главной целью управления для НРТТ является обеспечение заданного суточного отпуска тепла в СЦТ:

$$Q(d) = Q^*(d), \quad (1)$$

где Q и Q^* – фактический и заданный суточный отпуск тепла от ТЭЦ, соответственно;
 d – порядковый номер суток.

В такой постановке НРТТ полностью заменяет ТГ и может использоваться для преобразования заданного суточного отпуска тепла (рассчитанного по ТГ или по другому закону управления) в суточный график среднечасовой температуры прямого теплоносителя. Второй целью управления является стабилизация среднечасовой температуры обратного теплоносителя на ТЭЦ. Ранее в [1, 2] она формулировалась как равенство температуры обратного теплоносителя своему среднесуточному значению, что допускало возникновение скачков при переходе между сутками. Чтобы избежать этого, предлагается сформулировать цель управления как равенство температуры обратного теплоносителя своему центрированному простому скользящему среднему за 24 часа:

$$\tau_2(h) = \tilde{\tau}_2(h); \quad (2)$$

$$\tilde{\tau}_2(h) = \frac{1}{24} \sum_{i=-11}^{12} \tau_2(h+i),$$

где $\tau_2(h)$ – среднечасовая температура обратного теплоносителя на ТЭЦ;
 h – час суток.

При управлении температурой теплоносителя на ТЭЦ должны выполняться технологические ограничения на величину:

$$\tau_1^{\min} \leq \tau_1(h) \leq \tau_1^{\max}, \quad (3)$$

и скорость изменения управляющего воздействия:

$$|\tau_1(h) - \tau_1(h-1)| \leq \overline{\Delta\tau}_1. \quad (4)$$

Здесь $\tau_1(h)$ – среднечасовая температура прямого теплоносителя на ТЭЦ;

τ_1^{\min} и τ_1^{\max} – нижняя и верхняя границы диапазона реализуемости по τ_1 , соответственно;

$\overline{\Delta\tau}_1$ – максимально допустимое часовое изменение температуры прямого теплоносителя.

Для достижения поставленных целей управления закон регулирования НРТТ должен учитывать текущий час суток h и среднесуточную наружную температуру воздуха T_n . Причем для учета динамики изменения наружной температуры необходимо рассматривать не только прогноз наружной температуры на текущие сутки $T_n(d)$, но и фактическое значение сутки назад $T_n(d-1)$, и прогноз на сутки вперед $T_n(d+1)$.

Одним из главных факторов, влияющих на колебания температуры обратного теплоносителя на ТЭЦ, является разбор горячей воды на теплораспределительных станциях. Поэтому закон регулирования НРТТ должен учитывать различие нагрузки ГВС в рабочие и выходные дни. Так как в СЦТ присутствует значительная транспортная задержка, для этого предлагается использовать показатель $\gamma_c(d)$, учитывающий не только тип текущего дня недели, но и предыдущего:

$$\gamma_c(d) = \begin{cases} 0, & \text{при } \gamma_\tau(d) = 1, \gamma_\tau(d+1) = 1; \\ 1, & \text{при } \gamma_\tau(d) = 1, \gamma_\tau(d+1) = 0; \\ 2, & \text{при } \gamma_\tau(d) = 0, \gamma_\tau(d+1) = 0; \\ 3, & \text{при } \gamma_\tau(d) = 0, \gamma_\tau(d+1) = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где γ_τ – тип дня недели, определяемый по правилу:

$$\gamma_\tau(d) = \begin{cases} 0, & \text{если } d \text{ – нерабочий или предпраздничный день;} \\ 1, & \text{если } d \text{ – ординарный рабочий день.} \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, для НРТТ предлагается следующий вид закона управления:

$$\tau_1(h) = \text{wMLP}(h, \gamma_c(d), Q^*(d), T_n(d), T_n(d+1), T_n(d-1)), \quad (7)$$

где wMLP – преобразование вход-выход трехслойного перцептрона с активационной функцией нейронов скрытого слоя типа эрмитова функция первого порядка (вейвлет).

Обозначим нейрорегулятор (7) как НРТТ-3.

Для синтеза НРТТ-3 использован функционал качества управления F в виде свертки невязок по выполнению критериев (1), (2) и двух штрафных функций за нарушение ограничений (3), (4):

$$F \rightarrow \min ;$$

$$F = c_Q f_Q + c_\tau f_\tau + c_p f_p ; \tag{8}$$

$$f_Q = \sum_d |Q(d) - Q^*(d)| ; \quad f_\tau = \sum_{d,h} |\tau_2(h) - \tilde{\tau}_2(h)| ; \quad f_p = \sum_{d,h} (p_1(h) + p_2(h)) ;$$

$$p_1(h) = \begin{cases} \tau_1(h) - \tau_1^{\max}, & \text{при } \tau_1(h) > \tau_1^{\max} \\ \tau_1^{\min} - \tau_1(h), & \text{при } \tau_1(h) < \tau_1^{\min} \\ 0 & \end{cases} ;$$

$$p_2(h) = \begin{cases} |\tau_1(h) - \tau_1(h-1)| - \overline{\Delta\tau}_1, & \text{при } |\dots| > \overline{\Delta\tau}_1 \\ 0 & \end{cases} .$$

Условия моделирования работы НРТТ

На рис. 2 представлена схема алгоритмического полигона, сформированного для синтеза НРТТ. Он включает в себя модель прогноза температуры обратного теплоносителя (МТОТ), сценарии изменения условий моделирования, метеорологических условий, режимов работы теплосети, нагрузку ГВС и отопления.

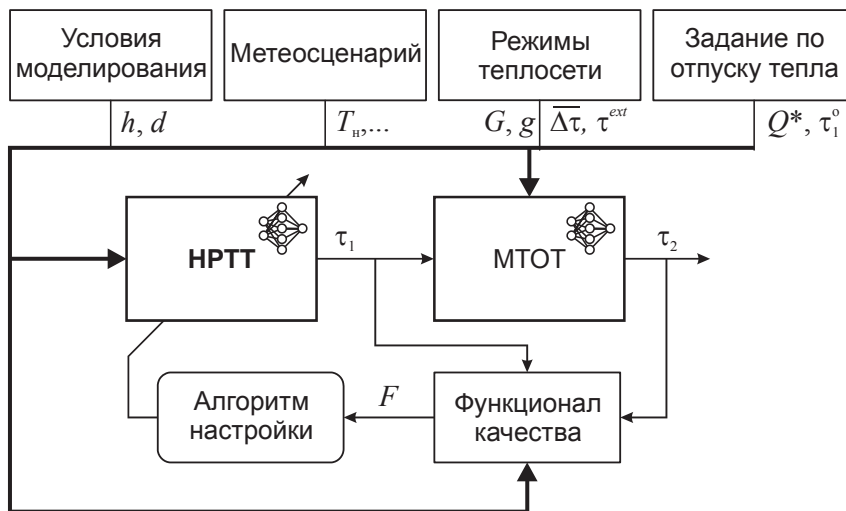


Рис. 2. Алгоритмический полигон для моделирования работы и синтеза НРТТ

Моделирование режимов работы СЦТ и синтез НРТТ проводится на примере Харьковской ТЭЦ-5 и ее теплового района. В качестве модели объекта управления используется предложенная в [3] МТОТ-2 для Харьковской ТЭЦ-5.

Сценарий изменения T_n выбран таким, чтобы отразить наиболее экстремальные режимы работы СЦТ и охватить диапазон значений $T_n \in [-15, +5]$, наиболее характерный для отопительного сезона в Харькове в последние 10-15 лет. Он включает участки постоянства наружной температуры на разных уровнях, а также участки постепенного и резкого потепления и похолодания. Для оценки эффективности управления использован

тестовый метеосценарий, основанный на реальном фрагменте истории изменения погоды в декабре-январе. Тренировочный и тестовый метеосценарии представлены на рис. 3а.

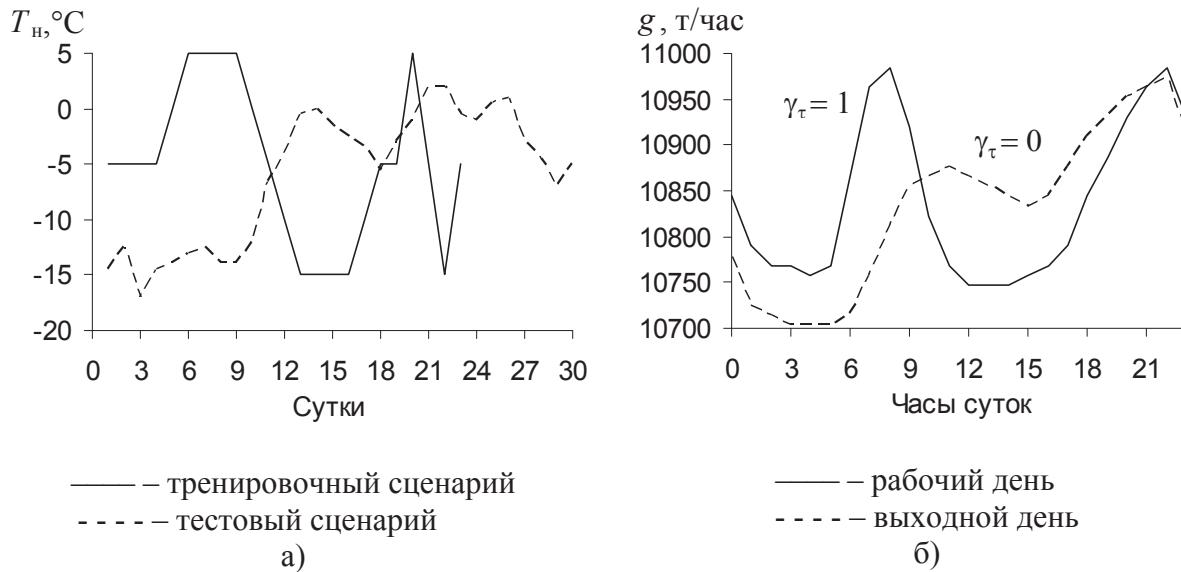


Рис. 3. Сценарии изменения метеоусловий (а) и расхода теплоносителя (б)

Для расчета используемой в МТОТ-2 эквивалентной среднечасовой наружной температуры принято отклонение максимальной и минимальной за сутки наружной температуры от среднего значения на 2°C. Среднесуточная скорость ветра принята равной 3,9 м/с, облачность – 85%. Продолжительность светлого времени дня с учетом гражданских сумерек – 10,5 ч. Эти значения характерны для середины отопительного сезона. Задание по суточному отпуску тепла Q^* рассчитывается на основании ТГ «130/60»:

$$Q^* = k_Q Q^0 = k_Q c_B G (\tau_1^0(T_H) - \tau_2^0(T_H)), \tag{9}$$

где k_Q – коэффициент изменения суточного отпуска тепла, $k_Q \in [0,75; 0,875; 1]$;

c_B – теплоемкость воды; G – суточный расход теплоносителя на ТЭЦ;

τ_1^0 и τ_2^0 – температура прямого и обратного теплоносителя по ТГ, соответственно.

Значения k_Q выбраны меньше 1, т. к. с начала 2000-х для управления СЦТ используются ТГ не выше «130/60», причем температура прямого теплоносителя редко поднимается выше 100°C. Суточный расход теплоносителя принят постоянным, равным $G = 260000$ т/сут. Фактический суточный отпуск тепла Q определяется как

$$Q = \sum_{h=0} c_B g(h) (\tau_1(h) - \tau_2(h)), \tag{10}$$

где g – часовой расход теплоносителя на ТЭЦ.

Типичные графики часового расхода обратного теплоносителя ТЭЦ, использованные для моделирования, представлены на рис. 3б. Отношение часовых расходов обратного теплоносителя в первой и второй тепломагистрали Харьковской ТЭЦ-5 принято постоянным, равным среднему за отопительный сезон значению 0,7.

Для моделирования разных типов дня вместо обычной семидневной недели использован сбалансированный по соотношению количества значений γ_c укороченный тренировочный цикл из четырех дней: $\gamma_\tau = \{1, 1, 0, 0\}$. Технологические ограничения по температуре прямого теплоносителя приняты равными: $\tau_1^{\min} = 50^\circ\text{C}$, $\tau_1^{\max} = 135^\circ\text{C}$, $\Delta\tau_1 = 6^\circ\text{C}$.

Анализ качества управления

Настройка параметров НРТТ выполнена с использованием диплоидного генетического алгоритма со смертностью [4] и метода поэтапного роста нейронной сети. Скрытый слой сети, полученной в результате синтеза, содержит 30 нейронов.

Настроенный НРТТ-3 обеспечивает решение задачи (1)-(4) с высокой точностью. Результаты моделирования его работы представлены на рис. 5–9.

Как видно из рис. 5, точность отработки задания по суточному отпуску тепла (1) одинакова во всем диапазоне значений наружной температуры и значений коэффициента k_Q . Относительная абсолютная ошибка по Q меньше 1 %.

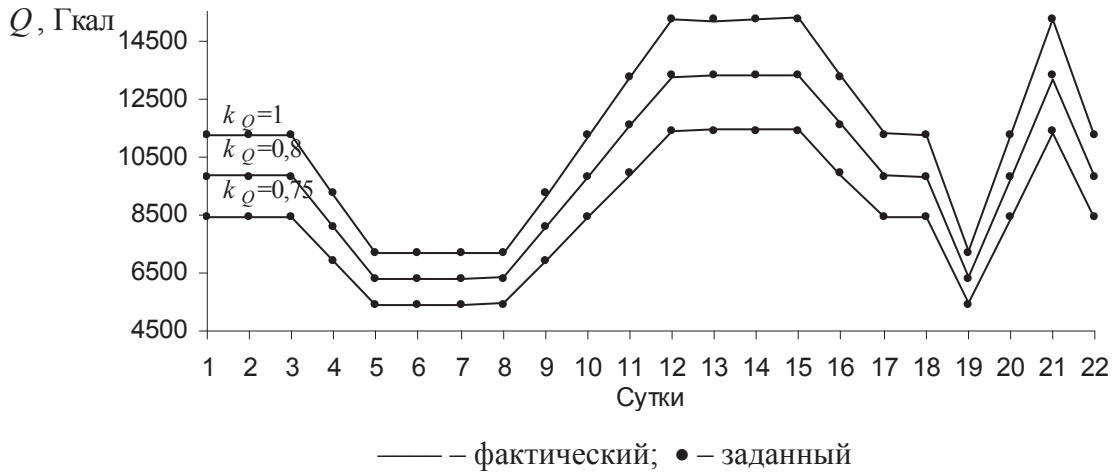
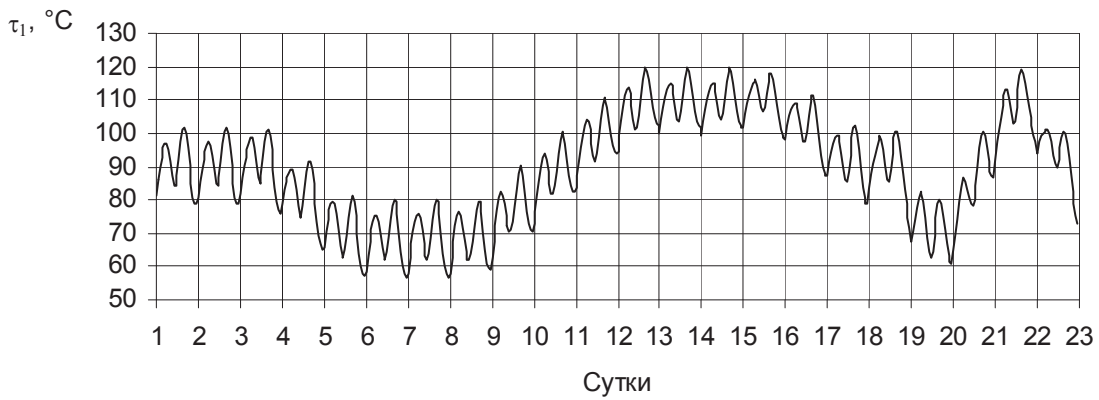
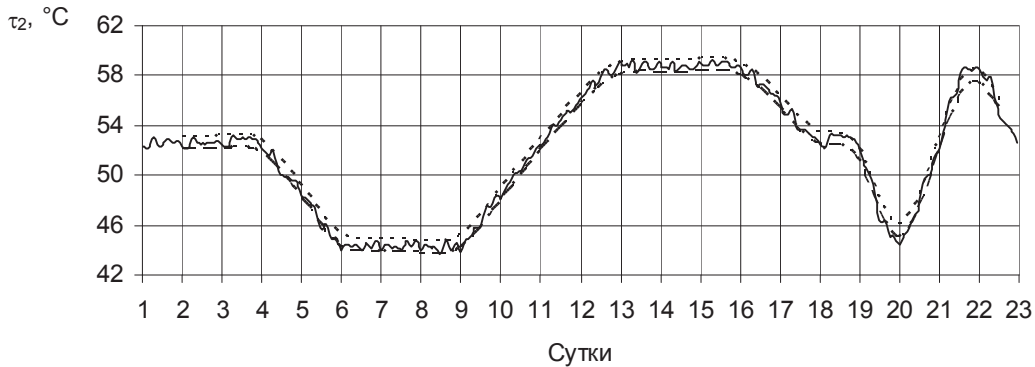


Рис. 5. Суточный отпуск тепла при использовании НРТТ для тренировочного метеосценария



а)



б)

— — расчетное значение; - - - - - скользящее среднее $\pm 0,5^\circ\text{C}$

Рис. 6. Температура теплоносителя при использовании НРТТ для тренировочного метеосценария ($k_Q = 0,8$; типы дня недели меняются по сценарию)

Требование равенства температуры обратного теплоносителя своему скользящему среднему за 24 часа (2) также выполняется с высокой точностью. На рис. 6б видно, что для тренировочного метеосценария на участках стационарной и медленно меняющейся T_n ширина диапазона суточных колебаний среднечасовых значений τ_2 не превышает $0,8^\circ\text{C}$, а на участках резко переменной T_n – $1,4^\circ\text{C}$. Ограничения (3) и (4) выполняются строго.

В целом форма графика суточного изменения τ_1 на рис. 6а сходна с законами, реализуемыми НРТТ, полученными ранее в [1,2] в иных постановках задачи стабилизации температуры обратного теплоносителя. Однако, благодаря использованию при синтезе НРТТ-3 критерия (2), в данном случае процесс управления температурой теплоносителя протекает более гладко. График τ_2 на рис. 6б не содержит резких скачков при переходах через сутки даже на участках предельно быстрого изменения T_n . Максимальное часовое изменение значений τ_1 не превышает установленный в тепловых сетях Харькова предел в $6^\circ\text{C}/\text{ч}$.

НРТТ-3 одинаково эффективен во всем диапазоне наружных температур тренировочного метеосценария. Проверка на тестовом метеосценарии также подтверждает его способность в полном объеме решать поставленные задачи управления при реальных графиках изменения метеоусловий (см. рис. 7, 8).

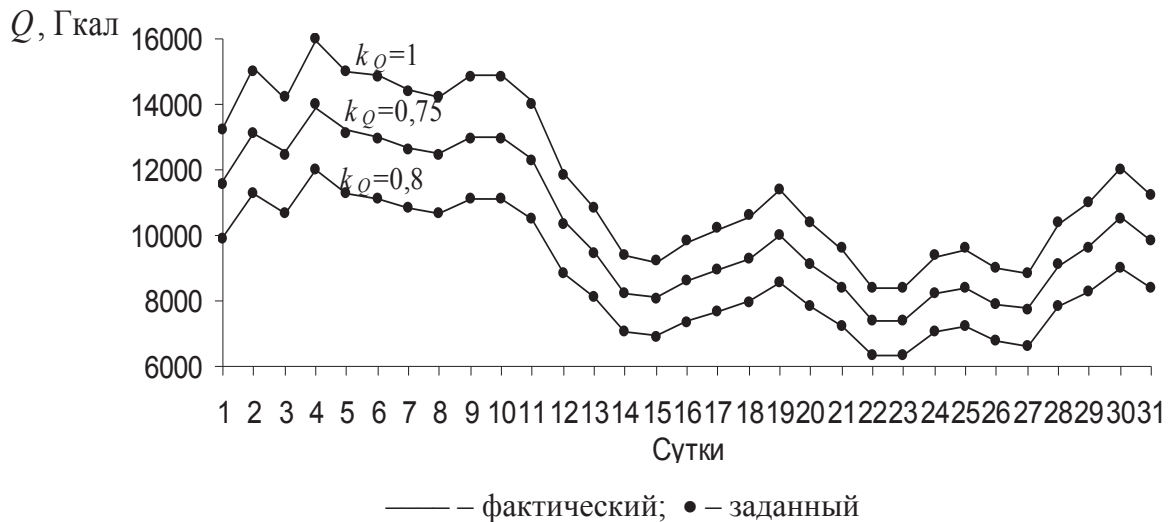
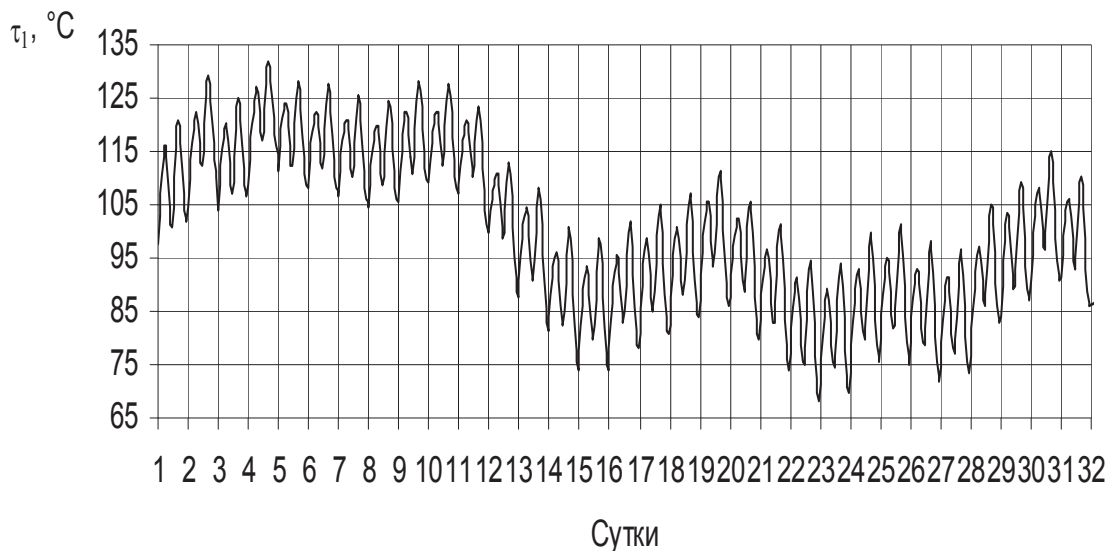


Рис. 7. Суточный отпуск тепла при использовании НРТТ для тестового метеосценария



а)



Рис. 8. Температура теплоносителя при использовании НРТТ для тестового метеосценария ($k_Q = 0,8$; типы дня недели меняются по сценарию)

Хотя минимальная наружная температура в тестовом метеосценарии ниже, чем в тренировочном, точность выполнения задания по суточному отпуску тепла и стабилизации температуры обратного теплоносителя находится на том же уровне. Относительная ошибка выполнения задания по Q меньше 1% (см. рис. 7), отклонение τ_2 от своего скользящего среднего меньше $0,8^\circ\text{C}$ (см. рис. 8). Это подтверждает высокое качество обобщения синтезированной нейросети и достаточно широкую область применения НРТТ-3.

Моделирование работы НРТТ-3 для других значений скорости ветра, облачности, наружной температуры и периодов отопительного сезона показало такую же или незначительно меньшую точность выполнения поставленной задачи управления.

На рис. 9 выполнено сравнение суточных графиков температуры теплоносителя при использовании НРТТ-3 для разных типов дней недели.

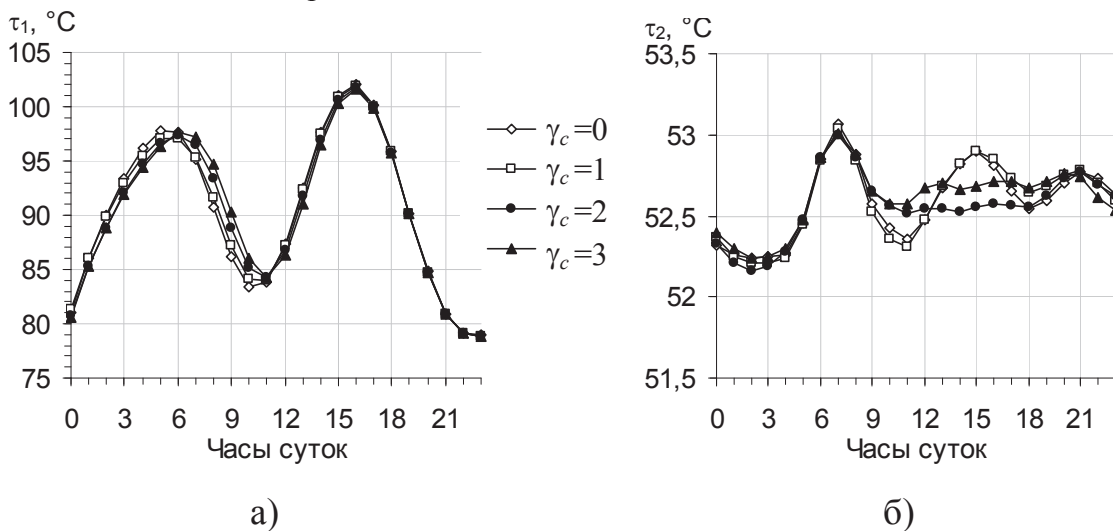


Рис. 9. Температура теплоносителя для разных типов дня недели ($k_Q = 0,8$; $T_n = -5^\circ\text{C}$)

В рабочие дни ночное снижение нагрузки ГВС имеет большую величину, чем в выходные, наступает раньше и длится дольше. Соответственно на рис. 9а различаются и графики изменения τ_1 для разных типов дня недели. Как видно на рис. 9б во всех случаях НРТТ-3 обеспечивает удержание τ_2 в коридоре шириной 1°C . Однако задача стабилизации

температуры обратного теплоносителя в рабочие дни ($\gamma_c = 0$, $\gamma_c = 1$) является более сложной, чем в выходные ($\gamma_c = 2$, $\gamma_c = 3$), и решается хуже.

Выводы

Предложенная методика построения нейрорегулятора среднечасовой температуры теплоносителя на ТЭЦ позволяет устранить утреннее повышение температуры обратного теплоносителя, вызванное неравномерностью нагрузки ГВС. Синтезированный НРТТ-3 обеспечивает высокую точность управления суточным отпуском тепла в широком диапазоне наружных температур и одинаково эффективен для всех типов дней недели.

Необходимо отметить, что реализуемый НРТТ-3 закон управления радикально отличается от текущей практики управления отпуском тепла по температурному графику, предусматривающей поддержание температуры прямого теплоносителя на постоянном уровне с одной или двумя коррекциями на погоду в течение суток. Крайняя изношенность теплосетей ограничивает их возможность выдерживать быстрые изменения температуры теплоносителя. Однако НРТТ-3 не нарушает утвержденные технологические ограничения на диапазон и скорость изменения температуры теплоносителя и может быть использован на практике.

Внедрение НРТТ-3 в систему управления СЦТ Харькова позволит, оставаясь в рамках принципа центрального качественного регулирования, повысить ее энергоэффективность и качество услуги отопления.

Список использованной литературы:

1. Вороновский Г. К. Энергоэкономичное управление состоянием теплосети в крупных системах централизованного теплоснабжения / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. А. Сергеев // *Технічна електродинаміка*, 2006. – (Темат. вип. Проблеми сучасної електротехніки) – Ч. 1 – С. 129–135.
2. Вороновський Г. К. Підвищення енергоефективності алгоритмів централізованого якісного регулювання відпуску тепла від заміської ТЕЦ / Г. К. Вороновський, К. В. Махотило, С. А. Сергеев // *Енергоефективність та відновлювані джерела енергії* / Під. заг. ред. А. К. Шидловського. – Київ: Українські енциклопедичні знання. 2007. – С. 163–200.
3. Махотило К. В. Повышение точности моделирования среднечасовой температуры обратного теплоносителя ТЭЦ / К. В. Махотило // *Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. С. Пухова*. – НАН України, 2009. – Вип. № 53. – С. 118–128.
4. Махотило К. В. Диплоидный генетический алгоритм со смертностью / К. В. Махотило // *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. – 2011. – № 3. – С. 138–150.

References:

1. Voronovskiy G. K., Makhotilo K. V., Sergeev S. A. (2006) “Energy efficient control of large district heating system network” [Energoekonomichnoe upravlenie sostoianiem teploseti v krupnykh sistemakh tseentralizovannogo teplosnabzheniia], *Tekhnichna elektrodinamika*, (Temat. vyp. Problemy suchasnoyi elektrotekhniki), V. 1. P. 129–135.
2. Voronovskiy G. K., Makhotilo K. V., Sergeev S. A. (2007) “Improving the energy efficiency of algorithms of centralized quality control of outside-the-city CHPP heat output”, *Energy efficiency and renewable energy*, ed. A. K. Shydlovs'kyu [“Pidvyshchennya enerhoefektyvnosti alhorytmiv tseentralizovanoho yakisnoho rehulyuvannya vidpusku tepla vid zamis'koyi TETs”], *Enerhoefektyvnist' ta vidnovlyuvani dzhherela enerhiyi*, Pid. zah. red. A. K. Shydlovs'koho], *Ukrayins'ki entsyklopedychni znannya*, Kyiv, P. 163–200.
3. Makhotilo K. V. (2009) “Improving the accuracy of CHPP return water hourly temperature modeling” [Povyshenie tochnosti modelirovaniia srednechasovoi temperatury obratnogo teplonositelia TETs], *Zbirnyk naukovykh prats' instytutu problem modelyuvannya v enerhetyci im. H. Ye. Pukhova*, No 53, P. 118–128.
4. Makhotilo K. V. (2011) “Diploid genetic algorithm with mortality” [Diploidnyi geneticheskii algoritm so smertnost'iu], *Problemy upravleniia i informatiki*, № 3, P. 138–150.

Поступила в редакцию 20.07 2015 г.