

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЛАНОВОЙ КОРРЕКТИРОВКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СИСТЕМ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Ю.Н. Денисенко

ABOUT PROCESSES OPTIMIZATION OF THE SCHEDULED CORRECTION OF THE HEAT SUPPLY REGULATION ACCORDING TO THE DATA OF CONTROL OF CONSUMERS SYSTEMS' THERMAL CONDITIONS

Y.N. Denisenko

На основе универсальной модели системы отопления, разработан алгоритм неадаптивной и адаптивной настройки. Найден оптимальный параметр, описывающий работу системы отопления и рассмотрены способы его идентификации. Предложен подход к оптимизации функционирования основных звеньев СЦТ посредством построения корректных графиков регулирования. Представлена качественная оценка результатов.

Ключевые слова: оптимизация теплового режима, график регулирования, модель системы отопления, алгоритмы параметрической идентификации.

On the basis of the general model of the heating system the author elaborates the algorithm of non-adaptive and adaptive tuning. The author calculates the optimal parameter showing the heating system operation and gives variants of its identification. The author offers the approach to optimization of functioning of the main links of the district heating system by constructing the correct graphs of regulation. Quality assessment of the results is presented.

Keywords: optimization of thermal conditions, graph of regulation, model of heating system, algorithms of parametric identification.

Анализ работы систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) выявляет их плохую управляемость из-за отсутствия новых алгоритмов и методов оптимизации. Несмотря на кажущуюся «прозрачность» последних, искомые мероприятия в технике теплоснабжения сводятся лишь к «индивидуальному» контролю тепла - без обратной связи, и, только в редких случаях, например, при переходе к полной децентрализации, возможно проведение мероприятий, реализующих общие алгоритмы регулирования.

Процесс управления СЦТ предлагается представлять в виде указанной на рис. 1 схемы, для которой основополагающим является построение алгоритма управления (АУ) системой отопления здания (1-й АУ), который и будет организовывать работу оборудования ИТП. После чего информация (из характерных точек $A_1 \dots, A_n$), подвергнутая обработке 2-м АУ, будет организовывать работу ЦТП и т. д. В результате уже в первые недели отопительного сезона, станет возможным выявить наиболее «проблемного» потребителя района, оперативно приступить к наладочным мероприятиям

и оценить эффективность работы тепло-сетевого оборудования.

Такой подход можно считать прозрачным, если будет реализован, или адаптивный, или неадаптивный алгоритм управления с использованием «корректной» математической модели системы отопления здания, способной стать универсальной для любой системы, не отвлекаясь на второстепенные факторы. Подобное исследование приведено в работе [1], из которой для настоящего исследования оптимальной является следующая модель:

$$\begin{cases} Q_o = [1 - \exp(-KF/(cG))]cG(t_{вх} - t_b); \\ t_{вых} = t_b + (t_{вх} - t_b) \cdot \exp(-KF/(cG)), \end{cases} \quad (1)$$

где Q_o , K и F - мощность, коэффициент теплопередачи и площадь поверхности нагрева отопительной установки (ОУ); c , G , $t_{вх}$ и $t_{вых}$ - теплоёмкость, массовый расход теплоносителя, его температура на входе в ОУ и выходе из нее; t_b - температура воздуха в показательном помещении.

В технике теплоснабжения ряд переменных величин, входящих в уравнение теплового баланса,

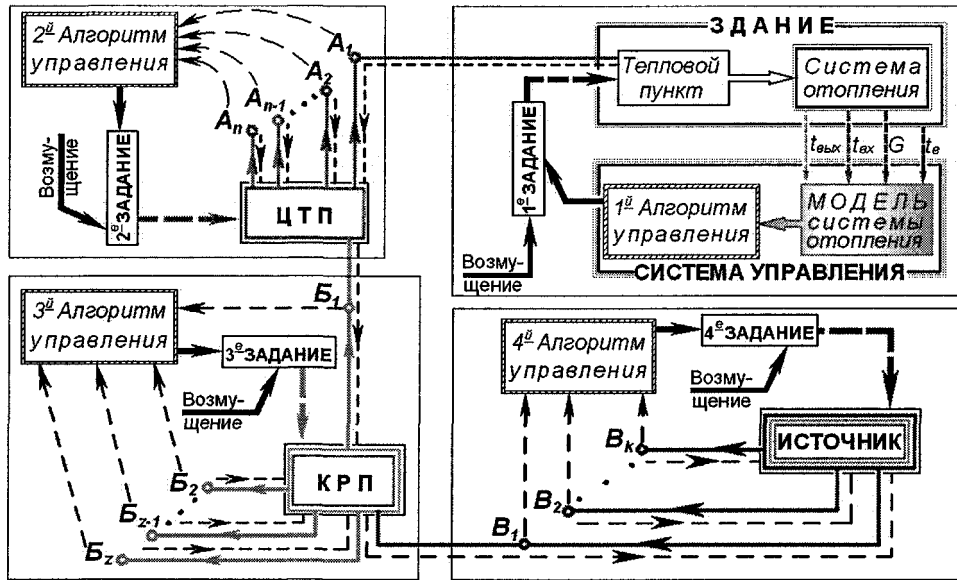


Рис. 1. Схема управления ЦТ

принято заменять некоторыми коэффициентами. Поэтому на практике принято обходить те зависимости, где K и F присутствуют в явном виде. В рамках исследования было решено идентифицировать именно параметр KF , для чего уравнение (1) было решено переписать в логарифмическом масштабе и выразить критерий идентификации параметра KF :

$$I(KF) = \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{t_{\text{вых}}^3 - t_{\text{в}}^3}{t_{\text{вх}}^3 - t_{\text{в}}^3} \right) + KF / (cG_i^3) \right]^2 \quad (2)$$

Дифференцирование уравнения (2) по KF дает исконое уравнение:

$$KF = - \left[\sum_{i=1}^n \left(\ln \left(\frac{t_{\text{вых}}^3 - t_{\text{в}}^3}{t_{\text{вх}}^3 - t_{\text{в}}^3} \right) / cG_i^3 \right) \times \sum_{i=1}^n (cG_i^3)^2 \right] \quad (3)$$

Для отыскания оптимального значения параметра KF в первом приближении достаточно прибегнуть к неадаптивному алгоритму (НА) параметрической идентификации. Практически такой подход позволит заранее уточнить KF , например, на основе «сложившегося опыта» или с использованием данных некоторых экспериментальных исследований, отвечающих «нормальному» режиму работы системы отопления (СО), когда все входные переменные: $G_i^3, t_{\text{вх}}^3$ будут удовлетворять заданному уровню поддержания $t_{\text{в}}^3$ на заданном уровне.

В рамках настоящего исследования «исходные» экспериментальные данные были получены путем подключения 7- и 10-секционного чугунного радиатора МС-140-108 к автоматизированной установке для исследования характеристик СО, находящейся в лаборатории «Отопление» на кафедре

«Теплогасоснабжение и вентиляция». Причем в этой же лаборатории к действующей системе отопления подключены такие же приборы отопления, которые во время эксперимента были отключены. Методика проведения эксперимента и описание лабораторной установки приведены в работе [2]. Полученные результаты эксперимента позволили по уравнению (3) вычислить значение параметра KF , равное 20,008 Вт/°С.

В то же время, для НА обновление данных об объекте управления требует производить их сравнение с ранее зарегистрированными, а затем замещать данные и вновь производить пересчет. Исследования в этом направлении предполагают необходимость формирования адаптивного алгоритма (АА) параметрической идентификации, который в конечном виде стал бы универсальным и для других моделей, в структуре которых присутствует в явном виде коэффициент теплопередачи. В итоге целесообразным сочли использовать уравнение вида:

$$b_{i+1} = b_i + 2h_i (y_{i+1}^3 - b_i x_{i+1}^3) x_{i+1}^3, \quad (4)$$

где $b = KF$, а оператор адаптивной идентификации описывался уравнением:

$$h_i = 0,5 (\gamma + (x_i^3)^2)^{-1}, \quad (5)$$

для которого зависимость (1) для $t_{\text{вых}}$ переписана в логарифмическом масштабе:

$$\ln(t_{\text{вых}}^3 - t_{\text{в}}^3) / (t_{\text{вх}}^3 - t_{\text{в}}^3) = -KF(cG_i^3)^{-1}$$

$$\text{или } y_i^3 = KF(-x_i^3), \quad (6)$$

при этом установлено, что максимальная сходимость результатов обеспечивается для $\gamma = 1$.

Если задаться значением локальной невязки или удовлетворительным числом «прогонок» через уравнение (4), то по мере накопления экспериментальных данных ($i+1$) можно сразу уточнять

значение параметра KF , соответственно предварительно определив b_i , для этого обычно пользуются МНК. После чего на практике, из «некоторых соображений», следовало бы задаться числом «прогонок» или значением невязки.

В работе предложен подход, позволяющий заранее сформировать представление о точности вычисляемого параметра, что предполагает выполнение определенных действий, которые полностью воспроизводимы для одной и более ОУ по нижеописанному эксперименту.

В качестве исходного принято значение параметра $KF = 20,008 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$, которое получено для НА и справедливо для всего возможного диапазона работы ОУ. Для АА сама обработка такого числа экспериментальных данных будет зависеть от допустимого отклонения; так, по адаптивному МНК вычислили значение b_i , равное $16,83 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$, при этом среднеквадратичное отклонение $\Delta = 1,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Откуда ясно: в начальном приближении адаптивный МНК дает большую погрешность, чем НА при обработке тех же экспериментальных данных, для которого среднеквадратичное отклонение равно $0,722 \text{ }^\circ\text{C}$ ($KF = 20,008 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$).

Методом последовательных приближений установлено, что только при числе «прогонок» $100\,000$ KF стал равным $20,008 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$. Дальнейшая «прогонка» (более $500\,000$) сколько-нибудь существенно не влияла на результат, откуда можно заключить: в нашем случае число прогонок при использовании МНК должно быть таким, чтобы среднеквадратичное отклонение удовлетворяло условию $\Delta \leq 0,722 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому в АА целесообразно в начальном приближении b_i определять по формуле (3), не прибегая к методу «прогона».

Несмотря на универсальность НА понятие управления процессами теплоснабжения подразумевает необходимость использования АА, например, при отсутствии начальной удовлетворительной информации об объекте управления. Для интерпретации такого случая был проведен 2-й эксперимент (аналогичный предыдущему) в этом же помещении с такими же отопительными приборами (ОП), которые вводились в режим стандартной эксплуатации путем открытия запорной арматуры на подводках в местах присоединения к стоякам. Только здесь рассматривали существующую систему отопления, работающую более 20 лет. При прочих равных значениях входных параметров и действующих на помещение «возмущений» теплоотдача ОП заметно снизилась по сравнению с предыдущим случаем, где в том же помещении к лабораторной установке были подключены такие же, но новые ОП. Так, наблюдалось повышение $t_{\text{вых}}^2$ и понижение $t_{\text{в}}^3$. Поэтому с помощью ручной регулировки массового расхода от $0,01$ до $0,15 \text{ г/с}$ при установившемся режиме регистрировались только те значения $t_{\text{вых}}^2$ (при данной $t_{\text{вх}}^2$), которые удовлетворяют условию: $t_{\text{в}}^3$ равно от 18 до $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, было зарегистрировано 60 «эталонных» измерений, на основании которых рассмотрено три шага вычислений, позволяющих наглядно проследить за изменением параметра KF с понижением температуры наружного воздуха:

I – для наружной температуры t_n от $+10$ до $0 \text{ }^\circ\text{C}$: сначала по 20 экспериментальным точкам посредством использования уравнения (3) $KF^I = 14,3 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$;

II – с учетом новых значений для t_n от 0 до $-14 \text{ }^\circ\text{C}$: считая базовым $KF^I = b_i$, по следующим 20 экспериментальным точкам с тем же условием «прогона» искомый алгоритм – с учетом уравнений (4)–(6), в результате получили $KF^{II} = 16,73 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$;

III – то же, t_n от -15 до $-34 \text{ }^\circ\text{C}$: аналогично, $KF^{III} = 17,46 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$.

При наличии таких данных можем производить плановую корректировку теплового режима, как самих отопительных систем, так и изменять режимы работы теплосетевого оборудования, например в ЦТП.

С учетом же того, что в начале отопительного периода ($t_n = +10 \text{ }^\circ\text{C}$) значение параметра KF меньше, чем при значительном снижении наружных температур (до $t_n = -34 \text{ }^\circ\text{C}$), то для энергосбережения адаптивный алгоритм параметрической идентификации следует разделять на несколько диапазонов наружных температур, количество которых должно устанавливаться в процессе конструирования самого графика регулирования; соответственно чем их больше, тем на более качественно уровне будет описан как график местного, так и центрального регулирования.

Кроме того, необходимо сопоставлять значения параметра KF для «эксплуатационного» (2-й эксперимент) и «проектного» (1-й эксперимент) режима, на основе чего возможно составление графиков плановой реконструкции с обеспечением стабильного теплоснабжения.

Вместе с тем интересно оценить точность построения существующих графиков регулирования. Как известно, в технике теплоснабжения для построения графика качественного регулирования применяют зависимости вида:

$$t_{\text{вх}} = t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{р}} \bar{Q}_o^{-1/(n+1)} + 0,5\theta_{\text{р}} \bar{Q}_o; \quad (7)$$

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{р}} \bar{Q}_o^{-1/(n+1)} - 0,5\theta_{\text{р}} \bar{Q}_o, \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{р}}$ – расчетное значение температурного напора, которое полагается определять по формуле $0,5(t_{\text{вх,р}} + t_{\text{вых,р}}) - t_{\text{в}}$, и так как большинство отопительных систем спроектировано относительно графика (расчетного) температур $95-70 \text{ }^\circ\text{C}$, то формула для $\Delta t_{\text{р}}$ приводится к виду $0,5(95 + 70) - t_{\text{в}}$;

$\theta_{\text{р}} = t_{\text{вх,р}} - t_{\text{вых,р}}$; \bar{Q}_o – относительная нагрузка, равная $(t_{\text{в}} - t_n)/(t_{\text{в}} - t_{\text{н,о}})$, где $t_{\text{н,о}}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования СО (для Челябинска $-34 \text{ }^\circ\text{C}$), t_n – текущая температура наружного воздуха; n – эмпирический коэффициент.

В разных источниках $n = 0,15 \dots 0,35$, при этом

способ включения этого коэффициента в указанные зависимости дает повод сомневаться в точности существующих методик расчета теплового режима отопительных систем, а именно:

1 случай. С одной стороны изменение n при нахождении коэффициента теплопередачи существенно влияет на величину мощности ОУ, причем расчетную, определяемую по формуле $Q_{o,p} = KF\Delta t_p$, в которой $K = m(\Delta t_p)^n \bar{G}^p$, где m и p – прочие эмпирические коэффициенты, \bar{G}^p – относительный расход воды;

2 случай. С другой стороны с учетом уравнений (7) и (8) $Q_{o,p} = cG(t_{вх,p} + t_{вых,p})$. Следует отметить, что уравнения (7) и (8) получены с учетом первого случая, т. е. $K = m(\Delta t_p)^n \cdot \bar{G}^p$.

Важно то, что при любых исходных данных мощность, найденная в «1 случае» будет всегда существенно меньше, чем во «2 случае», а это уже исключает соблюдение равенства в уравнении теплового баланса.

В то же время исследование показало, что в структурах уравнений (7) и (8) изменение коэффициента n не сильно влияет на сам график регулирования, рис. 2, для которого показан возможный диапазон изменения температуры теплоносителя (заштрихованная область, ограниченная наклонными кривыми). Как видно из рисунка, срезка температур теплоносителя заметно отличается только к концу отопительного периода ($t_n = 10^\circ\text{C}$), а при $t_{н,о}$ всегда постоянна – 95 и 70°C .

Кроме того, зависимости (7) и (8) позволяют сформировать субъективное представление о гра-

фике регулирования, так как не включают во внимание величину расхода теплоносителя. Для выполнения этого упущения в работе предложено доработать процедуру вывода уравнения (7), в результате получена более точная зависимость:

$$t_{вх} = \left(\frac{1}{KF} + \frac{0,5}{cG} \right) Q_{o,p} \frac{t_{в} - t_{н}}{t_{в} - t_{н,о}} + t_{в}, \quad (9)$$

для которой во всем диапазоне можем строить не только график качественного, но и количественного регулирования, изменяя расход G теплоносителя, зная параметр KF и расчетное значение мощности $Q_{o,p}$.

Тогда температуру обратной воды следует находить из уравнения (1):

$$t_{вых} = t_{в} + (t_{вх} - t_{в}) \cdot \exp(-KF/(cG)). \quad (10)$$

Для корректного сравнения предлагаемых и известных зависимостей параметр KF примем усредненным (как в технике теплоснабжения обычно принимают значение коэффициента n), т. е. равным $20,008 \text{ Вт}^\circ\text{C}$. Для этого случая по уравнениям (9) и (10) построен новый график регулирования, показанный на рис. 2 пунктирными линиями. Значимость именно такого подхода вызвана анализом типа жилой застройки г. Челябинска, который показал, что большая часть жилых домов отвечают найденному значению параметра $KF = 20,008 \text{ Вт}^\circ\text{C}$. Тогда ясно, что при высоких значениях наружных температур температура теплоносителя должна быть значительно меньше стандартной «нижней срезки».

Замечание. Совместное рассмотрение уравнений (7), (8) и (9), (10) при наличии нагрузки ГВС,

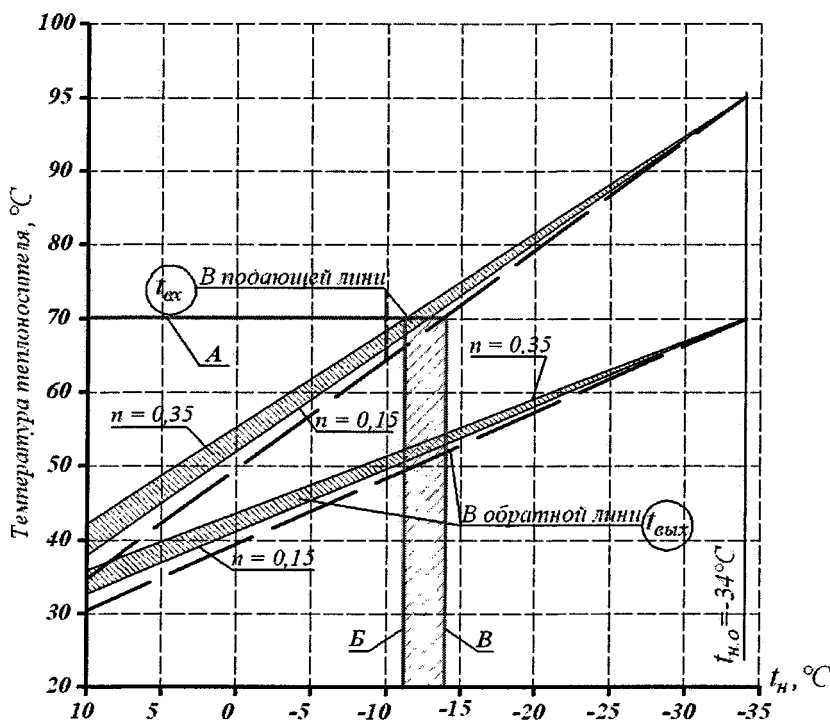


Рис. 2. Графики регулирования температуры теплоносителя в зависимости от способа их построения

для нашего случая, выявляет интересную особенность: $t_{вх}$ не может быть ниже 70 °С (горизонтальная прямая А на рис. 2). Поэтому корректировка графика позволит поддерживать температуру подаваемой воды на этом уровне дольше; на рис. 2 это диапазон (заштрихованная область), ограниченный вертикальными прямыми Б и В.

Параллельно было проведено исследование по аппроксимации коэффициентов входящих в уравнение (11), позволяющее вычислить текущее значение температурного напора Δt в зависимости от наружной температуры и удобного для подстановки в уравнения (7), (8) и (9), (10). Исходными данными явились те же экспериментальные точки (см. работу [2]), используемые для определения KF^I , KF^{II} , KF^{III} . Процедура выполнялась методом наименьших квадратов для искомой зависимости:

$$\Delta t = \beta(Q_{o,p} \bar{Q}_o)^\alpha, \tag{11}$$

где коэффициенты β и α главным образом отражают характер инерционности ОП, зависящей от приоритетной составляющей его теплоотдачи – конвективной (конвектора) или радиационной (плоские или секционные ОП). β и α определялись при изменении Q_o , для чего была определена ее связь с температурой наружного воздуха через \bar{Q}_o .

При конструировании графика регулирования конкретной СО здания или группы зданий β и α предлагается выбирать по характеристике «типового» для здания ОП, по его номинальной теплоотдаче и предполагаемому диапазону изменения расхода воды через этот прибор по соответствующей таблице.

Для примера ниже приведен фрагмент такой таблицы, позволяющей установить значение эмпирических коэффициентов. Например, считая, что конвективная составляющая теплоотдачи отопительных приборов минимальна (до 30 %), а преобладает радиационная, результаты будут такими:

| Характеристика отопительного прибора | Номинальный тепловой поток (или $Q_{o,p}$), Вт | | | |
|--------------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | 900...1400 | | | |
| Секционный радиатор | $G = 0,010 \dots 0,014$ кг/с | $G = 0,015 \dots 0,024$ кг/с | $G = 0,025 \dots 0,003$ кг/с | $G = 0,031 \dots 0,035$ кг/с |
| | $\beta = 0,011620$ | $\beta = 0,013184$ | $\beta = 0,020135$ | $\beta = 0,017597$ |
| | $\alpha = 0,2597$ | $\alpha = 0,2016$ | $\alpha = 0,1155$ | $\alpha = 0,1342$ |
| | | | | |

Относительно указанной таблицы, с учетом зависимости (11) преобразовывали уравнения (9) и (10), т. е. привели их к такому виду, чтобы в структуре присутствовало «требуемое» (текущее) значение температурного напора Δt при данной t_n , конечный вид формул для построения температурного графика приведен ниже

$$t_{вх} = \left(\beta(Q_{o,p} \bar{Q}_o)^\alpha + \frac{0,5}{cG} \right) Q_{o,p} \frac{t_n - t_{н.о}}{t_n - t_{н.о}} + t_n; \tag{12}$$

$$t_{вых} = t_n + (t_{вх} - t_n) \cdot \exp \left(- \frac{1}{\beta(Q_{o,p} \bar{Q}_o)^\alpha cG} \right), \tag{13}$$

которые позволяют построить уточненный график качественно-количественного регулирования, например, для $\beta = 0,011620$ и $\alpha = 0,2597$ это кривые 1 и 2 – рис. 3, там же для наглядности представлен общепринятый график (пунктирные линии 3 и 4).

Изучение отзывов и отчетов теплоснабжающих организаций за наблюдением работы СЦТ выявило следующую особенность о тепловом режиме зданий. Так, при соблюдении графика регулирования (рис. 3, пунктирные линии) наблюдаются следующие жалобы от населения:

- в I диапазоне регулирования (ДР) имеет место «перетоп» помещений, достигающий максимума при $t_n = +5 \dots 10$ °С (см. нижнюю пунктирную кривую на рис. 3 «Температура внутреннего воздуха»);

- при $t_n = -15 \dots -5$ °С тепловой режим оценивался как удовлетворительный;

- в III ДР наблюдается значительный недостаток тепла при понижении t_n . В «ожидании» этого ДР жильцы домов герметизируют неплотности через ограждающие конструкции, что странно, если учесть, особенность определения мощности отопительных приборов – относительно теплопотерь при $t_{н.о} = -34$ °С с дополнительной корректировкой на трехкратный воздухообмен. Последнее обеспечивает эффект «открытой форточки», а следовательно при соблюдении графика регулирования и дополнительном утеплении оконных проемов должен происходить перегрев помещений, а не наоборот.

Выводы

Стандартный подход к конструированию любых графиков регулирования некорректен не только из-за «исходной» структуры - уравнения (7) и (8), но и из-за входящих в нее расчетных величин. Также из рис. 3 (кривые 1 и 2) видно, что уравнения (12) и (13) даже в первом приближении могут исключить отмеченные на практике проблемы - снизить перегрев помещений в I ДР и компенсировать потребность в тепле в III ДР. Дополнительно корректировка искомых графиков позволит оптимизировать работу части тепломеханического оборудования в тепловых пунктах разного назначения; для большинства же из них расчет оборудования характеризуется параметрами работы ОУ именно в I и начале II ДР (см. рис. 3). Например, для г. Челябинска продолжительность