

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СЕТИ ПРЯМОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТОПЛЕНИЯ

А. М. Заславский, В.В. Ткачев, А.В. Бубликов, О.В. Карпенко

Национальный горный университет

Аннотация. В работе рассматриваются принципы построения и оптимизации интеллектуальной сети прямого электрического отопления. Для описания процессов в этой сети наряду с классическими методами описания тепловых процессов применены методы теории массового обслуживания. Проведенные исследования показали, что больший эффект достигается при выборочном подключении нагревателей большой мощности.

Ключевые слова: интеллектуальная сеть, электрическая мощность, тепловой баланс, поток, заявка, обслуживание.

Введение

Интеллектуальная сеть прямого электрического отопления [1, 2] представляет собой систему электронагревательных устройств, размещённых в различных зонах отапливаемого объекта и подключаемых к общему источнику энергии специальными автоматическими устройствами – «умными» коннекторами. Последние, обмениваясь информацией в реальном времени, формируют в пространстве отапливаемого объекта подмножество локальных источников тепла, суммарная мощность которых не превышает случайно изменяющийся во времени лимит мощности, отведенной для задач отопления. Состав этого подмножества периодически изменяется таким образом, чтобы поддерживать заданное распределение температур в зонах размещения устройств. Автоматическое реконfigurирование сети происходит каждый раз, когда возникает избыток или дефицит мощности в сети, таким образом, чтобы её лимит не был превышен при наиболее полном использовании. Те устройства, которые к данному моменту времени отключены, образуют очередь, в которой разыгрывается право на подключение к сети электропитания. От продолжительности времени ожидания в этой очереди зависит амплитуда колебаний контролируемых температур. Чем дольше локальное электронагревательное устройство ожидает подключения к сети электропитания, тем ниже опускается температура в месте его установки. Интеллектуальная сеть прямого электрического отопления должна быть организована таким образом, чтобы с учётом времени ожидания средняя мощность, отдаваемая нагревательными устройствами, была максимальной.

1. Содержательная постановка задачи

Пусть имеется n электронагревательных устройств мощностью P_H каждый, распределённых в различных зонах отапливаемого помещения. Все нагреватели запитываются от общей сети электроснабжения с ограниченным лимитом мощности $\hat{P}$, которая может использоваться для целей отопления. При этом суммарная мощность нагревателей может превышать этот лимит:

$$nP_H \geq \hat{P} \quad (1)$$

Нагреватели объединены в интеллектуальную сеть прямого электрического отопления (рис.1). В числе прочих задач эта сеть обеспечивает в реальном времени (согласно случайно изменяющемуся лимиту мощности $\hat{P}_{\text{inf}} \leq \hat{P} \leq \hat{P}_{\text{sup}}$) автоматическое формирование такого подмножества нагревателей, одновременно подключённых к сети электроснабжения в количестве k , которое обеспечивает выполнение ограничения $kP_H < \hat{P}$ и при этом использует максимальное количество, отпущенной на отопление энергии:

$$0 \leq \hat{P} - kP_H < P_H \quad (2)$$

Если нагреватель подключён к питающей сети и лимит мощности не превышен, то его последующее отключение осуществляется его собственным термостатом при достижении заданной температуры теплоносителя.

Процесс генерации теплового потока локальным нагревателем описывается известным уравнением теплового баланса:

$$C_H \frac{dT_H}{dt} = P(t) - (T_H(t) - T_R(t))\sigma_H \quad (3)$$

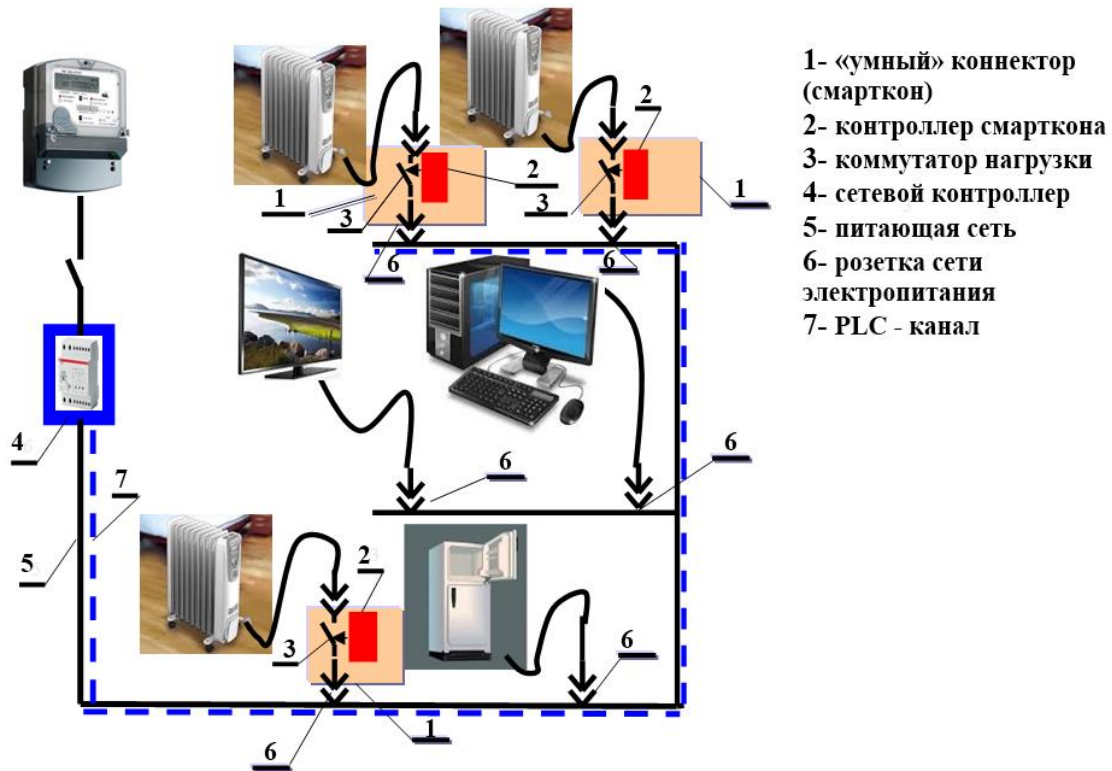


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной сети прямого электрического отопления

где C_H – теплоёмкость нагревателя, $T_H(t)$ – температура теплоносителя нагревателя, $P(t) \in (0, P_H)$ – мощность нагревателя, $T_R(t)$ – температура зоны обогрева, σ_H коэффициент теплопередачи нагревателя.

При включении нагревателя $P(t) = P_H$ происходит разогрев его теплоносителя со скоростью тем большей, чем больше мощность нагревателя:

$$\frac{dT_H}{dt} = \frac{P_H - (T_H(t) - T_R(t))\sigma_H}{C_H} \quad (4)$$

При отключении нагревателя $P(t) = 0$ после достижения заданной температуры теплоносителя, накопленная в нём энергия отдаётся отапливаемой зоне. При этом скорость охлаждения нагревателя практически не зависит от его мощности:

$$\frac{dT_H}{dt} = - \frac{(T_H(t) - T_R(t))\sigma_H}{C_H} \quad (5)$$

На рис. 2 приведена диаграмма процессов нагрева и охлаждения нагревателя.

На рисунке обозначено: τ – время разогрева нагревателя с момента включения до момента отключения собственным термостатом; θ – промежуток времени, через который нагреватель

запрашивает о подключении к сети (потенциальный период включений нагревателя, равный сумме времени разогрева τ и времени ϑ охлаждения до начальной температуры); T_1^0 – температура теплоносителя нагревателя, при которой термостат подключает его к сети электропитания; T_2^0 – температура теплоносителя нагревателя, при которой термостат отключает его от сети электропитания.

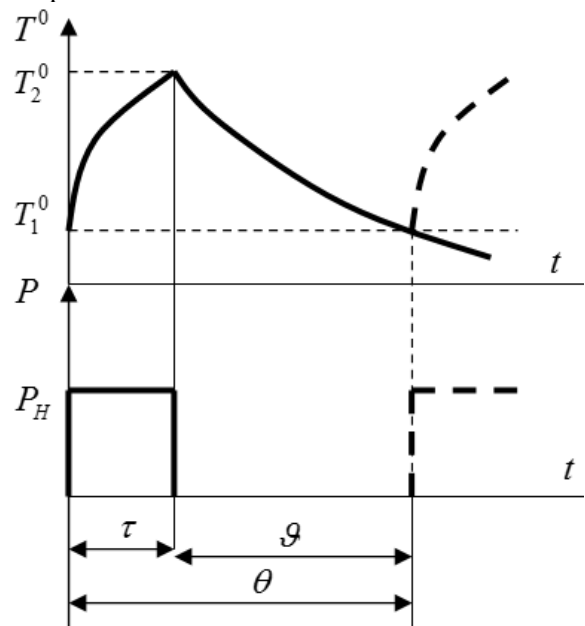


Рис. 2. Диаграмма процессов нагрева и охлаждения нагревателя

Из уравнений (4) и (5) получим (пренебрегая изменением температуры зоны обогрева $T_R(t) \cong \text{const}$):

$$\tau = -\frac{C_H}{\sigma_H} \ln \left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H \right) \quad (6)$$

$$\vartheta = -\frac{C_H}{\sigma_H} \ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0} \quad (7)$$

$$\theta = -\frac{C_H}{\sigma_H} \left(\ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0} + \ln \left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H \right) \right) \quad (8)$$

Чем больше мощность нагревателя P_H , тем меньше время разогрева τ до отключения нагревателя термостатом, в течение которого нагреватель пользуется ограниченным ресурсом мощности сети электроснабжения, тем большее количество нагревателей может воспользоваться этим ресурсом в течение времени θ , тем меньше может оказаться среднее время ожидания нагревателем разрешения на подключение к питающей сети. Однако с увеличением локальной мощности P_H при неизменном уровне ограничения допустимой мощности $\hat{P}$ уменьшается допустимое количество k одновременно включённых нагревателей, что создаёт тенденцию к увеличению среднего времени ожидания нагревателем разрешения на подключение к питающей сети. Средняя мощность, отдаваемая нагревателем в отапливаемую зону:

$$\bar{P}_H = P_H \cdot \frac{\tau}{\theta + \bar{t}} \quad (9)$$

где $\bar{t}$ – среднее время ожидания нагревателем разрешения на подключение к питающей сети.

От величины этой мощности зависит установившееся значение температуры в отапливаемой зоне. Учитывая неоднозначную зависимость средней мощности $\bar{P}_H$ от локальной мощности

$P_H \cong \frac{\bar{P}}{k}$ нагревателя, представляет интерес задача выяснения характера этой зависимости и разработка метода синтеза оптимальной сети прямого электрического отопления, обеспечивающей возможность поддержания наиболее высокой температуры в отапливаемых зонах.

2. Формализация задачи в контексте теории массового обслуживания

Будем рассматривать нагреватели в качестве клиентов (в количестве n) многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с неограниченной очередью. Лимит мощности, используемой для отопления, будем считать величиной постоянной, равной среднему на множестве равномерно распределённых всех возможных значений лимита:

$$\langle \hat{P} \rangle = \frac{\hat{P}_{\text{inf}} + \hat{P}_{\text{sup}}}{2} \quad (10)$$

Допустимое количество k одновременно включённых нагревателей будем рассматривать в качестве k каналов одновременного обслуживания заявок в СМО. Поток заявок будем считать простейшим. Время работы нагревателя τ с момента включения до момента отключения собственным термостатом будем рассматривать в качестве среднего времени обслуживания заявки, распределённого по показательному закону. Промежуток времени θ , через который нагреватель запрашивает о подключении к сети (потенциальный период включений нагревателя), будем рассматривать в качестве среднего периода поступления заявок от одного клиента.

Интенсивность потока заявок, поступающих от n клиентов:

$$\lambda = \frac{n}{\theta} \quad (11)$$

Интенсивность потока обслуживания:

$$\mu = \frac{1}{\tau} \quad (12)$$

Коэффициент загрузки СМО:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (13)$$

Для того, чтобы очередь заявок неограниченно не возрастала, в системе должен существовать стационарный режим. Отсутствие стационарного режима в сети прямого электрического отопления означает, что некоторые отапливаемые зоны могут оказаться отключенными от источников тепла на неопределённо долгое время. Наличие стационарного режима является критерием устойчивости интеллектуальной сети прямого электрического отопления. Известно, что для СМО рассматриваемого класса стационарный режим существует, если отношение ко-

эffициента загрузки системы к числу каналов меньше единицы:

$$\chi = \frac{\rho}{k} < 1 \quad (14)$$

Подставляя в (14) значения ρ, μ, λ из формул (11-13), получим:

$$\frac{n}{k} < \frac{\theta}{\tau} \quad (15)$$

Отношение потенциального периода включений нагревателя ко времени его разогрева выразим через параметры нагревателя из уравнений (6-8):

$$\begin{aligned} \frac{\theta}{\tau} &= \frac{\ln \left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H \right) + \ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0}}{\ln \left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H \right)} = \\ &= 1 + \frac{\ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0}}{\ln \left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H \right)} \end{aligned} \quad (16)$$

Как видно из последнего равенства, отношение θ/τ зависит только от параметров нагревателя.

Из (2) найдём:

$$kP_H \leq \langle \hat{P} \rangle < (k+1)P_H \quad (17)$$

Следовательно, $\langle \hat{P} \rangle \cong kP_H$.

Выразив отсюда $k = \frac{\langle \hat{P} \rangle}{P_H}$ и подставляя это

значение в критерии устойчивости (15) интеллектуальной сети прямого электрического отопления, получим первое ограничение на допустимую величину средней мощности локального нагревателя:

$$\frac{P_H}{\langle \hat{P} \rangle} < \frac{\theta}{n\tau} \quad (18)$$

Второе ограничение обусловлено необходимостью поддерживать отопление каждой зоны

отопливаемого объекта при наименьшем значении лимита мощности $\hat{P} = \hat{P}_{\inf}$:

$$\frac{P_H}{\langle \hat{P} \rangle} \leq \frac{\hat{P}_{\inf}}{\langle \hat{P} \rangle} \quad (19)$$

В контексте понятий теории СМО обозначим состояния сети прямого электрического отопления: s_0 – отключены все нагреватели, s_1 – включён 1 нагреватель, остальные отключены, s_2 – включено 2 нагревателя, остальные отключены, ..., s_i – включено i нагревателей, остальные отключены, ..., s_k – включено k нагревателей, очереди нет, ..., s_{k+r} – включено k нагревателей, в очереди на включение r нагревателей.

Предельное распределение вероятностей состояний вычисляется по известным формулам теории массового обслуживания:

$$p_0 = \left[1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{k+1}}{k \cdot k!} \cdot \frac{1}{1-\chi} \right]^{-1} \quad (20)$$

$$p_i = \frac{\rho^i}{i!} \cdot p_0, i \in (1, \dots, k) \quad (21)$$

$$p_{k+r} = \frac{\rho^{k+r}}{k^r \cdot k!} \cdot p_0, r \geq 1 \quad (22)$$

Среднее количество нагревателей $\bar{r}$, в очереди на включение:

$$\bar{r} = \frac{\rho^{k+1}}{k \cdot k!} \cdot \frac{p_0}{(1-\chi)^2} \quad (23)$$

Среднее время $\bar{t}$ ожидания включения нагревателя:

$$\bar{t} = \frac{\bar{r}}{\lambda} = \frac{\rho^{k+1}}{\lambda \cdot k \cdot k!} \cdot \frac{p_0}{(1-\chi)^2} \quad (24)$$

Задачей оптимизации интеллектуальной сети прямого электрического отопления является выбор такой средней мощности локального нагревателя P_H , при которой средняя мощность (9), отдаваемая нагревателем в зону отопления, с учётом ограничений (18) и (19) является максимальной:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_H = P_H \cdot \frac{\tau}{\theta + \bar{t}} \rightarrow \max \\ P_H < \frac{\theta}{n\tau} \langle \hat{P} \rangle \\ P_H \leq \hat{P}_{\inf} \end{array} \right. \quad (25)$$

3. Пример решения задачи оптимизации интеллектуальной сети прямого электрического отопления

В качестве примера применения изложенного метода рассмотрим задачу нахождения оптимальной средней мощности локального нагревателя в сети отопления 3-х комнатной квартиры со следующими параметрами:

- количество зон отопления $n = 4$;
- лимит мощности, используемой для отопления, задан в пределах от 2 кВт до 4 кВт;
- нагреватели, которые могут быть использованы для отопления, имеют одинаковую конструкцию, отличаясь только мощностью нагревательного элемента;
- постоянная времени нагрева нагревателя $\tau_H = \frac{C_H}{\sigma_H} = 17,3$ мин.;
- коэффициент теплопередачи нагревателя $\sigma_H = 16,7$ Вт/град.;
- коэффициент теплопотерь в зоне отопления $\sigma_R = 14$ Вт/град.;
- наружная температура $T^0 = -20^0 \text{C}$;
- температура в отапливаемой зоне $T_R^0 = 20^0 \text{C}$;
- средний уровень лимита мощности $\bar{P} = \frac{2+4}{2} = 3$ кВт.

Температуру нагревателя найдём из уравнения баланса для отапливаемой зоны:

$$\tau_R \frac{dT_R}{dt} = (T_H - T_R) \frac{\sigma_H}{\sigma_R} + \frac{1}{\sigma_R} P_R - (T_R - T)$$

Полагая $\frac{dT_R}{dt} \cong 0$, получим:

$$\bar{T}_H = T_R + (T_R - T) \frac{\sigma_R}{\sigma_H} \approx 54^0 \text{C};$$

$$T_{H1} = 50^0 \text{C}, \quad T_{H2} = 58^0 \text{C}.$$

Время охлаждения нагревателя до начальной температуры:

$$\vartheta = -\frac{C_H}{\sigma_H} \ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0} = 2,57 \text{ мин.}$$

В таблице 1 приведены результаты расчёта параметров сети для всех возможных случаев её конфигурации, начиная от средней мощности локального нагревателя $P_H = \bar{P} = 3$ кВт, при которой лимитированной мощностью может в один момент времени воспользоваться только один нагреватель ($k=1$), до средней мощности локального нагревателя $P_H = \frac{\bar{P}}{n} = 0,75$ кВт, при которой лимитированной мощностью может одновременно воспользоваться $k = n = 4$ нагревателя. В последнем случае время ожидания в очереди на подключение равно нулю.

Учитывая минимальный лимит мощности $P_{\inf} = 2$ кВт и второе ограничение в (25), получаем, что наибольшая средняя мощность отдаётся в отапливаемую зону при выборе мощности локального нагревателя $P_H = 1500$ Вт.

Таблица 1

Расчёт параметров интеллектуальной сети прямого электрического отопления

Мощность нагревателя P_H , Вт	3000	1500	1000	750
Количество одновременно включённых нагревателей k	1	2	3	4
Время разогрева нагревателя τ , мин	0,79	1,61	2,48	3,39
Время охлаждения нагревателя ϑ , мин	2,57	2,57	2,57	2,57
Потенциальный период включений нагревателя θ , мин	3,36	4,18	5,05	5,96
Интенсивность потока обслуживания μ , 1/мин	1,27	0,621	0,403	--

Интенсивность потока заявок λ , 1/мин	0,298	0,478	0,594	--
Коэффициент загрузки сети ρ	0,235	0,77	1,474	--
Критерий устойчивости сети χ	0,235<1	0,385<1	0,491<1	--
Вероятность отключения всех нагревателей P_0 к моменту прихода заявки	0,763	0,46	0,35	--
Среднее время ожидания включения нагревателя $\bar{t}$, мин	0.24	0.008	0,00039	0
Средний период включений нагревателя $\bar{\theta} = \theta + \bar{t}$	3,6	4,188	5,0504	--
Средняя мощность, отдаваемая нагревателем в отапливаемую зону $\bar{P}_H$, Вт	658,3	576,6	491,1	426,6

3. Выводы

В результате проведенного исследования процесса распределения энергии в интеллектуальной сети прямого электрического отопления, рассматриваемой как модель системы массового обслуживания, получен нетривиальный результат. Вопреки интуитивному представлению о том, что наибольшая энергия ограниченной мощности отдаётся в отапливаемые зоны при подключении всех имеющихся электронагревательных приборов, оказалось, что выборочное подключение лишь части нагревателей, суммарная мощность которых эквивалентна лимиту мощности отопления, позволяет получить больший эффект. В рассмотренном примере отопления 3-х комнатной квартиры при мощности нагревателей 1500Вт одновременно могут включаться только два из 4-х нагревателя. Остальные два ожидают в очереди на включение. При этом средняя мощность, отдаваемая в зоны отопления, более чем на 35% превосходит среднюю мощность, которую могут отдать четыре включённых без ожидания в очереди нагревателя эквивалентной мощностью по 750 Вт каждый.

Список использованной литературы

1. Заславский, А. М. Математическое моделирование процесса самоорганизации интеллектуальной сети «умных» электронагревательных приборов, суммарная мощность которых превышает лимитированную мощность электропотребления обогреваемого объекта [Текст] / А. М. Заславский, В. В. Ткачев, П. Ю. Огеенко // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2016 : тези доповідей Одинадцятої міжнародної науково-практичної конференції (Жукин, 27 червня - 1 липня 2016 р.) / М-во осв. і наук. України,

Нац. Акад. наук України, Академія технологічних наук України, Інженерна академія України та ін. – Чернігів : ЧНТУ, 2016. – С. 212–215.

2. Заславский, А. М. Самоорганизация интеллектуальной сети «умных» электронагревательных устройств как альтернатива традиционным способам обогрева помещений [Текст] / А. М. Заславский, В. В. Ткачев, С. Н. Проценко, П. Ю. Огеенко // Контроль і управління в складних системах. КУСС-2016 : тези доповідей XIII Міжнародної конференції (Вінниця, 3-6 жовтня 2016 р.) / М-во осв. і наук. України, Вінницький національний технічний університет, Українська асоціація з автоматичного управління та ін. – Вінниця : ВНТУ. ПП «ТД Едельвейс», 2016. – С. 78–80.

3. Абрамчук, С. И. Энергетическая эффективность электрического обогревателя [Текст] / Абрамчук С. И., Пуговкин А. В. // Доклады ТУСУР. – 2014, № 4 (34). – С. 211–214.

4. Пуговкин, А. В. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения [Текст] / Пуговкин А. В., Купреков С. В., Абушкин Д. В., Заречная И. А., Муслимова Н. И. // Доклады ТУСУР. – 2010, № 2 (22), часть 1. – С. 293–298.

5. Гнеденко, Б. В. Введение в теорию массового обслуживания [Текст] / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. - 3-е изд., испр. и доп. – М.: Эдиториал УРСС, 2005. – 400 с.

6. Саати, Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения [Текст] / Т. Л. Саати. – М.: Сов. радио, 1971. – 520 с.

References

1. Zaslavsky, A. M., Tkachev, V. V., Ogeenko, P. Yu. (2016), "Mathematical modeling of the process of self-organization of an intelligent network of "smart" electric heaters, the total power of which exceeds the limited power of consumption of a heat-

ed object”, Mathematical and simulation systems. MODS 2016: Abstracts of the Eleventh International Scientific Conference [“Matematicheskoye modelirovaniye protsessa samoorganizatsii intellektual'noy seti «umnykh» elektronagrevatel'nykh priborov, summarnaya moshchnost' kotorykh prevoskhodit limitirovannuyu moshchnost' elektropotrebleniya obogrevayemogo ob'yekta”, Matematychnye ta imitatsiynye modelyuvannya system. MODS 2016: tezy dopovidey odnyadtsyatoiy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsyy], Chernihiv National Technical University, Chernihiv, pp. 212–215.

2. Zaslavsky, A. M., Tkachev, V. V., Protsenko, S. N., Ogeenko, P. Yu. (2016), “Self-organization of intelligent network of “smart” electric heating devices as an alternative to traditional methods of room heating”, Control and management of complex systems. MCCS-2016: Abstracts of XIII international conferences [“Samoorganizatsiya intellektual'noy seti «umnykh» elektronagrevatel'nykh ustroystv kak al'ternativa Traditsionnym sposobam obogreva pomeshcheniy”, Kontrol' i upravlinnya v skladnykh systemakh. KUSS-2016: tezy dopovidey XIII Mizhnarodnoyi konferentsyy], Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, pp. 78–80.

3. Abramchuk, S. I., Pugovkin, A. V. (2014), “Energy efficiency of an electric heater”, Reports of

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2014, № 4 (34) [“Energeticheskaya effektivnost' elektricheskogo obogrevatelya”, Doklady Tomskogo universiteta sistem kontrolya i radioelektroniki, 2014, № 4 (34)], Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, pp. 211–214.

4. Pugovkin, A. V., Kuprekov, S. V., Abushkin, D. V., Zarechnaya, I. A., Muslimova, N. I. (2010), “Mathematical model of heat supply of rooms for energy saving automatic control systems”, Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2010, № 2 (22) [“Matematicheskaya model' teplosnabzheniya pomeshcheniy dlya ASU energosberezheniya”, Doklady Tomskogo universiteta sistem kontrolya i radioelektroniki, 2010, № 2 (22)], Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, pp. 293–298.

5. Gnedenko, B. V., Kovalenko, I. N. (2005), Introduction to queuing theory. 3rd ed., amended and supplemented [Vvedeniye v teoriyu massovogo obsluzhivaniya. 3-e izd., ispravlennoye i dopolnennoye], Editorial URSS, Moscow, 400 p.

6. Saati, T. L. (1971), Elements of queuing theory and its applications [Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i yeye prilozheniya], Soviet radio, Moscow, 520 p.

OPTIMAL DISTRIBUTION OF ENERGY IN THE INTELLIGENT NETWORK OF DIRECT ELECTRIC HEATING

A. M. Zaslavsky, V.V. Tkachev, A.V. Bublikov, O.V. Karpenko
National Mining University

Abstract. The paper considers concepts of design and optimization of intellectual network of direct electric heating. Queuing techniques together with classical approaches describing thermal processes have been applied to describe and analyze processes taking place within the network.

Intellectual network of direct electric heating is a system of electric heaters located within different areas of an object being heated; the heaters are connected to a common energy source by means of specific automation devices that is “smart” connectors. While sharing information on a real time basis, latter ones generate a subset of local heat sources; total power of the heat sources is not more than randomly time-controlled power limit meant for heating purposes. Structure of the subset varies in such a way to provide preset temperature distribution within area heated with the help of the devices. The network experiences re-configuration automatically as soon as either power surplus or power deficit occurs.

Following out of the ordinary result has been obtained: selective connection of certain quantity of heaters which total power is equal to heating power limit is more efficient. In the context of the considered example of 3-room apartment heating where power limit is from 2 to 4kW and power of heaters is 1500W only 2 of 4 heaters can be connected simultaneously. In this regard average heating power output is 35% more than the power output by four heaters with equivalent power 750W each connected without waiting in queue.

Key words: intelligent network, electrical power, heat balance, flow, application, maintenance.

ОПТИМАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ЕНЕРГІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ ПРЯМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПАЛЕННЯ

О. М. Заславський, В. В. Ткачов, А. В. Бубликов, О.В. Карпенко

Національний гірничий університет

Анотація. У роботі розглядаються принципи побудови та оптимізації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення. Для опису і дослідження процесів у цій мережі наряду з класичними методами опису теплових процесів застосовані методи теорії масового обслуговування. Проведені дослідження показали, що більший ефект досягається за умови вибіркового підключення нагрівачів значної потужності.

Ключові слова: інтелектуальна мережа, електрична потужність, тепловий баланс, потік, заявка, обслуговування.

Получено 27.03.2017



Заславский Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Национального горного университета. Просп. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, E-mail: am-47@mail.ru, тел. +38-067-565-48-71

Alexander Zaslavsky, Ph.D, Docent, Associate professor of the Department of automation and computer systems, National Mining University, Yavornytsky ave., 19, Dnipro, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-7812-7229



Ткачев Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и компьютерных систем Национального горного университета. Просп. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, E-mail: tkachevv@ukr.net, тел. +38-067-522-05-64

Viktor Tkachev, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of automation and computer systems, National Mining University, Yavornytsky ave., 19, Dnipro, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-2079-4923



Бубликов Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Национального горного университета. Просп. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, E-mail: Bublikovandrey@i.ua, тел. +38-096-761-57-11

Andrey Bublikov, Ph.D, Docent, Associate professor of the Department of automation and computer systems, National Mining University, Yavornytsky ave., 19, Dnipro, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-3015-6754



Карпенко Олег Викторович, ассистент кафедры автоматизации и компьютерных систем Национального горного университета. Просп. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, E-mail: alikxus@gmail.ua, тел. +38-097-518-00-99

Oleh Karpenko, assistant of the Department of automation and computer systems, National Mining University, Yavornytsky ave., 19, Dnipro, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-0115-5234