

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

С.Д.Ваулин, А.Л. Карташев, М.А. Карташева, Е.В. Сафонов, А.Л. Шестаков

EVALUATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF HEATERS BY DETERMINATION OF HEAT CONSUMPTION OF ENGINEERING OBJECTS

S.D. Vaulin, A.L. Kartashev, M.A. Kartasheva, E.V. Safonov, A.L. Shestakov

Рассмотрены отопительные приборы инженерных объектов, включающие отопительные элементы (радиаторы) и измерительные элементы (сенсоры температуры и расхода), являющиеся структурной составляющей интегрированной Системы индивидуального учета, распределения и потребления энергетических ресурсов. Важнейшей особенностью Системы является наличие сенсоров расхода и температуры теплоносителя, оснащенных беспроводным интерфейсом. Снятие измерений производится путем опроса сенсоров через заданные промежутки времени. Поэтому одной из важнейших характеристик отопительных приборов являются их динамические характеристики, определяющие период опроса сенсоров. Предлагаемая оценка динамических характеристик радиаторов может быть использована при разработке систем охлаждения автомобильной техники.

Ключевые слова: динамическая характеристика, отопительный прибор, радиатор, сенсоры температуры и расхода теплоносителя, период опроса сенсоров.

The heaters of engineering objects, including heating elements (radiators) and measurement instrumentation (sensors of temperature and flow quantity) which are structural component of integrated System of individual calculation, distribution and consumption of energy resources are considered. The prime feature of the System is the presence of sensors of flow quantity and temperature of heating medium, equipped with wireless interface. The measurement is realized by scanning the sensors after fixed periods of time. Therefore, one of the prime characteristics of heaters is their dynamic parameters determining the period of scanning of sensors. Introduced evaluation of dynamic characteristics of radiators can be applied to design of cooling systems for automobiles.

Keywords: dynamic characteristic, heater, radiator, sensors of temperature and flow quantity of heating medium, period of scanning of sensors.

При эксплуатации системы отопления в результате действий потребителя или поставщика услуг может изменяться расход и температура теплоносителя. Указанные действия приводят к изменению величины теплового потока в помещение, при этом переход системы отопления на новый тепловой режим происходит в течение некоторого конечного промежутка времени. При внедрении в инженерном объекте системы индивидуального учета, распределения и потребления энергетических ресурсов для обеспечения точного коммерческого теплового учета необходимо знать время переходного процесса для установления минимального периода опроса датчиков температуры и расхода.

Анализ динамики тепловых и гидравлических процессов в отопительной системе показывает, что наиболее инерционным ее элементом является радиатор.

Все радиаторы, применяемые в настоящее время в системах отопления, можно разделить на следующие типы:

- чугунные радиаторы;

- алюминиевые радиаторы;
- стальные конвекторы;
- биметаллические радиаторы.

Типовые характеристики радиаторов представлены в табл. 1 (по данным производителей).

Таблица 1

Характеристики радиаторов отопления при нормальных условиях*

Материал радиатора	Тип (марка)	Масса секции, кг	Номинал. мощность секции, Вт	Число секций	Суммарн. мощность, Вт	Падение температуры, °С
Чугунные радиаторы	МС-140-500 ГОСТ 8690-94	7,12	160	6	960	2,28
				9	1440	3,42
				12	1920	4,56
	МС-140М-500-0.9	7,1	160	6	960	2,28
				9	1440	3,42
				12	1920	4,56
Алюминиевые радиаторы	CALIDOR Super 500	1,6	199	5	995	2,36
				6	1194	2,84
				8	1592	3,78
	Nova Florida (Fondital Group)	1,47	198	5	990	2,35
				6	1188	2,82
				8	1584	3,76
	CLAN	1,24	190	5	950	2,26
				6	1140	2,71
				8	1520	3,61
	Helyos R	1,6	198,5	5	992,5	2,36
				6	1191	2,83
				8	1588	3,77
Стальные конвекторы	КСК 20-1,049 к/п	13,2	1049	1	1049	2,49
	КН20-1,15К(п)	13,32	1150	1	1150	2,73
Биметаллические радиаторы	RS Bimetal	1,92	199	5	995	2,36
				6	1194	2,84
				8	1592	3,78
	Rifar B	2,0	204	5	1020	2,42
				6	1224	2,91
				8	1632	3,88

Примечание. Нормальные условия:

- температура теплоносителя на входе: +90 °С;
- температура окружающего воздуха: +20 °С;
- температурный напор: +70 °С;
- давление окружающего воздуха - 760 мм рт. ст.;
- массовый расход теплоносителя через радиатор - 0,1 кг/с.

Оценка времени переходного процесса в радиаторе базируется на нестационарном уравнении теплового баланса в предположении мгновенного выравнивания поля температур по всему объему конструкции и осуществляется с использованием теории систем автоматического регулирования [Л]. Учет конечного времени распространения температурной волны осуществляется увеличением полученного значения на величину времени релаксации:

$$c m \frac{dT}{d\tau} = \alpha_1 F_1 (T_{f1} - T) - \alpha_2 F_2 (T - T_{f2}) - \varepsilon_{\text{эфф}} \sigma (T^4 - T_{f2}^4) F_2 \varphi, \quad (1)$$

где c – теплоемкость материала радиатора, m – масса одной секции радиатора; T , T_{f1} , T_{f2} – температура средняя по объему радиатора, теплоносителя в радиаторе и воздуха в помещении соот-

Расчет и конструирование

ветственно; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи к внутренней поверхности радиатора и от наружной поверхности к окружающему воздуху; F_1, F_2 – внутренняя и наружная поверхность секции радиатора; $\varepsilon_{\text{эфф}} = 0,9$ – эффективная степень черноты поверхности теплового излучения окрашенной поверхности; $\varphi = 0,4$ – доля поверхности излучения, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·град) – постоянная Стефана–Больцмана.

При этом коэффициент теплоотдачи к внутренней тепловоспринимающей поверхности является функцией расхода теплоносителя через радиатор G :

$$\alpha_1 \approx \text{const} \cdot G^n, \quad (2)$$

где $n=0,33$ – для чугунных радиаторов; $n=0,8$ – для алюминиевых, стальных и биметаллических радиаторов.

Исходное уравнение может быть линеаризовано и записано в отклонениях от параметров установившегося теплового режима, отвечающего нормальным условиям:

$$\left(\frac{cm}{\bar{\alpha}_1 F_1 + \bar{\alpha}_2 F_2 + \frac{4\bar{q}_0}{\bar{T}} F_2 \varphi} \right) \frac{d}{d\tau} (\delta T) + \delta T = \left(\frac{\bar{\alpha}_1 F_1}{\bar{\alpha}_1 F_1 + \bar{\alpha}_2 F_2 + \frac{4\bar{q}_0}{\bar{T}} F_2 \varphi} \right) \delta T_{f1} + \left(\frac{n\bar{\alpha}_1 F_1}{\bar{\alpha}_1 F_1 + \bar{\alpha}_2 F_2 + \frac{4\bar{q}_0}{\bar{T}} F_2 \varphi} \right) \delta G, \quad (3)$$

где $\delta T = \frac{\Delta T}{\bar{T}_{f1} - \bar{T}} = \frac{T - \bar{T}}{\bar{T}_{f1} - \bar{T}}$, $\delta T_{f1} = \frac{\Delta T_{f1}}{\bar{T}_{f1} - \bar{T}} = \frac{T_{f1} - \bar{T}_{f1}}{\bar{T}_{f1} - \bar{T}}$, $\delta G = \frac{\Delta G}{\bar{G}} = \frac{G - \bar{G}}{\bar{G}}$ – относительное изменение средней температуры радиатора, температуры теплоносителя и расхода; \bar{T}, \bar{T}_{f1} – средняя температура радиатора и теплоносителя в установившемся тепловом режиме; $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$ – коэффициенты теплоотдачи при установившемся тепловом режиме радиатора в нормальных условиях; $\bar{q}_0 = \varepsilon_{\text{эфф}} \sigma (\bar{T}/100)^4$ – максимальный лучистый тепловой поток от радиатора.

Уравнение (3) может быть преобразовано по Лапласу на комплексной плоскости к виду:

$$(T^* s + 1) \delta T(s) = a_1 \delta T_{f1}(s) + a_2 \delta G(s), \quad (4)$$

где $T^* = \frac{cm}{\bar{\alpha}_1 F_1 + \bar{\alpha}_2 F_2 + \frac{4\bar{q}_0}{\bar{T}} F_2 \varphi}$ – постоянная времени;

$a_1 = \frac{\bar{\alpha}_1 F_1}{\bar{\alpha}_1 F_1 + \bar{\alpha}_2 F_2 + \frac{4\bar{q}_0}{\bar{T}} F_2 \varphi}$ – коэффициент усиления по температуре теплоносителя;

$a_2 = \frac{n\bar{\alpha}_1 F_1}{\bar{\alpha}_1 F_1 + \bar{\alpha}_2 F_2 + \frac{4\bar{q}_0}{\bar{T}} F_2 \varphi}$ – коэффициент усиления по расходу через радиатор.

Длительность переходного режима на радиаторе при колебаниях температуры теплоносителя или расхода определяется постоянной времени. Изменение средней температуры радиатора во времени при ступенчатом изменении расхода:

$$\delta T(\tau) = a_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T^*}\right) \right], \quad (5)$$

средней температуры радиатора во времени при ступенчатом изменении температуры теплоносителя:

$$\delta T(\tau) = a_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T^*}\right) \right]. \quad (6)$$

Время завершения переходного процесса определяется при достижении радиатором нового температурного состояния соответствующего 90% величины конечного значения температуры.

Тогда:

$$1 - \exp\left(-\frac{\tau_n}{T^*}\right) = 0,9 \quad (7)$$

в результате, время переходного процесса определяется соотношением:

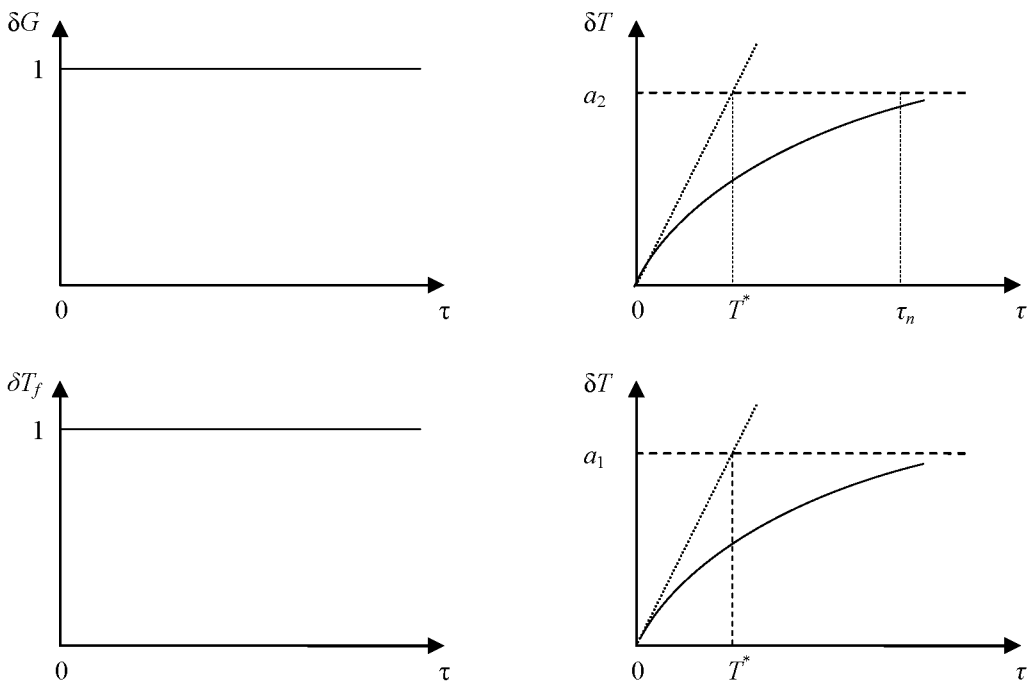
$$\tau_n = 2,3T^*. \quad (8)$$

Время релаксации температурного поля определяется временем распространения температурной волны на характерное расстояние. Для чугунных радиаторов характерное расстояние соответствует приведенной толщине стенки; для алюминиевых, биметаллических и стальных радиаторов с развитой поверхностью теплообмена - средняя длина ребра:

$$\tau_p = \frac{\delta^2}{a_T}, \quad (9)$$

где $a_T = \frac{\lambda}{c\rho}$ - коэффициент температуропроводности материала радиатора.

График переходного процесса показывает инерционный характер выхода на новый тепловой режим (см. рисунок).



Графики переходных процессов в радиаторе

Типовые значения параметров установившегося теплового режима при нормальных условиях для различных типов радиаторов представлены в табл. 2.

Таким образом, анализируя результаты проведенного моделирования параметров переходных процессов в радиаторах типовых конструкций, использующихся в современных системах отопления, можно определить минимальное время, за которое происходит переход с одного температурного уровня на другой.

Время опроса сенсоров температуры может быть задано исходя из различных критериев: максимальная точность определения теплопотребления в режиме реального времени, определение величины теплопотребления с заданной точностью, максимальное время работы сенсора и т.д.

Параметры радиаторов системы отопления

Параметр	Ед. изм	Чугунный радиатор	Алюминиевый радиатор	Биметаллический радиатор
Удельная теплоемкость c	Дж/кг·К	502	896	800
Коэффициент температуропроводности	м ² /с	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$7,85 \cdot 10^{-5}$	$6,84 \cdot 10^{-5}$
Масса секции m	кг	7,1	1,5	2
Площадь внутренней поверхности секции, F_1	м ²	0,126	0,05	0,025
Площадь наружной поверхности секции F_2	м ²	0,244	0,46	0,46
Коэффициент внутренней теплоотдачи $\bar{\alpha}_1$	Вт/м ² К	200	600	900
Коэффициент внешней теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$	Вт/м ² К	6,1	6,1	6,1
Средняя температура при нормальных условиях \bar{T}	К	358	357	355
Максимальный тепловой поток \bar{q}_0	Вт/м ²	830	810	800
Характерная длина пути δ	м	0,008	0,029	0,029
Постоянная времени T^*	с	70,6	40,0	60,8
Время переходного процесса τ_n	с	162,4	92,0	140,0
Время релаксации τ_p	с	4,8	10,7	12,3
Полное время переходного процесса в радиаторе	с	167,2	102,7	152,3

Исходя из критерия максимальной точности определения теплопотребления, представляется целесообразным определить минимальный период опроса сенсора температуры как время порядка длительности переходного режима для алюминиевого радиатора, что составляет около 100 секунд. Для использования в Системе индивидуального учета, распределения и потребления энергетических ресурсов минимальный период опроса может составить 2 минуты. Увеличение периода опроса приведет к повышению погрешности определения теплопотребления инженерного объекта (помещения, квартиры), для расчета которой требуется проведение дополнительных исследований.

Литература

Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.Л. Попов. - М.: Наука, 1966. - 992с.

Поступила в редакцию 2 сентября 2008 г.

Ваулин Сергей Дмитриевич. Доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Южно-Уральского государственного университета, заведующий кафедрой «Двигатели летательных аппаратов». Область научных интересов - проектирование регулируемых энергетических установок и сложных технических систем, теория теплофизических систем.

Vaulin Sergei Dmitrievich. Dr.Sc. (Engineering), Professor, pro-rector for scientific work of South Ural State University, Head of «Engines of flying machines» department. Pro-

professional interests: designing of adjustable power devices and complex engineering systems, theory of heat transfer systems.

Карташев Александр Леонидович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах.

Kartashev Alexander Leonidovich. Dr.Sc. (Engineering), professor of «Engines of flying machines» department of South Ural State University. Professional interests: mathematical simulation and designing of power devices and complex engineering systems, investigation of hydro- and gas-dynamic processes and processes of heat transfer in engineering systems.

Карташева Марина Анатольевна. Старший научный сотрудник кафедры «Двигатели летательных аппаратов» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах.

Kartasheva Marina Anatolyevna. Senior staff scientist of «Engines of flying machines» department of South Ural State University. Professional interests: mathematical simulation and designing of power devices and complex engineering systems, investigation of hydro- and gas-dynamic processes and processes of heat transfer in engineering systems.

Сафонов Евгений Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигатели летательных аппаратов» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - проектирование энергетических установок, математическое моделирование гидрогазодинамических и тепловых процессов в технических системах.

Safonov Eugeney Vladimirovich. Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor of «Engines of flying machines» department of South Ural State University. Professional interests: designing of power devices, mathematical simulation of hydro- and gas-dynamic and heat processes in engineering systems.

Шестаков Александр Леонидович. Доктор технических наук, профессор, ректор Южно-Уральского государственного университета, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника». Область научных интересов - разработка перспективных образцов информационно-измерительной техники, применение современных достижений микросистемной техники в различных отраслях промышленности.

Shestakov Alexander Leonidovich. Dr.Sc. (Engineering), Professor, Rector of South Ural State University, Head of «Information and measurement instrumentations» department. Area of scientific interests - development of perspective models of information and measurement instrumentations, application of modern achievements of micro system technology in industries.