

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 621.36

А.А. Багаев,  
Ц.И. Калинин,  
В.Г. Горшенин,  
В.И. Булавцев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ ПО ЕГО КРИВОЙ РАЗГОНА

**Ключевые слова:** электродный нагреватель воды, передаточная функция, кривая разгона.

### Введение

Электродные водонагреватели используются в системах отопления, в мастерских для удовлетворения санитарно-гигиенических нужд и др. Животноводческие фермы наиболее крупные потребители горячей воды. На фермах горячую воду используют для мытья посуды, сепараторов, пастеризаторов, молокопроводов, для подмывания вымени и поения животных. Расход горячей воды, следовательно, и теплоты на животноводческих фермах резко меняется в течение суток. Переменные тепловые нагрузки значительно усложняют условия теплоснабжения.

Основным недостатком работы электродных водонагревателей является неоптимальный режим работы при преобразовании электрической энергии в тепловую. Следовательно, необходимо регулировать процесс нагрева воды в электродном водонагревателе. Для того чтобы проводить оптимальное регулирование процесса нагрева воды в электродном водонагревателе, необходимо знать динамические характеристики установки, т.е. определить передаточную функцию электродного водонагревателя.

Существуют два способа определения передаточной функции электродного водонагревателя: аналитический и экспериментальный. Применения аналитического способа довольно сложно, так как существующие математические модели процессов электродного нагрева неточны [1].

Цель работы – экспериментальное определение передаточной функции электродного водонагревателя по его кривой разгона.

Объект исследования – электродный водонагреватель непроточного типа с коаксиальной формой электродов.

Предмет исследования – закономерности нагрева в непроточном электродном водонагревателе.

Предмет исследования – закономерности нагрева в непроточном электродном водонагревателе.

### Описание экспериментальной установки и методики проведения измерений

На рисунке 1 показана принципиальная электрическая схема экспериментального непроточного водонагревателя. Водонагреватель состоит из корпуса 1, в котором коаксиально расположены электроды 2. Установка включается в сеть переменного тока через автоматический выключатель QF. Корпус водонагревателя заполняется водой из источника водоснабжения. После заполнения корпуса водой, автоматический выключатель переводится в положение «вкл.». Начинается процесс электродного нагрева. На дисплей 4 измерителя двухканального ОВЕН 2ТРМО выводятся значения температуры, получаемые от датчика температуры 3.

Начиная с момента времени  $t = 0$  мин., каждые  $t = 0,5$  мин. (30 сек.), записываются значения температуры  $T^{\circ}\text{C}$ . Значения температуры  $T^{\circ}\text{C}$  занесены в таблицу 1 (графы 2 и 7). При достижении водой за-

данной температуры автоматический выключатель переводится в положение «выкл.».

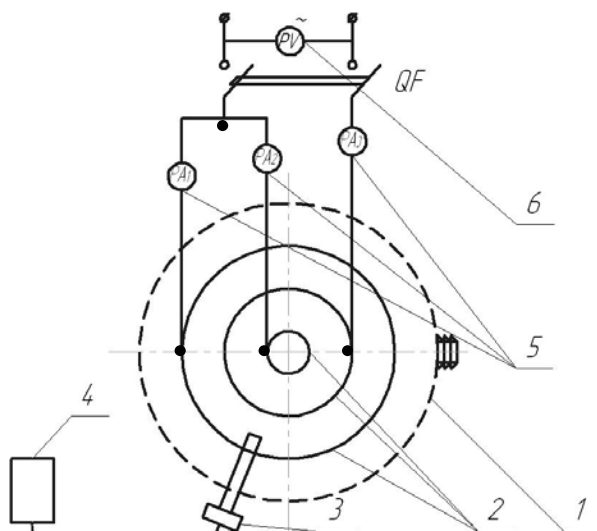


Рис. 1. Принципиальная схема электродного водонагревателя:  
 1 – корпус водонагревателя; 2 – электроды;  
 3 – датчик температуры;  
 4 – измеритель двухканальный ОВЕН 2ТРО0,  
 5, 6 – измерительные приборы тока и напряжения

Процесс экспериментального исследования промышленного объекта состоит из трех этапов: планирования и подготовки эксперимента, проведения эксперимента и обработки результатов. Обработка экспе-

риментальной переходной характеристики заключается в ее сглаживании и аппроксимации. Сглаживание оказывается необходимым для устранения разброса измерений, т.е. для приближения их к истинным значениям. Этот разброс создается различными причинами и прежде всего помехами, действующими на процесс.

**Результаты измерений**

Значения температуры  $T$ , °С, от времени  $t$ , мин., представлена кривой 1 на рисунке 2.

**Математическая обработка экспериментальных данных**

Динамические свойства объекта приближенно представлены передаточной функцией следующего вида:

$$W(p) = \frac{k}{T_2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент усиления объекта;  
 $T_1$  и  $T_2$  – коэффициенты, называемые постоянными времени.

Для удобства определения переходной характеристики объекта методом площадей запишем формулу (1) в следующем виде:

$$W(p) = \frac{k}{F_2 p^2 + F_1 p + 1}. \quad (2)$$

Для сглаживания используют ряд методов [2, 3]. В представленной статье использован метод площадей, заключающийся в определении вспомогательных величин по алгоритму, представленному ниже [4, 5].

Таблица 1

**Результаты экспериментальных исследований и выполненных вычислений**

$t$ , мин.	$T$ , °С	$\sigma$	$1-\sigma$	$\theta = \frac{t}{F_1}$	$t$ , мин.	$T$ , °С	$\sigma$	$1-\sigma$	$\theta = \frac{t}{F_1}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00	10,00	0,00	1,00	0,00	8,00	52,33	0,61	0,40	1,15
0,50	11,22	0,02	0,98	0,07	8,50	54,77	0,64	0,36	1,22
1,00	13,66	0,05	0,95	0,14	9,00	56,80	0,67	0,33	1,29
1,50	16,10	0,08	0,92	0,22	9,50	59,22	0,70	0,30	1,37
2,00	19,36	0,13	0,87	0,29	10,00	61,28	0,73	0,27	1,44
2,50	22,62	0,18	0,82	0,36	10,50	62,91	0,76	0,24	1,51
3,00	26,69	0,24	0,76	0,43	11,00	64,94	0,79	0,22	1,58
3,50	29,13	0,27	0,73	0,50	11,50	66,98	0,81	0,19	1,65
4,00	31,57	0,31	0,69	0,58	12,00	69,00	0,84	0,16	1,73
4,50	34,83	0,36	0,65	0,65	12,50	70,64	0,87	0,13	1,80
5,00	37,27	0,39	0,61	0,72	13,00	72,27	0,89	0,11	1,87
5,50	40,12	0,43	0,57	0,79	13,50	73,90	0,91	0,09	1,94
6,00	42,56	0,47	0,54	0,86	14,00	75,52	0,94	0,06	2,01
6,50	45,00	0,50	0,50	0,94	14,50	77,15	0,96	0,04	2,09
7,00	47,44	0,54	0,47	1,01	15,00	78,78	0,96	0,04	2,16
7,50	49,88	0,57	0,43	1,08	15,50	80,00	1,00	0,00	2,23

Делим ось времени характеристики на  $n = 31$  равных малых промежутков времени  $\Delta t = 0,5$  мин. В пределах каждого промежутка времени отрезок характеристики можно считать прямолинейным. Заносим значения каждого промежутка  $\Delta t$  в графы 2 и 7 таблицы 1.

Переведем значения каждого промежутка  $\Delta t$  в относительные единицы. Обозначим промежутки времени  $\Delta t$  в относительных единицах как  $\sigma$ . Так, для  $\Delta t = 0$  мин.,  $\sigma = 0$ ,  $\Delta t = 15,5$  мин.  $\sigma = 1$ . Заполняем графы 3 и 8 таблицы 1.

В графы 4 и 8 таблицы 1 заносим значения  $1-\sigma$ .

Вычисляем вспомогательную величину  $F_1$ , представляющую собой площадь, заключенную между кривой нагрева  $T(t)$  и  $T = 10^\circ\text{C}$ :

$$F_1 = \Delta t \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t) - 0,5[1 - \sigma(0)]]; \quad (3)$$

$$F_1 = 0,5 \cdot (14,4 - 0,5) = 6,95.$$

Перестраиваем функцию  $(1-\sigma)$  в другом масштабе времени  $\theta$ , выраженную в относительных единицах (табл. 2). Для этого предварительно заполняем графу 4 таблицы 1.

Вычисляем вспомогательную величину  $F_2$ , используя полученные данные таблицы 2:

$$F_2 = F_1^2 \Delta \theta \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta \theta)][1 - i\Delta \theta] - 0,5[1 - \sigma(0)] \right\}; \quad (4)$$

$$F_2 = 6,95^2 \cdot 0,07(4,87 - 0,5) = 14,77.$$

Следовательно, значащая часть нормированной переходной характеристики аппроксимируется передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{14,47p^2 + 6,95p + 1} = \frac{1}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1},$$

где  $T = 3,84$ ,  $\xi = 0,9$ .

Таблица 2

Результаты промежуточных вычислений

$t$ , мин.	$1-\sigma$	$1-\theta$	$(1-\sigma)(1-\theta)$	$1-2\theta + \frac{\theta^2}{2}$	$(1-\sigma)(1-2\theta + \frac{\theta^2}{2})$
1	2	3	4	5	6
0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,50	0,98	0,93	0,91	0,86	0,84
1,00	0,95	0,86	0,81	0,72	0,69
1,50	0,92	0,78	0,72	0,59	0,54
2,00	0,87	0,71	0,62	0,47	0,40
2,50	0,82	0,64	0,53	0,35	0,28
3,00	0,76	0,57	0,43	0,23	0,18
3,50	0,73	0,50	0,36	0,12	0,09
4,00	0,69	0,42	0,29	0,01	0,01
4,50	0,65	0,35	0,23	-0,09	-0,06
5,00	0,61	0,28	0,17	-0,18	-0,11
5,50	0,57	0,21	0,12	-0,27	-0,15
6,00	0,54	0,14	0,07	-0,35	-0,19
6,50	0,50	0,06	0,03	-0,43	-0,22
7,00	0,47	-0,01	0,00	-0,51	-0,24
7,50	0,43	-0,08	-0,03	-0,58	-0,25
8,00	0,40	-0,15	-0,06	-0,64	-0,25
8,50	0,36	-0,22	-0,08	-0,70	-0,25
9,00	0,33	-0,29	-0,10	-0,75	-0,25
9,50	0,30	-0,37	-0,11	-0,80	-0,24
10,00	0,27	-0,44	-0,12	-0,84	-0,22
10,50	0,24	-0,51	-0,12	-0,88	-0,21
11,00	0,22	-0,58	-0,13	-0,91	-0,20
11,50	0,19	-0,65	-0,12	-0,94	-0,17
12,00	0,16	-0,73	-0,11	-0,96	-0,15
12,50	0,13	-0,80	-0,11	-0,98	-0,13
13,00	0,11	-0,87	-0,10	-0,99	-0,11
13,50	0,09	-0,94	-0,08	-1,00	-0,09
14,00	0,06	-1,01	-0,06	-1,00	-0,06
14,50	0,04	-1,09	-0,04	-1,00	-0,04
15,00	0,04	-1,16	-0,05	-0,99	-0,04
15,50	0,00	-1,23	0,00	-0,97	0,00

Вводим следующие обозначения:

$$C = \frac{1}{\lambda T} = \frac{1}{0,11 \cdot 3,84} = 2,28;$$

$$\theta = \arctg \frac{\lambda}{\gamma} = \arctg \frac{0,11}{0,23} = 0,45;$$

$$\gamma = \arctg \frac{\xi}{T} = \arctg \frac{0,9}{3,84} = 0,23;$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} = \frac{\sqrt{1 - 0,9^2}}{3,84} = 0,11.$$

Составляем аналитическое выражение значащей части нормированной переходной характеристики [4]:

$$h_a(t) = 1 - Ce^{-\gamma t} \sin(\lambda t + \theta); \quad (5)$$

$$h_a(t) = 1 - 2,28e^{-0,23t} \sin(0,11t + 0,45).$$

Значения  $h_a(t)$  занесены в таблицу 3, по данным которой на рисунке 2 кривой 2 построена переходная характеристика.

Точность аппроксимации определяется по формуле [4]:

$$\delta = \max \frac{|h(t_i) - h_a(t_i)|}{h(\infty)} 100\%, \quad (6)$$

где  $h(t_i)$  – значения кривой разгона, соответствующие экспериментальной передаточной функции в момент времени  $t_i$ ;

$h_a(t_i)$  – значения кривой разгона, соответствующие вычисленной по аппроксимирующей передаточной функции в момент времени  $t_i$ ;

$h(\infty)$  – значения кривой разгона в момент времени, стремящийся к  $\infty$  (устранившееся значение).

Точность аппроксимации  $\delta = 4,84\%$ , что удовлетворяет условию  $\delta < (3 \div 5)\%$ .

Таблица 3

Оценка точности аппроксимации переходной характеристики в относительных единицах

t, мин.	h(t)	h <sub>a</sub> (t)	h(t)-h <sub>a</sub> (t)	t, мин.	h(t)	h <sub>a</sub> (t)	h(t)-h <sub>a</sub> (t)
0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	0,61	0,66	-0,05
0,50	0,02	0,01	0,01	8,50	0,64	0,69	-0,05
1,00	0,05	0,03	0,02	9,00	0,67	0,72	-0,05
1,50	0,08	0,06	0,02	9,50	0,70	0,75	-0,05
2,00	0,13	0,10	0,03	10,00	0,73	0,78	-0,05
2,50	0,18	0,14	0,04	10,50	0,76	0,80	-0,05
3,00	0,24	0,19	0,05	11,00	0,79	0,83	-0,04
3,50	0,27	0,24	0,03	11,50	0,81	0,85	-0,03
4,00	0,31	0,29	0,01	12,00	0,84	0,87	-0,02
4,50	0,36	0,34	0,01	12,50	0,87	0,88	-0,02
5,00	0,39	0,39	0,00	13,00	0,89	0,90	-0,01
5,50	0,43	0,44	-0,01	13,50	0,91	0,91	0,00
6,00	0,47	0,49	-0,03	14,00	0,94	0,92	0,01
6,50	0,50	0,54	-0,04	14,50	0,96	0,93	0,03
7,00	0,54	0,58	-0,04	15,00	0,96	0,94	0,01
7,50	0,57	0,62	-0,05	15,50	1,00	0,95	0,05

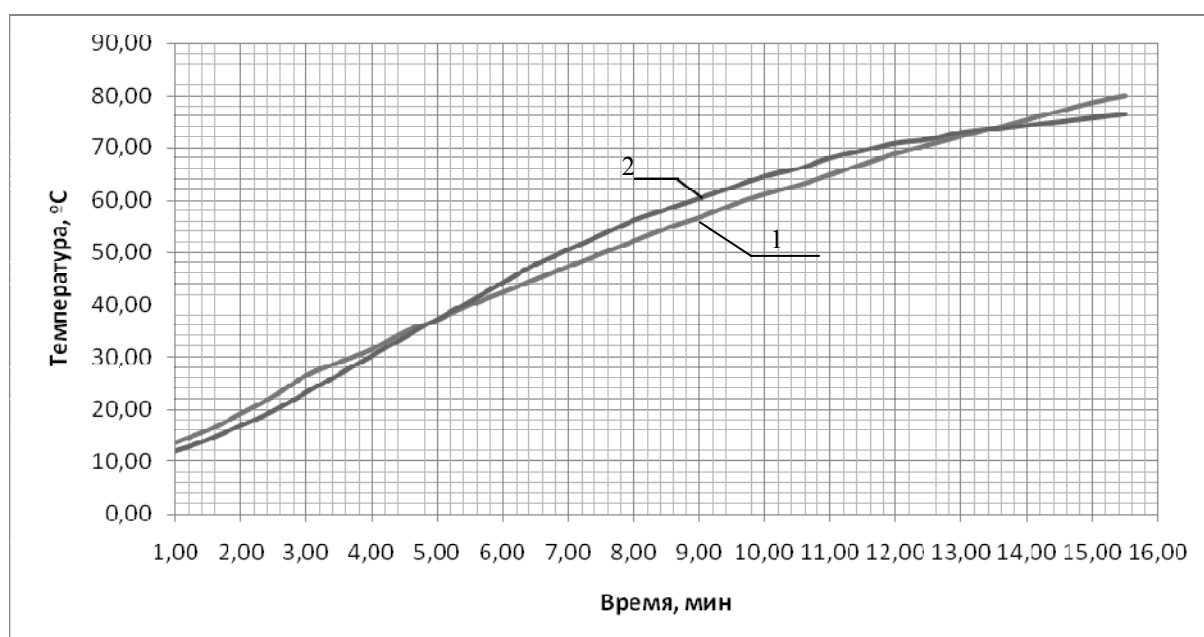


Рис. 2. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) кривые разгона электродного водонагревателя

**Выводы**

Построены экспериментальная и теоретическая кривые разгона электродного водонагревателя. Рассмотрен алгоритм экспериментального определения передаточной функции электродного водонагревателя по его кривой разгона. На основании проведенных расчетов получена передаточная функция электродного водонагревателя по его кривой разгона и определена точность аппроксимации, составляющая 4,84%. Таким образом, математическое описание передаточной функции проведено с точностью, достаточной для выбора регулятора в системе автоматического управления (САУ), пригодной для решения типовых инженерных задач.

**Библиографический список**

1. Королев В.А. Динамика процессов электродного нагрева жидкостей. – Л., 1988. – 37 с.
2. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
3. Королев В.А. Динамика процессов электродного нагрева жидкостей. – Л., 1988. – 37 с.
4. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.; ил.
5. Стефани Е.П. Основы построения АСУ ТП: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергопромиздат, 1982. – 352 с., ил.



УДК 537.32

**В.И. Чарыков,  
А.А. Евдокимов,  
А.А. Митюнин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КАТУШКИ  
НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА**

***Ключевые слова:** нагрев, охлаждение, катушка намагничивания, обмотка, изомеры теплового поля, электромагнитный сепаратор, температура, постоянная нагрева.*

**Введение**

Степень нагрева катушки электромагнита определяет срок службы изоляционных материалов, входящих в конструкцию, следовательно, срок службы всей катушки, а зачастую и всего устройства в целом.

Допустимая температура нагрева катушки определяется типом и качеством применяемых для ее изготовления материалов, способов обработки катушки (пропитка, компаундирование и т. п.), а также условиями ее эксплуатации.

При продолжительном воздействии высокой температуры на изоляционные материалы в них происходят необратимые физико-химические процессы, приводящие к структурным изменениям и ухудшению их физических, механических и электрических характеристик. Поэтому при оценке оптимальности выбранной конструкции, кроме оценки средней величины нагрева катушки, необходимо уметь оценить еще и температуру наиболее нагретого ее участка [1].

В основе тепловых расчетов электрических машин лежит теория теплопередачи, одной из задач которой является расчет температурных полей. Вид температурного поля определяется условиями выделения и переноса тепловой энергии.