

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 631.171:621.78

А.А. Багаев, Ц.И. Калинин, В.Г. Горшенин
A.A. Bagayev, Ts.I. Kalinin, V.G. Gorshenin

РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПИД-РЕГУЛЯТОРА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДНОГО ПРОТОЧНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ ПО УПРАВЛЯЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

THE RESULTS OF SYNTHESIS OF TRANSFER FUNCTION OF PID-CONTROLLER AND AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ELECTRODE DIRECT-FLOW WATER HEATER IN TERMS OF CONTROL ACTION

Ключевые слова: электродный нагреватель воды, передаточная функция, математическая модель, система автоматического регулирования, ПИД-регулятор.

В сельском хозяйстве горячую воду широко используют в системах отопления, в процессах кормоприготовления, в мастерских, для удовлетворения санитарно-гигиенических нужд, мытья посуды на животноводческих фермах, сепараторов, пастеризаторов, молокопроводов, автоцистерн, молочных танков и т.д. Перечисленные технологические процессы являются весьма энергоемкими. Оптимизация режимов работы электродной установки и повышение ее энергоэффективности требуют применения регулирования параметров нагрева. Целью является синтез передаточных функций регулятора и системы автоматического регулирования температуры воды в электродном проточном нагревателе. Получена передаточная функция проточного электродного водонагревателя по управляющему воздействию, учитывающая результаты математического моделирования процессов нагрева воды в электродном нагревателе и теплообмена с окружающей средой. Составлена структурная схема линеаризованной САР температуры воды в электродном нагревателе. В силу того, что не известны порядок и значения постоянных времени, целесообразно применить ПИД-регулятор, поскольку ни П-регулятор, ни ПИ-регулятор не позволяют скомпенсировать (скорректировать) при соответствующей настройке постоянные времени одновременно. Использование закона ПИД-регулирования позволяет поддерживать колебания тем-

пературы воды более точно с высокой чувствительностью к отклонению оптимума их настроек, но ограничено сложностью их настройки. Получены передаточные функции ПИД-регулятора и системы автоматического регулирования температуры в проточном электродном нагревателе воды, которые позволяют в дальнейшем получить логарифмические амплитудно-частотные характеристики, проверить САР на устойчивость, осуществить настройку синтезированного регулятора и разработать инженерную методику синтеза регулятора и замкнутой САР по управляющему воздействию.

Keywords: electrode water heater, transfer function, mathematical model, automatic control system, PID-controller (Proportional-Integral-Derivative Controller).

Hot water is widely used in agriculture in heating systems, in forage production, in workshops, for sanitary and hygiene needs, in cleaning dairy equipment on dairy farms, etc. Those technological processes are highly energy-consuming. The optimization of operation regimes of electrode water heater and the improvement of its energy performance requires the regulation of heating parameters. The research goal is the synthesis of the transfer functions of the regulator and the automatic control system of water temperature in electrode direct-flow water heater. The transfer function of an electrode direct-flow water heater in terms of control action is derived; the function takes into account the results of mathematical modeling of water heating process in an electrode water heater

and the heat exchange with the environment. The block diagram of linearized automatic control system of water temperature in an electrode heater is set up. Since the order and values of time constants are unknown, it is appropriate to apply a PID-controller, because neither P-controller (proportional controller) nor proportional plus reset controller compensate (adjust) the time constants simultaneously. The application of PID-control enables maintaining water temperature fluctuations more accurately with high sensitivity to the deviations of the optimum settings,

but that is limited by the complexity of their settings. The obtained transfer functions of PID-controller and the automatic control system of water temperature in electrode direct-flow water heater further enable obtaining logarithmic amplitude-frequency characteristics, testing the automatic control system for stability, adjusting the synthesized controller and developing an engineering practice of synthesis of controller and closed-loop automatic control system in terms of control action.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., проф., зав. каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Калинин Цезарь Иванович, к.т.н., доцент, каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Горшенин Владимир Геннадьевич, аспирант, каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: vladimirg88@list.ru.

Bagayev Andrey Alekseyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Kalinin Tsezar Ivanovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Gorshenin Vladimir Gennadyevich, Post-Graduate Student, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: vladimirg88@list.ru.

Введение

В сельском хозяйстве горячую воду широко используют в системах отопления, в процессах кормоприготовления, в мастерских, для удовлетворения санитарно-гигиенических нужд, мытья посуды на животноводческих фермах, сепараторов, пастеризаторов, молокопроводов, автоцистерн, молочных танков и т.д. Перечисленные технологические процессы являются весьма энергоемкими.

Вместе с тем серьезные недостатки теории электродного нагрева, используемой в настоящее время, не обеспечивают максимальной теплопроизводительности и минимальных затрат электроэнергии в процессе функционирования электродных водонагревателей.

Оптимизация режимов работы электродной установки и повышение ее энергоэффективности требуют применения регулирования параметров нагрева.

Объектом регулирования является электродный проточный нагреватель воды.

Цель работы – синтез передаточных функций регулятора и системы автоматического регулирования температуры воды в электродном проточном нагревателе.

Результаты

математического моделирования

Используя результаты математического моделирования процессов нагрева воды в электродном нагревателе и теплообмена с окружающей средой, полученные в работах [1-2], можно записать:

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) \Delta T_B = \frac{\alpha_{\text{нар}} + 1}{F_{\text{ор}} \alpha_{\text{нар}}} (T_3 p + 1) \Delta P + \Delta T_{\text{нар}}, \quad (1)$$

где ΔT_B – изменение температуры нагреваемой среды (выходная переменная);

ΔP – приращение мощности нагревателя (управляющее воздействие);

$\Delta T_{\text{нар}}$ – изменение температуры окружающей среды (внешнее возмущение);

$\alpha_{\text{нар}}, \alpha_{\text{вн}}$ – коэффициенты теплообмена на внешней и внутренней поверхностях корпуса водонагревателя соответственно;

$F_{\text{ор}}$ – площадь поверхности корпуса.

Постоянные времени T_1, T_2, T_3 определяются следующим образом:

$$T_1 = \frac{C_{\text{ор}} \cdot m_{\text{ор}} \cdot C_B \cdot m_B}{F_{\text{ор}}^2 \cdot \alpha_{\text{вн}} \cdot \alpha_{\text{нар}}}; \quad (2)$$

$$T_2 = \left(C_{\text{ор}} \cdot m_{\text{ор}} + C_B \cdot m_B \left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right) \right) \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} \cdot F_{\text{ор}}}; \quad (3)$$

$$T_3 = \frac{C_{\text{ор}} \cdot m_{\text{ор}}}{F_{\text{ор}} \cdot \alpha_{\text{вн}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right)}, \quad (4)$$

где $C_B, C_{\text{ор}}$ – удельная теплоемкость воды и корпуса нагревателя;

$m_B, m_{\text{ор}}$ – масса воды в межэлектродном пространстве и корпуса.

Приращение мощности во времени ΔP в (1) может быть записано следующим образом [3, 4]:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot U_0}{R_{i/2}} \cdot \Delta U \cdot (t - \tau), \quad (5)$$

или в операторной форме

$$\Delta P(p) = \frac{2 \cdot U_0}{R_{i/2}} \cdot \Delta U \cdot e^{-p\tau}, \quad (6)$$

где U_0 – начальное значение напряжения;

$R_{i/2}$ – сопротивление нагреваемой воды на i -том участке аппроксимирования, $R_{i/2} = f(\Delta T_b)$;

ΔU – приращение напряжения;

τ – время запаздывания изменения ΔT_b от изменения ΔP .

С учетом (1) и (6) передаточная функция проточного электродного водонагревателя по управляющему воздействию принимает вид:

$$W_0(p) = \frac{\Delta T_B(p)}{\Delta U(p)} = \frac{k_1(T_3p + 1)}{(T_1p^2 + T_2p + 1)} \cdot e^{-p\tau}, \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_{нар}}{\alpha_{вн}} + 1$$

где $k_1 = \frac{\alpha_{вн}}{\alpha_{нар} \cdot F_{ор}}$

На первом этапе моделирования временем запаздывания пренебрегаем, т.е. $\tau = 0$ и $e^{-p\tau} = 1$. В дальнейшем τ может быть определено экспериментально [5, 6]. Задержку $e^{-p\tau}$ в дальнейшем возможно заменить Паде-аппроксимацией первого порядка [7].

Передаточная функция по возмущающему воздействию в соответствии с (1):

$$W_{вв}(p) = \frac{\Delta T_B(p)}{\Delta T_{нар}(p)} = \frac{1}{T_1p^2 + T_2p + 1}. \quad (8)$$

Уравнению (1) соответствует структурная схема объекта регулирования [8], показанная на рисунке 1.

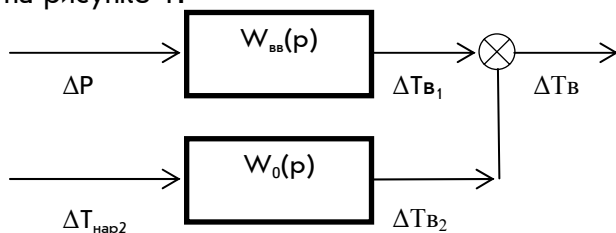


Рис. 1. Структурная схема объекта регулирования, соответствующая выражению (1)

Система автоматического регулирования (САР) температуры воды должна быть дополнена исполнительным органом (ИО) – тиристорным регулятором напряжения, усилителем (У), регулятором (Р), воспринимающим органом (ВО) – обратной связью, органом сравнения (СО).

На рисунке 2 изображена функциональная схема САР температуры воды в электродном нагревателе.

Тиристорный регулятор напряжения (ИО) и электронный усилитель (У) являются электронными устройствами, в которых входящие сигналы передаются на выход практически без временных задержек, с передаточными функциями [9]:

$$W_{ио}(p) = \frac{U(p)}{U_y(p)} = k_{тр}, \quad (9)$$

$$W_y(p) = \frac{U_y(p)}{U_p(p)} = k_y, \quad (10)$$

где $k_{тр}$, k_y – коэффициенты усиления тиристорного преобразователя и усилителя.

Передаточная функция звена обратной связи может быть рассмотрена в двух вариантах:

передаточной функцией отрицательной обратной связи:

$$W_{ос}(p) = \frac{\Delta T_B(p)}{\Delta U_{ос}(p)} = -1; \quad (11)$$

передаточной функцией термодпары (терморезистора) [4, 9]:

$$W_{ос}(p) = \frac{\Delta T_B(p)}{\Delta U_{ос}(p)} = \frac{k_{во}}{T_{во}p + 1}, \quad (12)$$

где $k_{во}$ – коэффициент усиления воспринимающего органа;

$T_{во}$ – постоянная времени воспринимающего органа.

Как указывается в [10], коррекция контура на рисунке 2 должна осуществляться путем придания определенных динамических свойств регулятору.

В связи с этим целесообразно отнести объект регулирования, тиристорный преобразователь и усилитель к неизменяемой части системы, учитывая выражения (7) (при $\tau = 0$), (9) и (10).

Передаточная функция неизменяемой части:

$$W_H(p) = W_y(p) \cdot W_{ио}(p) \cdot W_0(p) = k_y \cdot k_{тр} \cdot \frac{k_1(T_3p + 1)}{(T_1p^2 + T_2p + 1)}. \quad (13)$$

Результатом преобразования (13) является:

$$W_H(p) = k_y \cdot k_{тр} \cdot \frac{k_1(T_3p + 1)}{(T_8p + 1)(T_9p + 1)}, \quad (14)$$

где $T_8 = \frac{1}{\alpha_3}$, $T_9 = \frac{1}{\alpha_4}$ (α_3 и α_4) – вещественные отрицательные коэффициенты характеристического уравнения $T_1p^2 + T_2p + 1 = 0$.

Структурная схема линеаризованной САР температуры воды в электродном нагревателе, составленная на основании рисунка 2 и выражений (13) и (14), показана на рисунке 3.

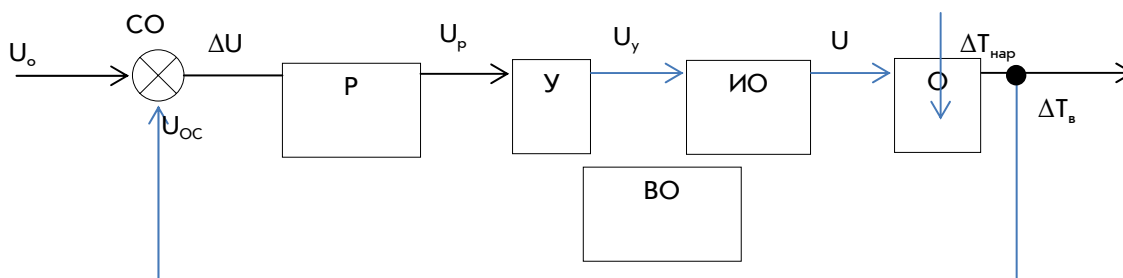


Рис. 2. Функциональная схема САР температуры воды в электродном нагревателе

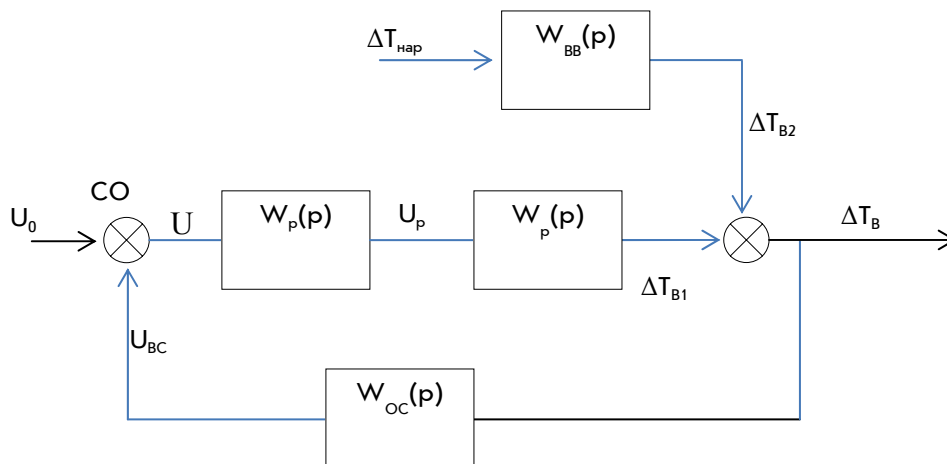


Рис. 3. Структурная схема САР температуры воды в электродном нагревателе

В силу того, что не известны порядок и значения постоянных времени T_1 , T_2 и, следовательно, T_8 , T_9 , целесообразно применить ПИД-регулятор, поскольку ни П-регулятор с передаточной функцией $W_p(p) = k_n$, ни ПИ-регулятор с передаточной функцией $W_p(p) = W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{T_{\text{ПИ}} + 1}{T_{\text{ПИ}}p}$ не позволяют

скомпенсировать (скорректировать) при соответствующей настройке обе постоянных времени T_8 и T_9 в формуле (14) одновременно: исключительно только одну из них.

Использование закона ПИД-регулирования позволяет поддерживать колебания температуры воды более точно с высокой чувствительностью к отклонению оптимума их настроек, но ограничено сложностью их настройки [11].

Вместе с тем, учитывая тот факт, что эксплуатация САР с ПИ-регулятором в отличие от системы с ПИД-регулятором обеспечивает возможность применения шагового метода для получения требуемого вида переходного процесса и меньшую (но достаточную) чувствительность к отклонению оптимума их настроек (что не позволяет САР с ПИД-регулятором [10]), направлением дальнейшего исследования следует считать использование ПИ-регулятора для рассматриваемого объекта, поскольку регулятор указанного

типа способен компенсировать большую из двух постоянных времени T_8 или T_9 .

Передаточная функция ПИД-регулятора с идеализированным дифференцирующим звеном имеет вид [12]:

$$W_p(p) = W_{\text{П}}(p) + W_{\text{И}}(p) + W_{\text{Д}}(p) = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{T_{\text{И}}p} + k_{\text{Д}}T_{\text{Д}}p, \quad (15)$$

где $W_{\text{П}}(p)$, $W_{\text{И}}(p)$, $W_{\text{Д}}(p)$ – передаточные функции пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев;

$k_{\text{П}}$, $k_{\text{И}}$, $k_{\text{Д}}$ – коэффициенты усиления соответствующих звеньев;

$T_{\text{И}}$, $T_{\text{Д}}$ – постоянные времени интегрального и дифференцирующего звеньев.

Передаточная функция ПИД-регулятора с реальным дифференцирующим звеном [13] имеет вид:

$$W_p(p) = W_{\text{П}}(p) + W_{\text{И}}(p) + W_{\text{Д}}(p) = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{T_{\text{И}}p} + \frac{k_{\text{Д}}T_{\text{Д}}p}{T_{\text{Д}}p + 1}. \quad (16)$$

Коэффициент дифференцирующего звена $\frac{1}{T_{\text{Д}}p + 1}$ по существу является передаточной функцией фильтра [11].

Результатом преобразования (16) является:

$$W_p(p) = \frac{p^2 \cdot T_{и} \cdot T_{д} \frac{k_{п} + k_{д}}{k_{п} + k_{и}} + p \cdot \frac{k_{и}}{k_{п} + k_{и}} \left(\frac{k_{п}}{k_{и}} T_{и} + T_{д} \right) + 1}{p \cdot T_{и} \cdot \frac{1}{k_{п} + k_{и}} \cdot (T_{д} p + 1)} \quad (17)$$

Рассмотрим числитель (17), введя следующие обозначения:

$$T_4 = T_{и} T_{д} \frac{k_{п} + k_{д}}{k_{п} + k_{и}}; \quad (18)$$

$$T_5 = \frac{k_{п}}{k_{п} + k_{и}} \cdot \left(\frac{k_{п}}{k_{и}} \cdot T_{и} + T_{д} \right). \quad (19)$$

В результате приравнивания к нулю, числитель (17) принимает вид:

$$p^2 T_4 + p T_5 + 1 = 0, \quad (20)$$

корнями которого являются:

$$p_{1,2} = -\alpha_{1,2} = -\frac{T_5}{2T_4} \pm \sqrt{\frac{T_5^2}{4T_4^2} - \frac{1}{T_4}} = -\frac{m \cdot T_5}{2} \pm \sqrt{\frac{m^2 T_5^2}{4} - m} \quad (21)$$

где $m = \frac{1}{T_4}$.

При $m > \frac{4}{T_5^2}$ получим

$$p^2 T_4 + p T_5 + 1 = (T_6 p + 1)(T_7 p + 1), \quad (22)$$

где $T_6 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{-\frac{T_5}{2T_4} + \sqrt{\frac{T_5^2}{4T_4^2} - \frac{1}{T_4}}}$;

$$T_7 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{-\frac{T_5}{2T_4} - \sqrt{\frac{T_5^2}{4T_4^2} - \frac{1}{T_4}}}.$$

Таким образом, передаточная функция ПИД-регулятора для САР-объекта может быть записана в виде

$$W_6(p) = \beta_p \frac{(T_6 p + 1)(T_7 p + 1)}{p \cdot T_{и} \cdot \frac{1}{k_{п} + k_{и}} \cdot (T_{д} p + 1)}, \quad (23)$$

где β_p – динамический коэффициент регулятора [10].

Следовательно, передаточная функция разомкнутой скорректированной [10] системы по управляющему воздействию в соответствии с рисунком 3 принимает вид:

$$W_p(p) = W_p(p) \cdot W_{и}(p) = \beta_p \frac{(T_6 p + 1)(T_7 p + 1)}{p \cdot T_{и} \cdot \frac{1}{k_{п} + k_{и}} \cdot (T_{д} p + 1)} \cdot \frac{k_1 (T_3 p + 1)}{(T_8 p + 1)(T_9 p + 1)} \quad (24)$$

Если в выражении (24) принять $T_6 = T_8$, $T_7 = T_9$, $T_{д} = T_3$, то дальнейший поиск параметров ПИД-регулятора целесообразно проводить в зависимости от динамического коэффициента β_p .

Пусть

$$\beta_p = \frac{1}{k_1} \cdot \frac{T_{и}}{k_{п} + k_{и}} \cdot \frac{1}{k_y + k_{тр}} \quad (25)$$

Тогда в соответствии с (24) получим интегрирующее звено первого порядка без усиления [14]:

$$W_p(p) = \frac{1}{p}. \quad (26)$$

Если

$$\beta_p = \frac{T_4}{k_{п} + k_{и}} \cdot \frac{1}{k_y + k_{тр}}, \quad (27)$$

то получаем интегрирующее звено порядка с усилением

$$W_p(p) = \frac{k_1}{p}. \quad (28)$$

Если

$$\beta_p = \frac{1}{k_{п} + k_{и}} \cdot \frac{1}{k_y + k_{тр}}, \quad (29)$$

то

$$W_p(p) = \frac{k_1}{T_{и} p}. \quad (30)$$

Если

$$\beta_p = \frac{1}{k_1} \cdot \frac{1}{k_{п} + k_{и}} \cdot \frac{1}{k_y + k_{тр}}, \quad (31)$$

то

$$W_p(p) = \frac{1}{T_{и} p}. \quad (32)$$

Подбор коэффициента определяется техническими возможностями реализации.

Передаточная функция $W_3(p)$ замкнутой САР по управляющему воздействию определяется в соответствии с известными положениями теории автоматического регулирования для отрицательной обратной связи [4, 14] (рис. 3).

Предположим, что $W_{ос}(p) = -1$ (11).

Тогда для передаточной функции (26) имеем

$$W_3(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p) \cdot W_{ос}(p)} = \frac{1}{p + 1}; \quad (33)$$

для передаточной функции (28)

$$W_3(p) = \frac{k_1}{p + k_1}; \quad (34)$$

для передаточной функции (30)

$$W_3(p) = \frac{k_1}{T_n p + k_1}; \quad (35)$$

для передаточной функции (32)

$$W_3(p) = \frac{1}{T_n p + 1}.$$

Если в качестве воспринимающего воздействия выступает термосопротивление с передаточной функцией (12), то в этом случае получаем:

для передаточной функции (26)

$$W_3(p) = \frac{\frac{1}{k_{BO}}(T_{BO} \cdot p + 1)}{\frac{1}{k_{BO}} \cdot p \cdot (T_{BO} \cdot p + 1) + 1}; \quad (37)$$

для передаточной функции (28)

$$W_3(p) = \frac{\frac{1}{k_{BO}}(T_{BO} \cdot p + 1)}{\frac{1}{k_1 \cdot k_{BO}} \cdot p \cdot (T_{BO} \cdot p + 1) + 1}; \quad (38)$$

для передаточной функции (30)

$$W_3(p) = \frac{\frac{1}{k_{BO}}(T_{BO} \cdot p + 1)}{\frac{T_n}{k_1 \cdot k_{BO}} \cdot p \cdot (T_{BO} \cdot p + 1) + 1}; \quad (39)$$

для передаточной функции (32)

$$W_3(p) = \frac{\frac{1}{k_{BO}}(T_{BO} \cdot p + 1)}{\frac{T_n}{k_{BO}} \cdot p \cdot (T_{BO} \cdot p + 1) + 1}. \quad (40)$$

Передаточным функциям, представленным выражениями (33)-(40), соответствует структурная схема САР (рис. 4).

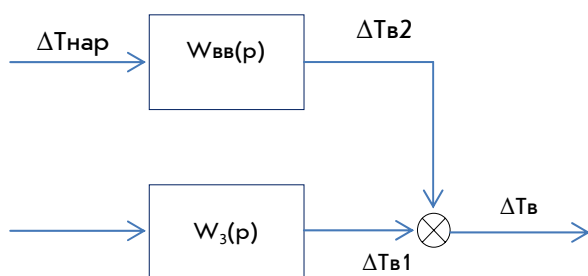


Рис. 4. Структурная схема замкнутой скорректированной САР

Заключение

Результатом математического моделирования явилось получение передаточных функций ПИД-регулятора и системы автоматического регулирования температуры в проточном электродном нагревателе воды, позволяющее осуществлять выбор параметров регулятора для электродного водонагревателя, характеризующегося конкретными геометрическими характеристиками и производительностью по расходу воды.

Полученные передаточные функции позволяют в дальнейшем получить логарифмические амплитудно-частотные характеристики, проверить САР на устойчивость, осуществить настройку синтезированного регулятора и разработать инженерную методiku синтеза регулятора и замкнутой САР по управляющему воздействию.

Библиографический список

1. Багаев А.А., Калинин Ц.И., Горшенин В.Г. Передаточная функция электродного водонагревателя по возмущающему воздействию // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 8 (94). – С. 122-125.
2. Багаев А.А., Калинин Ц.И., Горшенин В.Г. Передаточная функция электродного водонагревателя по мощности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 11. – С. 91-94.
3. Багаев А.А., Резинов В.Г., Калинин Ц.И., Горшенин В.Г. Линеаризованная математическая модель динамических свойств проточного электродного водонагревателя по электрическому току и напряжению // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 5.
4. Бородин И.Ф., Кирилин Н.И. Практикум по основам автоматики и автоматизации производственных процессов. – М.: Колос, 1974. – С. 255.
5. Багаев А.А., Калинин Ц.И., Горшенин В.Г., Булавцев В.И. Экспериментальное определение передаточной функции электродного водонагревателя по его кривой разгона // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 5. – С. 114-118.
6. Мартыненко И.И. Проектирование монтаж и эксплуатация систем автоматики. – М.: Колос, 1981. – 304 с.

7. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. – 460 p.

8. Топчиев Ю.И., Цыпляков А.П. Задачник по теории автоматического регулирования: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1977. – 592 с.

9. Карташов Б.А. Практикум по автоматике. Математическое моделирование систем автоматического регулирования. – М.: Колос, 2006. – 184 с.

10. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 272 с.

11. Полищук А.В. Настройка ПИД-регулятора систем автоматического регулирования объектов теплоэнергетического оборудования [электронный ресурс]. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет. – С. 19. www.sworld.com.ua/konfer26/836.pdf.

12. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модернизации // СТА. – 2006. – № 6. – С. 66-74.

13. Вагин П.И., Глебович А.А. Основы автоматизации и автоматизации производственных процессов в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1964. – 271 с.

References

1. Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Gorshe- nin V.G. Peredatochnaya funktsiya elektrod- ного водонагревателя по возмущающему воздействию // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2012. – № 8 (94). – S. 122-125.

2. Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Gorshe- nin V.G. Peredatochnaya funktsiya elektrod- ного водонагревателя по мощности // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 11. – S. 91-94.

3. Bagaev A.A., Rezinov V.G., Kalinin Ts.I., Gorshenin V.G. Linearizovannaya matema- ticheskaya model' dinamicheskikh svoistv

protochnogo elektrodного водонагревателя по электрическому току и напряжению // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 5.

4. Borodin I.F., Kirilin N.I. Praktikum po osnovam avtomatiki i avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov. – М.: Kolos, 1974. – S. 255.

5. Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Gorshe- nin V.G., Bulavtsev V.I. Eksperimental'noe opredelenie peredatochnoi funktsii elektrodного водонагревателя по его кривой разгона // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013 – № 5. – S. 114-118.

6. Martynenko I.I. Proektirovanie montazh i ekspluatatsiya sistem avtomatiki. – М.: Kolos, 1981. – 304 с.

7. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. – 460 p.

8. Topcheev Yu.I., Tsyplyakov A.P. Zadachnik po teorii avtomaticheskogo regulirovaniya: uchebnoe posobie. – М.: Mashinostroenie, 1977. – 592 с.

9. Kartashov B.A. Praktikum po avtomatike. Matematicheskoe modelirovanie sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. – М.: Kolos, 2006. – 184 с.

10. Sokolovskii G.G. Elektroprivody pereg- menного тока s chastotnym regulirovaniem. – М.: Akademiya, 2006. – 272 с.

11. Polishchuk A.V. Nastroyka PID regulyatora sistem avtomaticheskogo regulirovaniya ob"ektov teploenergeticheskogo oborudovaniya [elektronnyi resurs]. – Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. – S. 19. www.sworld.com.ua/konfer26/836.pdf.

12. Denisenko V. PID-regulyatory: printsipy postroyeniya i modernizatsii // СТА. – 2006. – № 6. – S. 66-74.

13. Vagin P.I., Glebovich A.A. Osnovy avtomatiki i avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov v sel'skom khozyaistve. – М.: Kolos, 1964. – 271 с.

