

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (05.09.03)

УДК 004.9:621.1 (045)

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-73-80

## Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями

В.В. Лыготчиков, Т.С. Ларькина

Предложен алгоритм синтеза системы автоматического регулирования температуры жидкости. Практическое применение результат может найти в сельском хозяйстве, отрасли переработки и сохранения продуктов, химической отрасли при программном задании температурного режима жидкой среды. Динамическое тепловое равновесие рассмотрено в системе, состоящей из индуктора, вторичного тела, нагреваемого токами Фуко, и объёма жидкой среды. Учтены теплообмен с внешней средой и зависимость активного сопротивления индуктора и вторичного тела от температуры. Применена линеаризация уравнений, описывающих теплообменные процессы, выполнен синтез по частотным критериям. Предложен алгоритм подбора параметров корректирующего фильтра Баттерворта первого порядка. Этапы синтеза и анализа иллюстрируются годографами, переходными и динамическими характеристиками. Рассмотрена проблема учёта форсировки в канале питающего напряжения при введении корректирующих устройств. Предполагается использовать результаты в программном обеспечении системы автоматического регулирования, выполненной на базе микроконтроллера. Контроллер, кроме качественного управления температурным режимом, в перспективе обеспечит оптимизацию энергетической эффективности работы устройства, идентификацию параметров тепловой и электрической модели, недоступных для непосредственного измерения, оптимальное пространственное формирование теплового воздействия на жидкость. Значительная инерционность объекта позволяет решить указанный набор проблем в реальном масштабе времени.

*Ключевые слова:* теплопередача, теплообмен, логарифмические частотные и динамические характеристики, корректирующее звено, переходная функция, программное обеспечение, микроконтроллер, годограф.

*Для цитирования:* Лыготчиков В.В., Ларькина Т.С. Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 73—80. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-73-80.

## Synthesis of Liquid Temperature Automatic Control System with Improved Dynamic Performance Indicators

V.V. L'gotchikov, T.S. Lar'kina

An algorithm for synthesizing an automatic liquid temperature control system is proposed. The obtained result can find practical application in agriculture, in processing and preservation of products and in the chemical industry in programmed setting of liquid medium temperature conditions. Dynamic thermal equilibrium is considered in a system consisting of an inductor, a secondary body heated by eddy currents, and a volume of liquid medium. The heat transfer with respect to the environment and the dependence of the inductor and secondary body resistances on temperature are taken into account. The equations describing the heat transfer processes are linearized, and the control system is synthesized subject to the frequency criteria. An algorithm for selecting the parameters of the correcting Butterworth first-order filter is proposed. The synthesis and analysis stages are illustrated by root loci, transient and dynamic characteristics. The problem of taking into account the forcing in the power supply voltage channel in the case of introducing correction devices is considered. The obtained results are supposed to be used in the software of the microcontroller-based automatic control system. The use of the controller will make it possible, in addition to high-quality control of temperature conditions, to optimize the device operation energy efficiency, to identify the parameters of the thermal and electrical models that are not accessible for direct measurement, and to set up the optimal spatial thermal effect on the liquid. In view of a significant inertia of the controlled plant, the above-mentioned set of problems can be solved in the real time mode.

*Key words:* heat transfer, logarithmic frequency and dynamic characteristics, correction section, transient function, software, microcontroller, root loci.

*For citation:* L'gotchikov V.V., Lar'kina T.S. Synthesis of Liquid Temperature Automatic Control System with Improved Dynamic Performance Indicators. Bulletin of MPEI. 2019;5:73—80. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-73-80.

### Введение

Системы автоматического регулирования (САР) технологических установок с цифровыми устройствами управления вне зависимости от мощности установки и масштабов производства требуют разработки алгоритмов, способных проявить все преимущества интеллектуализированного управления. Проектирование САР-устройства для нагрева жидкости преследует цели улучшения управляемости технологическими параметрами, повышения производительности и энергетической эффективности установки, оптимизации размера массива первичных данных, использования приёмов идентификации ненаблюдаемых, но важных параметров технологического процесса.

Решены задачи получения математического описания процесса нагрева в операторной форме, использования приёмов частотного анализа и синтеза САР, формирования тепловой модели процесса для последующего учёта результатов синтеза в цифровом алгоритме работы микроконтроллера. Модель должна быть информативной и по сложности приемлемой для реализации

возможности построения цифрового программного алгоритма управления объектом с использованием микроконтроллера общепромышленного назначения.

Рассмотрен технологический процесс нагрева жидкой среды. Элементы установки средней мощности (до 10...15 кВт), участвующие в процессе нагрева жидкости, представлены на рис. 1.

Энергообмен осуществляется между индуктором 1 с температурой  $t_1$  и превышением температуры  $\tau_1$  над температурой окружающей среды  $t_4$ , причём  $\tau_1 = t_1 - t_4$ , массивом вторичного тела 2 с превышением температуры  $\tau_2$ , жидкостью 3 с превышением температуры  $\tau_3$  [1 — 3]. Для краткости назовем превышение температуры температурой элемента. Индуктор с источником напряжения  $u_1$  и током  $i_1$  формирует переменное магнитное поле, а в модели вторичного тела учтён эффект его нагрева токами Фуко (вихревыми токами)  $i_2$ . Жидкость может быть рассолом с приготавливаемым продуктом, водой для пастеризации, «водяной баней» для приготовления диетических блюд и т. п. Каждый из вариантов приготавливаемого продукта может требовать своей программы изменения температуры, что

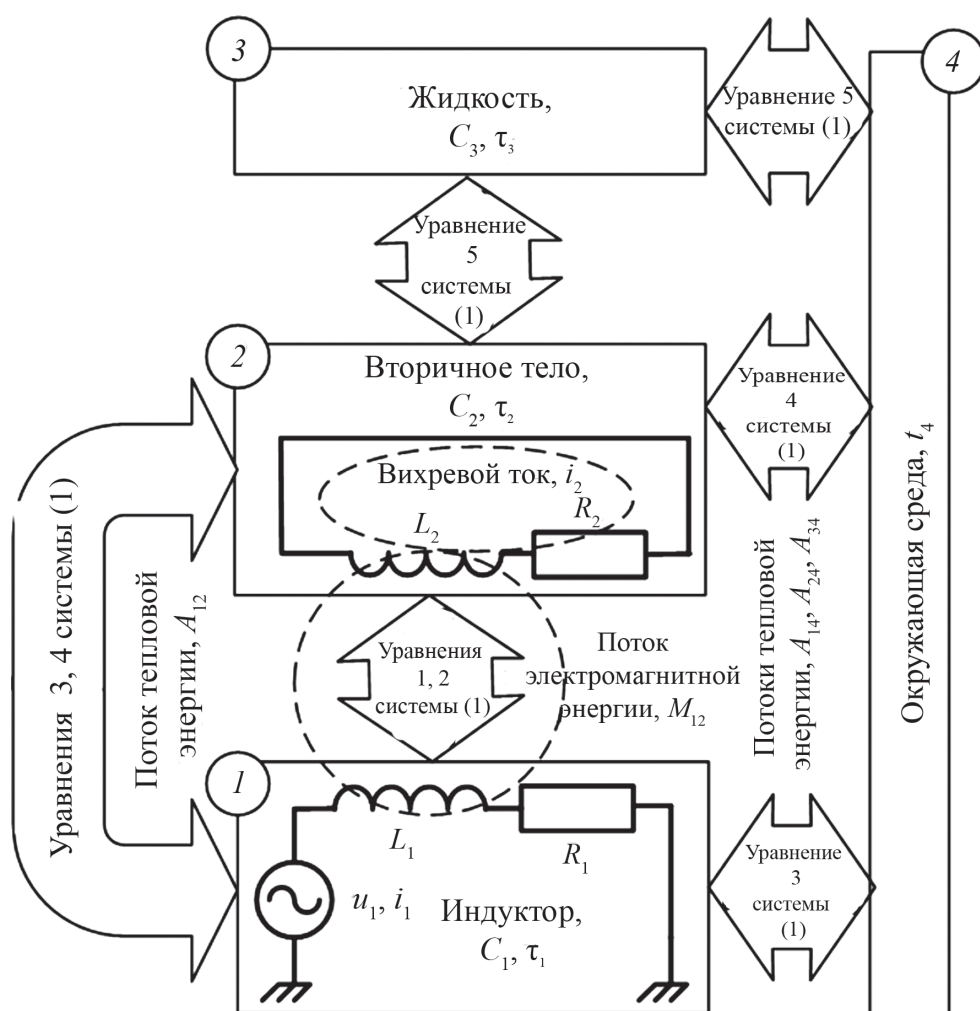


Рис. 1. Схема процесса энергообмена нагревателя жидкости

легко осуществляется контроллером. Потоки электромагнитной и тепловой энергии между упомянутыми элементами структуры и окружающей средой представлены. Детали конструкции нагревателя, конфигурация в пространстве узлов устройства в материале не рассматриваются. Преобразователь считается безинерционным элементом в структуре, представлен как источник действующего напряжения с единичным коэффициентом передачи. Учёт свойств источника и особенностей конструкции индуктора — цель дальнейшей разработки темы.

Приведены параметры электромагнитных цепей индуктора и вторичного тела: активные  $R_1, R_2$  и индуктивные  $L_1, L_2$  сопротивления, коэффициент взаимной индукции  $M_{12}$ . Теплоёмкости отдельных элементов схемы обозначены через  $C_j$  при  $j = 1, 2, 3$ , а коэффициенты теплопередачи — через  $A_{jk}$  при  $j = 1, 2, 3; k = 2, 3, 4$  и  $j \neq k$ .

Модель контура токов Фуко — однослойная с сосредоточенными параметрами. Учтено изменение активных сопротивлений индуктора и вторичного тела при нагреве (температурный коэффициент  $\alpha$  при базовой температуре 20 °С). Система дифференциальных уравнений в операторной форме, описывающих процесс нагрева жидкости, имеет вид:

$$\begin{cases} u_1(p) = i_1(p) \{ R_1 [1 + \alpha(\tau_1(p) + t_4 - 20)] + L_1 p \} - \\ - i_2(p) M_{12} p; \\ 0 = -i_1(p) M_{12} p + i_2(p) \times \\ \times \{ R_2 [1 + \alpha(\tau_2(p) + t_4 - 20)] + L_2 p \}; \\ i_1^2(p) R_1 [1 + \alpha(\tau_1(p) + t_4 - 20)] = \\ = A_{12} (\tau_1(p) - \tau_2(p)) + \tau_1(p) C_1 p + A_{14} \tau_1(p); \\ i_2^2(p) R_2 [1 + \alpha(\tau_2(p) + t_4 - 20)] = A_{12} (\tau_2(p) - \tau_1(p)) + \\ + A_{23} (\tau_2(p) - \tau_3(p)) + \tau_2(p) C_2 p + A_{24} \tau_2(p); \\ A_{23} (\tau_2(p) - \tau_3(p)) = \tau_3(p) C_3 p + A_{34} \tau_3(p). \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 1 показаны направления теплообмена и перетока электромагнитной энергии с указанием номеров соответствующих уравнений системы (1).

Первые два уравнения — уравнения электромагнитной цепи индуктора и вторичного тела. Уравнение 4 системы (1) определяет баланс мощностей для вторичного тела с вихревыми токами. Левая часть равна мощности тепловой энергии, выделяющейся на активном сопротивлении контура тока Фуко. Активное сопротивление контура зависит в первом приближении от превышения температуры над 20 °С. Первое слагаемое правой части характеризует теплопередачу от вторичного тела к индуктору. Если температура индуктора выше, то направление потока энергии меняется, и в этом случае эта составляющая с плюсом оказывается в левой части и вызывает нагрев вторичного тела

(третье слагаемое правой части). Второе и четвёртое слагаемые левой части четвёртого уравнения системы (1) вносят в уравнение баланса составляющие теплопередачи между вторичным телом и жидкой средой, а также между вторичным телом и окружающей средой. Подобный анализ выдерживают и оставшиеся уравнения системы (1) [4, 5].

Только одно уравнение в системе линейное — пятое. Остальные уравнения являются нелинейными: они либо содержат произведение переменных величин, либо переменные величины, возведённые во вторую степень. Для правомерности использования частотных критериев анализа и синтеза САР линеаризуем систему уравнений, представив каждую из шести переменных  $u_1(p), i_1(p), i_2(p), \tau_1(p), \tau_2(p), \tau_3(p)$  в виде  $x = X + \Delta x(p)$ . Причём  $X$  — координата, в окрестности которой рассматривается динамический процесс, характеризующий статический режим, а  $\Delta x(p)$  — изображение флуктуации координаты (переменной), бесконечно малая величина. Систему (1) перепишем для флуктуаций переменных, пренебрегая в уравнениях составляющими статического баланса, бесконечно малыми второго порядка и слагаемыми с множителем  $I_2$ , поскольку этот ток в статике равен нулю. Постоянный ток баланса статического режима индуктора  $I_1$  продолжает участвовать в процессе теплообмена, так как вносит вклад в нагрев индуктора.

Условимся для компактности записи под прежними обозначениями переменных понимать их флуктуации, а под обозначениями переменных с написанием прописными буквами — соответствующую координату статического режима, в окрестности которого рассматривается динамический процесс.

Система уравнений (1) относительно флуктуаций переменных имеет вид:

$$\begin{cases} u_1(p) = i_1(p) R_1 + \\ + \alpha [ \tau_1(p) I_1 + i_1(p) (T_1 + t_4 - 20) ] R_1 + \\ + i_1(p) L_1 p - i_2(p) M_{12} p; \\ 0 = -i_1(p) M_{12} p + i_2(p) \times \\ \times \{ R_2 [1 + \alpha(T_2 + t_4 - 20)] + L_2 p \}; \\ 2i_1(p) I_1 R_1 [1 + \alpha(T_1 + t_4 - 20)] = \\ = A_{12} (\tau_1(p) - \tau_2(p)) + \\ + \tau_1(p) C_1 p + A_{14} \tau_1(p); \\ 0 = A_{12} (\tau_2(p) - \tau_1(p)) + A_{23} (\tau_2(p) - \tau_3(p)) + \\ + \tau_2(p) C_2 p + A_{24} \tau_2(p); \\ A_{23} (\tau_2(p) - \tau_3(p)) = \tau_3(p) C_3 p + A_{34} \tau_3(p). \end{cases} \quad (2)$$

Решим систему уравнений (2) относительно неизвестных  $i_1(p), i_2(p), \tau_1(p), \tau_2(p), \tau_3(p)$ , используя пакет символьной математики Maple [6]. Общее решение имеет громоздкий вид, поэтому численное решение

приведём для установки нагрева жидкости средней мощности с параметрами, сведёнными в таблицу.

Учитываются параметры конструктивных и электротехнических материалов (массы индуктора ( $m_1 \approx 1$  кг), вторичного тела ( $m_2 \approx 2$  кг), жидкости ( $m_3 \approx 5$  кг)), параметры электрической и тепловой цепи (удельные теплоёмкости железа  $c_1 = c_2 = 460$  Дж/кг·°С, воды  $c_3 = 4200$  Дж/кг·°С) при известной связи параметров  $C_i = c_i m_i$  [7]. Коэффициент теплопередачи численно равен количеству теплоты, которое переходит в единицу времени через контактную площадь в  $1 \text{ м}^2$  теплообменной поверхности при разности температур между теплоносителями в  $1 \text{ °С}$ . Величины контактных площадей индуктор – вторичное тело, вторичное тело – жидкость и каждого из упомянутых элементов с окружающей средой принимаются равными 0,4; 0,8; 0,1; 0,1; 0,4  $\text{м}^2$ , соответственно. В таблице допускаются округление численных значений параметров потому, что часть из них к началу процесса управления не определены:  $R_2, L_2, M_{12}, C_3$ . В алгоритм работы микроконтроллера предполагается включение процедуры идентификации параметров по результатам первых шагов управления.

Из пяти уравнений решения системы (2) выберем одно, включающее зависимость  $\tau_3(p)$  от флуктуации питающего напряжения  $u_1(p)$ . Отношение указанных переменных даст выражение для передаточной функции разомкнутой системы, которая позволит оценить ресурс управления, считая входной величиной питающее напряжение, а выходной (регулируемой величиной) — температуру жидкости. За базовые величины для флуктуаций напряжения питания и температуры жидкости  $u_1, \tau_3$  примем единицы измерения этих величин: 1 В и 1 °С. Передаточная функция в операторной форме имеет вид:

$$W_{\tau_3}(p) = \frac{\tau_3(p)}{u_1(p)} = \frac{k(A_1 p + A_0)}{B_5 p^5 + B_4 p^4 + B_3 p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0}, \quad (3)$$

где коэффициенты числителя и знаменателя равны:  $k = 3,0 \cdot 10^5$ ;  $A_0 = 2,65$ ;  $A_1 = 0,0092$ ;  $B_0 = 1,12 \cdot 10^6$ ;  $B_1 = 4,73 \cdot 10^8$ ;  $B_2 = 3,64 \cdot 10^9$ ;  $B_3 = 4,18 \cdot 10^9$ ;  $B_4 = 1,93 \cdot 10^7$ ;  $B_5 = 15100$ .

Коэффициенты характеристического уравнения (3) положительны и, кроме того, нули  $p_{0i}$  и полюса  $p_{pi}$  передаточной функции (3) находятся в левой полуплоскости системы координат комплексной переменной. Ноль:  $p_{01} = -287,5$ . Полюса:  $p_{n1} = -0,00241$ ,  $p_{n2} = -0,155$ ,  $p_{n3} = -0,716$ ,  $p_{n4} = -274$ ,  $p_{n5} = -1003$ . Выполнено необходимое и достаточное условие устойчивости разомкнутой САР температуры жидкости  $\tau_3$  [8]. Структура замкнутой САР при отработке сигнала задания температуры жидкости  $\tau_{зад}$  представлена на рис. 2.

Выберем величину коэффициента обратной связи  $k_{oc}$  из условия обеспечения погрешности поддержания температуры  $\tau_3$  в статическом режиме, равной 30%. Безразмерный коэффициент обратной связи  $k_{oc}$ , включающий коэффициенты передачи датчика  $\tau_3$  и усиления канала цепей управления источником, находится в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{W_{кор}(0)W_{\tau_3}(0)}{1 + k_{oc}W_{кор}(0)W_{\tau_3}(0)} = 0,7; \\ W_{\tau_3}(0) = 0,708; \\ W_{кор}(0) = 1 \end{cases} \rightarrow k_{oc} = 0,0154. \quad (4)$$

### Параметры электрической, магнитной и тепловой цепи установки нагрева жидкости средней мощности

$A_{12}, \text{Вт/°С}$	$A_{14}, \text{Вт/°С}$	$A_{23}, \text{Вт/°С}$	$A_{24}, \text{Вт/°С}$	$A_{34}, \text{Вт/°С}$	$R_1, \text{Ом}$	$L_1, \text{Гн}$	$M_{12}, \text{Гн}$
200	20	200	20	20	0,3	$40 \cdot 10^{-5}$	$40 \cdot 10^{-5}$
$R_2, \text{Ом}$	$L_2, \text{Гн}$	$I_1, \text{А}$	$C_1, \text{Вт·с/°С}$	$C_2, \text{Вт·с/°С}$	$C_3, \text{Вт·с/°С}$	$\alpha, \text{Ом/°С}$	$T_1 = T_2, \text{°С}$
1	$40 \cdot 10^{-4}$	25	500	1000	21000	0,005	50

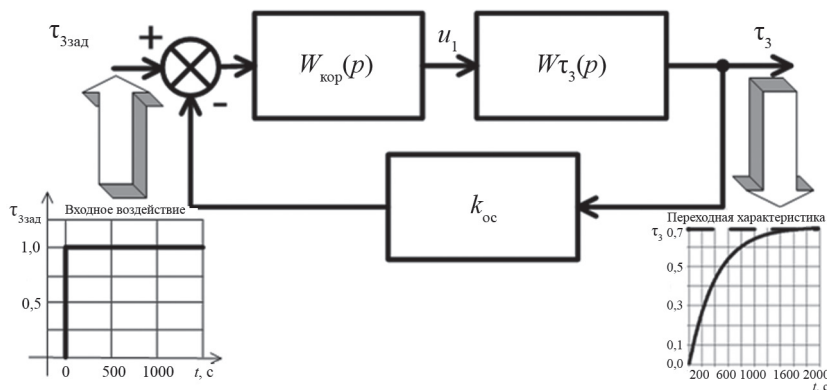


Рис. 2. Структура замкнутой САР температуры жидкости

Предварительные данные позволяют сформулировать условия устойчивости замкнутой САР с использованием частотного критерия Найквиста: годограф передаточной функции разомкнутой САР не должен охватывать точку с координатами  $(-1, j0)$  [8]. Переходная функция, совмещённая со структурой САР (см. рис. 2), иллюстрирует результат расчёта по (3), (4). Она без перерегулирования стремится к намеченному уровню сигнала в 0,7 ед. Для системы без корректирующего звена  $W_{кор}(p) = 1$  построим годограф передаточной функции разомкнутой САР, годограф Михайлова, и динамическую характеристику. Они представлены на рис. 3, а — в (кривая  $\tau_3$  при  $W_{кор}(p) = 1$ ), соответственно.

Вид характеристик подтверждает вывод об устойчивости САР: годограф передаточной функции разомкнутой САР не охватывает точку с координатами  $(-1, j_0)$  (рис. 3, а), годограф Михайлова (рис. 3, б) начинается на вещественной полуоси и последовательно проходит через 5 квадрантов, что соответствует характеристическому уравнению пятого порядка замкнутой системы без коррекции. САР имеет приемлемый вид переходной характеристики (см. рис. 2). По времени переходного процесса система коррекции не требует.

Синтез корректирующего звена выполняется из условия обеспечения заданной точности отслеживания сигнала на частоте, заданной технологической картой приготовления продукта (жидкой среды). Надо наметить не громоздкий (не графический) алгоритм, без рутинных построений асимптотических ЛАЧХ, адаптированный к принятию решения на уровне программного обеспечения управляющего контроллера. Параметры корректирующего звена должны определяться из аналитических соотношений. Контроллер получает данные о частоте воздействия задающего сигнала и точности слежения за ним из технологической карты и вырабатывает на этой основе корректирующий сигнал.

В качестве задающего сигнала (для численного примера) используется синусоидально изменяющийся сигнал на частоте  $\omega = 0,0178$  1/с ( $\lg_{10}(0,0178) = -1,75$ ). На этой частоте модуль передаточной функции уже мал (см. рис. 3, а). Результат расчёта показывает, что при входном воздействии (см. рис. 3, в, кривая  $\tau_{3зад}$ ) в нескорректированной САР изменение температуры жидкости имеет вид кривой  $\tau_3$  при  $W_{кор}(p) = 1$  (см. рис. 3, в).

Видно, что погрешность слежения за синусоидальным сигналом задания значительна ( $\Delta I = 0,606$ ), и

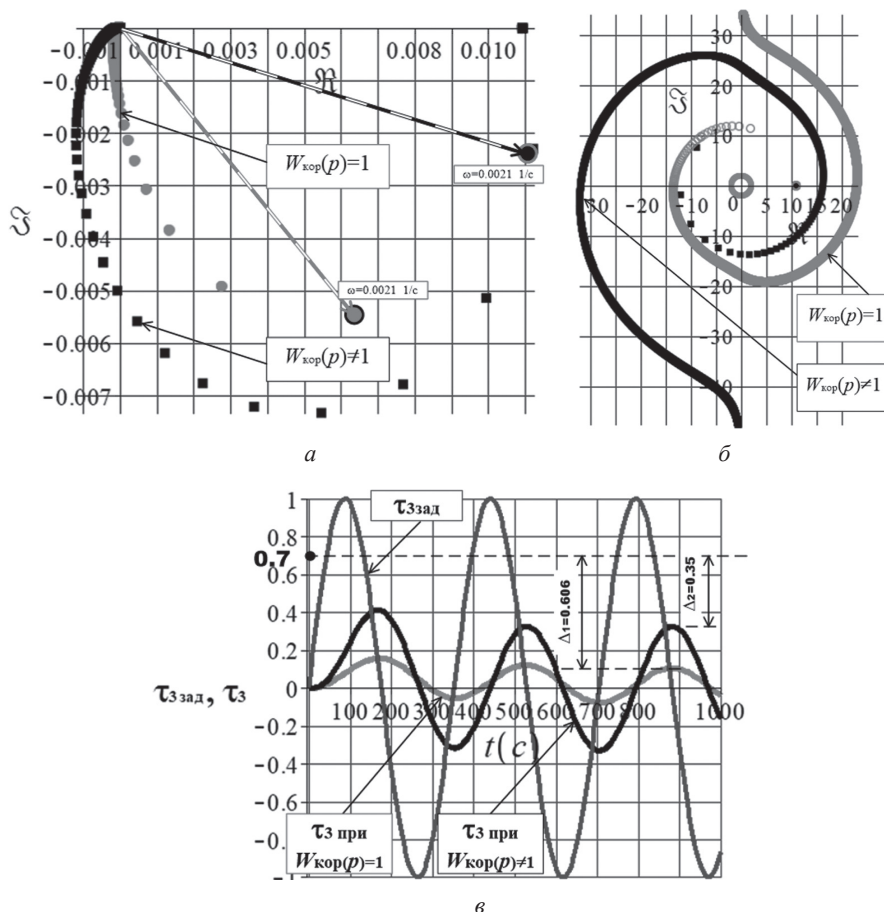


Рис. 3. Годографы передаточной функции разомкнутой САР (а), годографы характеристического уравнения замкнутой САР (Михайлова) (б), динамические характеристики САР (в):

$\tau_{3зад}$  — задающее воздействие;  $\tau_3$  — регулируемая величина;  $W_{кор}(p) = 1$  — опыт без коррекции;  $W_{кор}(p) \neq 1$  — опыт с корректирующим звеном



предполагается, что это не способствует обеспечению температурного режима, заданного технологической картой приготовления продукта. Требуется снизить погрешность в два раза ( $\Delta_2 = 1/2\Delta_1$ ). Для этого включается последовательное корректирующее звено  $W_{кор}(p) \neq 1$  по схеме рис. 2. В качестве корректирующего звена выберем фильтр Баттерворта 1-го порядка [9]. Определим требуемое значение модуля корректирующего звена САР на частоте  $|W_{кор}(\omega)|_{\omega=0,0178}$  из условия кратного повышения точности обработки задающего сигнала, решив систему уравнений:

$$\Delta_1 = U_{1M} \left( \frac{|W_{\tau_3}(0)|}{1+k_{oc}|W_{\tau_3}(0)|} - \frac{|W_{\tau_3}(\omega)|_{\omega=0,0178}}{1+k_{oc}|W_{\tau_3}(\omega)|_{\omega=0,0178}} \right);$$

$$\frac{\Delta_1}{2} = U_{1M} \left( \frac{|W_{\tau_3}(0)|}{1+k_{oc}|W_{\tau_3}(0)|} - \frac{|W_{кор}(\omega)|_{\omega=0,0178} |W_{\tau_3}(\omega)|_{\omega=0,0178}}{1+k_{oc}|W_{кор}(\omega)|_{\omega=0,0178} |W_{\tau_3}(\omega)|_{\omega=0,0178}} \right). \quad (5)$$

Упрощение, к которому обычно прибегают в вычислениях подобного рода (пренебрежение единицей в знаменателе передаточной функции (5)), неприемлемо, поскольку модуль на рабочей частоте передаточной функции значительно меньше единицы (см. рис. 3, а). В (5) учитывается, что из (3), при формальной замене оператора  $p \rightarrow j\omega$ ,  $|W_{\tau_3}(\omega)|_{\omega=0,0178} = 0,0945$ , а для назначенного вида корректирующего звена  $|W_{кор}(0)| = 1$ . При амплитуде синусоидального входного сигнала, равной единице  $\tau_{3max} = 1$ , используя соотношения (3) и (4), имеем из решения системы (5) значение модуля

корректирующего звена на выбранной частоте, равное  $|W_{кор}(\omega)|_{\omega=0,0178} = 4,23$  при  $\Delta I = 0,606$ . Для синтеза в поле ЛАЧХ вычислим  $20lg_{10}|W_{кор}(\omega)|_{\omega=0,0178} = 12,5$ . Частоты сопряжений асимптотической характеристики реализации фильтра (ЛАЧХ в форме трапеции) определим из графиков на рис. 4, а.

Продолжительность участков с наклоном в  $\pm 20$  дБ/дек. ЛАЧХ корректирующего звена определяется из подобия треугольников  $\Delta ABC \sim \Delta abc$ . Составим пропорцию, из которой определим продолжительность участков с наклоном в  $\pm 20$  дБ/дек.:

$$\frac{20lg_{10}|W_{кор}(\omega)|_{\omega=0,0178}}{\Delta} = \frac{20}{1} \Rightarrow \Delta = 0,626.$$

Последующие построения проиллюстрированы на рис. 4, а и дополнительных комментариев не требуют. Напротив каждой точки сопряжения асимптотической ЛАЧХ указаны соответствующие им постоянные времени корректирующего звена.

Передаточная функция для корректирующего звена с асимптотической ЛАЧХ трапецидальной формы  $W_{кор}(p)$  равна:

$$W_{кор}(p) = \frac{(1+488,7p)(1+6,471p)}{(1+115,6p)(1+27,35p)}. \quad (6)$$

Динамические характеристики с коррекцией по (6) даны на рис. 3, в (кривая  $\tau_3$  при  $W_{кор}(p) \neq 1$ ). Для САР с корректирующим звеном  $W_{кор2}(p)$  имеем погрешность, примерно равную расчётной величине  $0,7...0,35 \approx 0,3$ .

На рисунке 3, а показаны годографы разомкнутой системы с коррекцией (6) (кривая  $W_{кор}(p) \neq 1$ ) в срав-

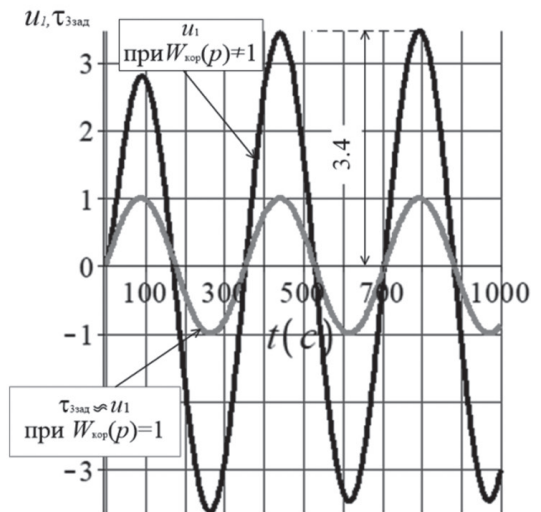
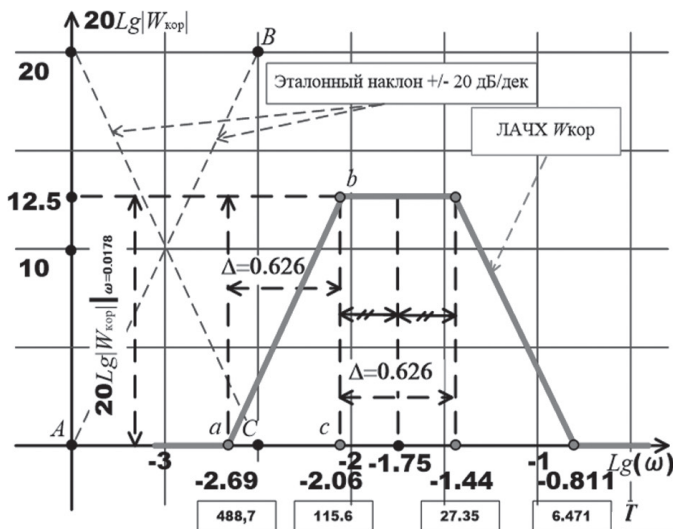


Рис. 4. ЛАЧХ корректирующего звена (а) и динамические характеристики питающего напряжения без коррекции  $W_{кор}(p) = 1$  и с корректирующим звеном  $W_{кор}(p) \neq 1$  (б)

нении с исходной нескорректированной системой ( $W_{\text{кор}}(p) = 1$ ), выделено положение векторов при частоте, равной максимальной из частот сопряжения корректирующего звена из рис. 4, а. На рисунке 3, б изображены годографы характеристического уравнения замкнутой САР для тех же двух случаев. Порядок характеристического уравнения увеличен коррекцией на два, поэтому годограф для скорректированной системы заканчивается в III квадранте. Видно расширение полосы пропускания САР в зоне рабочей частоты сигнала задания.

На рисунке 4, б представлен сигнал на выходе блока питания ( $u_1$  на выходе блока коррекции на рис. 2). Очевидно, что повышение качества динамической характеристики с введением корректирующих устройств достигается значительным ростом амплитуды действующего значения напряжения питания. Для скорректированной системы коэффициент форсировки определяется по амплитудам изменения действующего значения питающего напряжения  $u_{1\text{max}}$  в квазиустановившемся режиме (см. рис. 4, б):

$$k_{\text{ф}} = (u_{1\text{max}})_{|W_{\text{кор}}(p) \neq 1} / (u_{1\text{max}})_{|W_{\text{кор}}(p) = 1} = 3,4.$$

Он значителен, и эту особенность необходимо учитывать при проектировании индуктора и поиске компромиссных настроек.

### Литература

1. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейдулин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Издат. дом МЭИ, 2008.
2. Dolgikh I., Korolev A., Zakharov V. Temperature Processes of Induction Heating Simulation // Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach. Techn. Sci. 2014. V. 5. Pp. 68—74.
3. Банов М.Д. Технология и оборудование контактной сварки. М.: Академия, 2009.
4. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. М.: МЭИ, 2003.
5. Горнов А.О. Нагревание и охлаждение электрических двигателей. М.: МЭИ, 1980.
6. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчётах. М.: ДМК-Пресс, 2011.
7. Физическая энциклопедия. Т. 2. Добротность — Магнитооптика. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998.
8. Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1989.
9. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 2003.
10. Анучин А.С. Система управления электроприводов. М.: Издат. дом МЭИ, 2015.
11. Поляков К.Ю. Основы теории цифровых систем управления. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2006.

### Выводы

Линеаризованная математическая модель технологического процесса нагрева жидкости имеет характеристическое уравнение пятого порядка. При цифровом управлении прямое решение уравнения движения системы громоздко. Частотный анализ показывает значительный запас САР по устойчивости.

Коррекцию можно вводить с использованием простейшего фильтра Баттерворта 1-го порядка на рабочих технологических частотах без потери устойчивости, но с учётом форсировок, возникающих в силовом канале управления.

Цифровая скорректированная модель с использованием микроконтроллера САР способна обеспечить гибкие алгоритмы изменения температурного режима жидкой среды в соответствии с технологической картой приготовления продукта при увеличении динамической точности.

Синтез цифрового фильтра в качестве корректирующего устройства при известной величине периода квантования (учёт времени полного решения задачи управления с идентификацией параметров модели), использование перехода к z-оператору и псевдочастоте  $\tilde{\omega}$  возможны на заключительном этапе работы с учётом полученных результатов синтеза для непрерывной системы [10, 11].

### References

1. Kirilin V.A., Sychev V.V., Sheyduulin A.E. Tekhnicheskaya Termodinamika. M.: Izdat. dom MEI, 2008. (in Russian).
2. Dolgikh I., Korolev A., Zakharov V. Temperature Processes of Induction Heating Simulation. Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basiss and Innovative Approach. Techn. Sci. 2014;5:68—74.
3. Banov M.D. Tekhnologiya i Oborudovanie Kontaktnoy Svarki. M.: Akademiya, 2009. (in Russian).
4. P'inskiy N.F. Osnovy Elektroprivoda. M.: MEI, 2003. (in Russian).
5. Gornov A.O. Nagrevanie i Okhlazhdenie Elektricheskikh Dvigatelay. M.: MEI, 1980. (in Russian).
6. D'yakonov V.P. Maple 10/11/12/13/14 v Matematicheskikh Raschetakh. M.: DMK-Press, 2011. (in Russian).
7. Fizicheskaya entsiklopediya. T. 2. Dobrotnost' — Magnitooptika. M.: Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya, 1998. (in Russian).
8. Topcheev Yu.I. Atlas dlya Proektirovaniya Sistem Avtomaticheskogo Regulirovaniya. M.: Mashinostroenie, 1989. (in Russian).
9. Khorovits P., Khill U. Iskusstvo Skhemotekhniki. M.: Mir, 2003. (in Russian).
10. Anuchin A.S. Sistema Upravleniya Elektroprivodov. M.: Izdat. dom MEI, 2015. (in Russian).
11. Polyakov K.Yu. Osnovy Teorii Tsifrovyykh Sistem Upravleniya. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2006.

**Сведения об авторах:**

**Льготчиков Валерий Вениаминович** — доктор технических наук, профессор кафедры электромеханических систем Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: [vvldrive@yandex.ru](mailto:vvldrive@yandex.ru)

**Ларькина Татьяна Сергеевна** — аспирант кафедры электромеханических систем филиала Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: [tatyana.larkina.2015@yandex.ru](mailto:tatyana.larkina.2015@yandex.ru)

**Information about authors:**

**L'gotchikov Valeriy V.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electromechanical Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: [vvldrive@yandex.ru](mailto:vvldrive@yandex.ru)

**Lar'kina Tatyana S.** — Ph.D.-student of Electromechanical Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: [tatyana.larkina.2015@yandex.ru](mailto:tatyana.larkina.2015@yandex.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** *06.11.2018*

**The article received to the editor:** *06.11.2018*