

Куцкий Н.Н., Осипова Е.А.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ КАСКАДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ МОДУЛЯТОРОМ

Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Россия

Kucyĭ N.N., Osipova E.A.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE CABLE INSULATION THICKNESS CASCADE CONTROL SYSTEM WITH INTEGRAL PULSE-DURATION MODULATOR

Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia

Современный этап развития теории автоматического регулирования характеризуется усложнением законов и принципов регулирования и появлением новых принципов и методов их технического воплощения. Здесь одной из важных задач является определение оптимальной настройки автоматических систем с нелинейными импульсными регуляторами при помощи алгоритмов автоматической параметрической оптимизации (АПО), опирающихся на современную вычислительную технику [1-3].

В настоящей работе решается вышеозначенная задача с привлечением методов теории чувствительности [4] на примере системы каскадного регулирования толщины пластмассовой изоляции кабельных изделий, в которой для регулирования вспомогательной величины выбрана схема с интегральной широтно-импульсной модуляцией (ИШИМ).

В общем случае определение оптимальной настройки каскадных систем регулирования оказывается значительно более сложной задачей, чем определение настройки одноконтурной системы. Даже в простейшем случае – в двухконтурной системе с двумя ПИ-регуляторами, - достаточно надежное решение этой задачи возможно только при использовании микропроцессорной техники наряду с аналитическими методами для предварительного исследования области приближенных настраиваемых параметров [5]. Очевидно, что задача синтеза параметров регуляторов каскадных импульсных систем, особенно тех, которые имеют нелинейный импульсный элемент (ИЭ), в том числе и систем с ИШИМ, представляет собой сложную задачу, включающую разработку методов и методик, пригодных для всего класса систем с ШИМ или его подклассов. Поскольку беспойсковый градиентный метод с использованием анализаторов чувствительности оказался эффективным при разработке алгоритма АПО для многоконтурных систем дискретного регулирования объектов с запаздыванием [6], то теоретически данный метод может помочь в решении сформулированной выше задачи. В пользу применения этого метода говорит и тот факт, что анализаторы чувствительности успешно используются для синтеза самонастраивающихся систем с ШИМ второго рода [3].

Для упрощения в качестве объекта исследования выбрана конкретная автоматическая система регулирования (АСР), в которой регулируемая величина (толщина изоляции кабеля) измеряется с достаточно большим запаздыванием, а на регулируемый объект могут действовать сильные возмущения в виде изменения объемной производительности обрабатываемой электроприводом экструдера. Ясно, что такого рода возмущения оказывают непосредственное влияние на скорость протяжки кабельного изделия по всей длине экструдерной линии, однако вследствие наличия других возмущений поддержание заданной скорости протяжки не всегда обеспечивает заданную толщину изоляции готового кабельного изделия с требуемой точностью. В таком случае целесообразно применять двухкаскадную АСР с регулятором толщины изоляции и регулятором скорости протяжки.

На рис.1 представлена структурная схема АСР толщины пластмассовой изоляции с обратной связью по толщине изоляции [7]. Результат сравнения сигнала требуемой толщины изолирующей оболочки δ_3 с отрицательным зна-

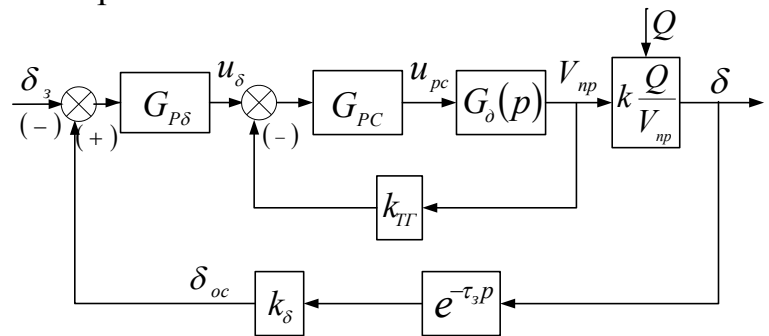


Рис. 1. Структурная схема АСР

ком и сигнала датчика толщины k_δ после выхода кабельного изделия из охлаждающей ванны $e^{-\tau_3 p}$ подается на вход регулятора толщины $G_{P\delta}$.

Объект регулирования нелинейный и на структурной схеме представлен в виде

$$\delta = k \frac{Q}{V_{np}}.$$

При этом именно гиперболическая зависимость между выходной и входной величинами объекта предопределила положительный знак обратной связи. Такая обратная связь обеспечивает работоспособность рассматриваемой АСР, позволяя при увеличении толщины изоляции сформировать команду на увеличение скорости протяжки, а при уменьшении толщины - на уменьшение скорости протяжки.

Для измерения линейной скорости протяжки V_{np} используется тахогенератор, напряжение которого u_{TG} пропорционально V_{np}

$$u_{TG} = k_{TG} V_{np};$$

k_{TG} - коэффициент преобразования линейной скорости протяжки кабельного изделия в напряжение.

В роли исполнительного механизма объекта регулирования выступает электропривод тянущего устройства $G_o(p)$.

Возмущения в виде изменения объемной производительности обрабатываемой электроприводом экструдера Q поступают на объект регулирова-

ния не со стороны исполнительного механизма, что, в свою очередь, не позволяет обеспечить быструю компенсацию такого рода возмущений в самом начале их появления. Однако это не умаляет важности включения регулятора скорости G_{PC} в рассматриваемую схему каскадного регулирования, т. к. он оказывает быстрое стабилизирующее действие, благодаря тому, что запаздывание и инерционность вспомогательной величины (линейная скорость протяжки V_{np}) по отношению к регулируемому воздействию u_δ значительно меньше, чем у основной регулируемой величины δ_{oc} . Кроме того, выбор V_{np} в качестве вспомогательной регулируемой величины в исследуемой системе оказывается с точки зрения практики вполне оправданным, когда есть возможность появления сильных возмущений, идущих со стороны электропривода тянущего устройства [5].

В работе [8] показано, что для двухкаскадной системы стабилизации толщины пластмассовой изоляции с применением принципа обратной связи (рис. 1) и ПИ-регулирования инерционность и время запаздывания, с которыми измеряется толщина изоляции кабеля, не позволяют добиться удовлетворительных для практики показателей стабилизации. Для решения этой проблемы авторы работы предлагают синтезировать комбинированную систему регулирования по полученным условиям полной инвариантности по отношению к действующим возмущениям. Однако такой подход в случае изменения характеристик действующих возмущений потребует внесения серьезных изменений в эту систему регулирования. Подход же, развиваемый в настоящем докладе, основан на следующем. Как известно, задачу регулирования объектов с большим запаздыванием, т.е. при выполнении неравенства $\tau_{об}/T_{об} > 1$, где $\tau_{об}$ - время запаздывания; $T_{об} = \max[T_{об1}, \dots, T_{обn}]$ - инерционность объекта, можно достаточно успешно решить в классе импульсных регуляторов [5]. Исходя из этого, с целью повышения показателей качества стабилизации САР, представленной на рис. 1, предлагается в качестве регулятора G_{PC} использовать интегральный широтно-импульсный модулятор с m настраиваемыми параметрами.

Уравнения для двухкаскадной АСР (рис. 1) могут быть записаны в операторной форме:

$$\begin{aligned} V_{np}(t, \mathbf{q}) &= G_o(p)u_{pc}(t, \mathbf{q}), \\ u_{pc}(t, \mathbf{q}) &= G_{PC}(\varepsilon_1(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_1, t), \\ \varepsilon_1(t, \mathbf{q}) &= u_\delta(t, \mathbf{q}) - k_{TT}V_{np}(t, \mathbf{q}), \\ \delta_{oc}(t, \mathbf{q}) &= k_\delta e^{-\tau_3 p} \frac{kQ}{V_{np}(t, \mathbf{q})}, \\ u_\delta(t, \mathbf{q}) &= (q_{21} + q_{22}p^{-1}) \cdot (\delta_{oc}(t, \mathbf{q}) - \delta_3(t)), \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными условиями установившегося режима экструдерной линии для электропривода тянущего устройства

$$V_{np}(0) = V_{np}^0, \quad Q(0) = Q_0, \quad \delta(0) = \delta_0,$$

где $\mathbf{q} = (q_{11}, \dots, q_{1m}, q_{21}, q_{22})'$ - вектор настраиваемых параметров первого и второго контуров («штрих» здесь и ниже означает транспонирование).

Проведем анализ рассматриваемой системы с двумя вариантами законов изменения во времени объемной производительности экструдера Q , первый из которых $Q = Q_0 + 10 \sin(\omega t)$ - функция в виде постоянной величины с наложенной на нее синусоидальной составляющей, у которой $\omega \in (0.1 \div 0.3) \text{с}^{-1}$; а второй

$$Q = \begin{cases} Q_0 & \text{при } 0 \leq t \leq 40 \text{ с;} \\ Q_0 + 0.2t & \text{при } 40 < t < 80 \text{ с;} \\ Q_0 + 16 & \text{при } t \geq 80 \text{ с,} \end{cases}$$

что позволит сравнить результаты применения ИШИМ-регулятора с результатами работы [8].

Качество работы АСР будем оценивать квадратичной интегральной оценкой

$$I = \int_0^L (\delta_3(t) - \delta_{oc}(t, \mathbf{q}))^2 dt, \quad (2)$$

где L - интервал интегрирования.

Характеристика ИЭ, осуществляющего ИШИМ, может быть представлена

$$u_{pc}(\varepsilon_I(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_I, t) = \begin{cases} \theta_k & \text{при } kT < t \leq kT + t_k, \\ 0 & \text{при } kT + t_k < t \leq (k+1)T, \end{cases}$$

$$\theta_k = \text{sign } \varepsilon_I[kT], \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Здесь T - период цикла работы ИЭ; t_k - времени действия k -ого импульса, для определения которого предлагается в тактовый момент времени измерять ошибку регулирования $\varepsilon_I[kT]$, а затем в зависимости от измеренного значения ошибки выполнять следующее. Если $|\varepsilon_I[kT]| > 0$, то t_k - наименьший положительный на $(0, T)$ корень уравнения

$$S(\varepsilon_I(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_I) = \Phi(t_u),$$

иначе $t_k = 0$ и $u_{pc}(\varepsilon_I(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_I, t) = 0$ при $kT \leq t < (k+1)T$. В случае отсутствия такого корня $t_k = T$.

$S(\varepsilon_I(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_I)$ определяется исходя из

$$S(\varepsilon_I(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_I) = q_{11} \int_{kT}^{kT+t_u} |\varepsilon_I(t, \mathbf{q})| dt + q_{12} \int_{kT}^{kT+t_u} |\varepsilon_I(t, \mathbf{q})|^2 dt + \dots = \int_{kT}^{kT+t_u} \sum_{j_1=1}^m q_{1j_1} |\varepsilon_I(t, \mathbf{q})|^{j_1} dt,$$

где t_u - время, отсчитываемое внутри периода T . Опорный сигнал $\Phi(t_u)$ может быть реализован в виде параболы второй степени: $\Phi(t_u) = t_u^2$.

Для определения оптимальных параметров используется беспоисковый градиентный алгоритм с его известными преимуществами:

$$\mathbf{q}[l+1] = \mathbf{q}[l] - \alpha[l] \text{grad } I(\mathbf{q}[l]).$$

Здесь $l = 1, 2, \dots$ – номер итерации; $\text{grad } I(\mathbf{q}[l])$ обозначает градиент показателя качества (2), определяемый как вектор-столбец

$$\text{grad } I(\mathbf{q}[l]) = \left(\frac{\partial I(\mathbf{q}[l])}{\partial q_{11}}, \frac{\partial I(\mathbf{q}[l])}{\partial q_{12}}, \dots, \frac{\partial I(\mathbf{q}[l])}{\partial q_{1m}}, \frac{\partial I(\mathbf{q}[l])}{\partial q_{21}}, \frac{\partial I(\mathbf{q}[l])}{\partial q_{22}} \right)'; \alpha[l] - \text{коэффициент, определяющий величину шага спуска по направлению с наибыстрейшим убыванием критерия оптимизации.}$$

Оценивая чувствительность интегральной оценки (2) к вариациям настраиваемых параметров, имеем

Оценивая чувствительность интегральной оценки (2) к вариациям настраиваемых параметров, имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial q_{11}} &= -2 \int_0^L (\delta_3(t) - \delta_{oc}(t, \mathbf{q})) \frac{\partial \delta_{oc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{11}} dt, \\ &\dots \\ \frac{\partial I}{\partial q_{1m}} &= -2 \int_0^L (\delta_3(t) - \delta_{oc}(t, \mathbf{q})) \frac{\partial \delta_{oc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1m}} dt, \\ \frac{\partial I}{\partial q_{21}} &= -2 \int_0^L (\delta_3(t) - \delta_{oc}(t, \mathbf{q})) \frac{\partial \delta_{oc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{21}} dt, \\ \frac{\partial I}{\partial q_{22}} &= -2 \int_0^L (\delta_3(t) - \delta_{oc}(t, \mathbf{q})) \frac{\partial \delta_{oc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{22}} dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая, что для рассматриваемого случая двух контуров элементы матрицы функций чувствительности $\Xi(t) = \left\| \xi_{ij_i}(t) \right\|, i = 1, 2; j_1 = \overline{1, m}; j_2 = \overline{1, 2}$, могут быть записаны как

$$\Xi(t) = \left\| \begin{array}{cccc} \frac{\partial V_{np}}{\partial q_{11}} & \dots & \frac{\partial V_{np}}{\partial q_{1m}} & \frac{\partial V_{np}}{\partial q_{21}} & \frac{\partial V_{np}}{\partial q_{22}} \\ \frac{\partial \delta_{oc}}{\partial q_{11}} & \dots & \frac{\partial \delta_{oc}}{\partial q_{1m}} & \frac{\partial \delta_{oc}}{\partial q_{21}} & \frac{\partial \delta_{oc}}{\partial q_{22}} \end{array} \right\|,$$

а координаты $V_{np}(t, \mathbf{q})$ и $\delta_{oc}(t, \mathbf{q})$ связаны между собой, найдем элементы второй строки матрицы

$$\xi_{2j_i}(t) = k_\delta e^{-\tau_3 p} \left(-k \frac{Q(t)}{V_{np}^2(t, \mathbf{q})} \frac{\partial V_{np}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{ij_i}} \right), i = 1, 2; j_1 = \overline{1, m}; j_2 = \overline{1, 2}. \quad (4)$$

Уравнения (4) показывают, что, зная $\xi_{1j_1}(t)$, $j_1 = \overline{1, m}$, $j_2 = 1, 2$, можно достаточно легко вычислить составляющие $grad I(\mathbf{q}[l])$ (3).

Для первого контура, содержащего ИЭ с ИШИМ, применив обобщенное дифференцирование [9], получим уравнения чувствительности

$$\xi_{1j_1}(t) = G_\delta(p) \frac{Du_{pc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}}, j_1 = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где $D/\partial q_{1j_1}$ - оператор обобщенного дифференцирования по настраиваемому параметру q_{1j_1} .

Выражения для $\frac{Du_{pc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} = \left(\frac{Du_{pc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{11}}, \dots, \frac{Du_{pc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1m}} \right)$ представляет

собой вектор с элементами [9]

$$\frac{Du_{pc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} = - \sum_k \Delta u_{pc}^{t_k} \frac{dt_k(\varepsilon_1(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_1)}{dq_{1j_1}} \delta(t - t_k), k = 0, 1, 2, \dots; j_1 = \overline{1, m}, \quad (6)$$

где t_k ($k = 0, 1, 2, \dots$) - k -й момент разрыва регулирующего воздействия; $\Delta u_{pc}^{t_k} = u_{pc}(t_k + 0) - u_{pc}(t_k - 0)$ - скачок регулирующего воздействия в моменты его разрыва t_k ; $\delta(t - t_k)$ - смещенная дельта-функция.

Производные по настраиваемым параметрам q_{1j_1}

$\frac{dt_k}{dq_{1j_1}}$ ($k = 0, 1, 2, \dots; j_1 = \overline{1, m}$) вычисляются исходя из равенства

$$\int_{kT}^{kT+t_k} \sum_{j_1=1}^m q_{1j_1} |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|^{j_1} dt = t_k^2, \quad (7)$$

которое выполняется в моменты $t = kT + t_k(\varepsilon_1(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_1)$, ($k = 0, 1, 2, \dots$), как

$$\begin{aligned} \frac{dt_k}{dq_{1j_1}} = & \int_{kT}^{kT+t_k} \left(|\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|^{j_1} + \left(\sum_{j_1=1}^m j_1 q_{1j_1} |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|^{j_1-1} \right) \left(\frac{\partial |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|}{\partial q_{1j_1}} \right) \right) dt : \\ & : \left(2t_k - \left(\sum_{j_1=1}^m q_{1j_1} |\varepsilon_1(kT + t_k)|^{j_1} \right) \right), \quad (8) \\ & (j_1 = \overline{1, m}). \end{aligned}$$

Проблема вычисления $\frac{\partial |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|}{\partial q_{1j_1}}$ решается следующим образом:

$$\frac{\partial |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|}{\partial q_{1j_1}} = \begin{cases} \frac{\partial \varepsilon_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} & \text{при } \varepsilon_1(t, \mathbf{q}) \geq 0, \\ -\frac{\partial \varepsilon_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} & \text{при } \varepsilon_1(t, \mathbf{q}) < 0, \quad j_1 = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (9)$$

Входящие в (9) производные $\frac{\partial |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|}{\partial q_{1j_1}}, j_1 = \overline{1, m}$, определяются из

третьего уравнения системы (1):

$$\frac{\partial \varepsilon_1(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} = \frac{\partial u_\delta(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} - k_{ТГ} \cdot \xi_{1j_1}, \quad j_1 = \overline{1, m}, \quad (10)$$

подставляя результат дифференцирования пятого уравнения этой же системы

$$\frac{\partial u_\delta(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} = (q_{21} + q_{22}p^{-1}) \cdot \left(\frac{\partial \delta_{oc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{1j_1}} \right) = (q_{21} + q_{22}p^{-1}) \cdot \xi_{2j_1}(t), \quad j_1 = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Выражения (5-11) позволяют для первого контура построить анализаторы чувствительности.

Выражения для анализаторов чувствительности по настраиваемым параметрам регулятора $G_{P\delta}(p)$ могут быть получены из (1)

$$\xi_{1j_2}(t) = \frac{\partial V_{np}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{2j_2}} = G_\delta(p) \frac{Du_{pc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{2j_2}},$$

$$\frac{Du_{pc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{2j_2}} = -\sum_k \Delta u_{pc}^{t_k} \frac{dt_k(\varepsilon_1(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}_1)}{dq_{2j_2}} \delta(t - t_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad j_2 = 1, 2.$$

Дифференцируя по q_{2j_2} равенство (7), осуществим вывод формулы для

вычисления $\frac{dt_k}{dq_{2j_2}} (k = 0, 1, 2, \dots; j_2 = 1, 2)$:

$$\frac{dt_k}{dq_{2j_2}} = \int_{kT}^{kT+t_k} \left(\left(\sum_{j_1=1}^m j_1 q_{j_1} |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|^{j_1-1} \right) \left(\frac{\partial |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|}{\partial q_{2j_2}} \right) \right) dt :$$

$$: \left(2t_k - \left(\sum_{j_1=1}^m q_{j_1} |\varepsilon_1(kT + t_k)|^{j_1} \right) \right).$$

При этом

$$\frac{\partial |\varepsilon_1(t, \mathbf{q})|}{\partial q_{2j_2}} = \begin{cases} \frac{\partial u_\delta(t, \mathbf{q})}{\partial q_{2j_2}} - k_{ТГ} \cdot \xi_{1j_2}(t) & \text{при } \varepsilon_1(t, \mathbf{q}) \geq 0, \\ -\frac{\partial u_\delta(t, \mathbf{q})}{\partial q_{2j_2}} + k_{ТГ} \cdot \xi_{1j_2}(t) & \text{при } \varepsilon_1(t, \mathbf{q}) < 0, \quad j_2 = 1, 2, \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_{\delta}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{21}} &= (q_{21} + q_{22}p^{-1}) \cdot \left(\frac{\partial \delta_{oc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{21}} \right) + (\delta_{oc}(t, \mathbf{q}) - \delta_3(t)) = \\ &= (q_{21} + q_{22}p^{-1}) \cdot \xi_{2j_2}(t) + (\delta_{oc}(t, \mathbf{q}) - \delta_3(t)), j_2 = 1; \\ \frac{\partial u_{\delta}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{22}} &= (q_{21} + q_{22}p^{-1}) \cdot \left(\frac{\partial \delta_{oc}(t, \mathbf{q})}{\partial q_{22}} \right) + p^{-1}(\delta_{oc}(t, \mathbf{q}) - \delta_3(t)) = \\ &= (q_{21} + q_{22}p^{-1}) \cdot \xi_{2j_2}(t) + p^{-1}(\delta_{oc}(t, \mathbf{q}) - \delta_3(t)), j_2 = 2.\end{aligned}$$

Все вышеизложенное позволяет сформировать анализаторы чувствительности, а затем и реализовать алгоритм АПО для таких сложных систем, как системы каскадного регулирования толщины пластмассовой изоляции кабельных изделий.

Список литературы

1. Цветков, С.А. Параметрический синтез систем автоматического управления с импульсной модуляцией сложной формы: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / С.А. Цветков. – СПб., 2009. – 15 с.
2. Никитин, А. В. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / А. В. Никитин, В. Ф. Шишлаков; под ред. В. Ф. Шишлакова. – СПб. : СПбГУАП, 2003. – 358 с.
3. Высотская, О. В. Разработка и исследование алгоритма автоматической параметрической оптимизации для систем с широтно-импульсной модуляцией: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / О. В. Высотская. – Иркутск, 2003. – 17 с.
4. Розенвассер, Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – М. : Наука, 1981. – 464 с.
5. Стефани, Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1972. – 376 с.
6. Широков, Л. А. Автоматическая оптимизация параметров многоконтурных систем с импульсным регулятором / Л. А. Широков, И. К.Н. Петров, Н. Н. Куцый // Труды Всесоюзной школы-семинара по теории чувствительности систем управления и ее применению «Чувствительность систем управления». – Владивосток. – 1976. – Т. I. – С. 279-289.
7. Иванов, Г.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока / Г.М. Иванов, Г.М. Левин, В.М. Хуторецкий. – М. : Энергия, 1978. – 160 с.
8. Хуссейн Хишам Исследование принципов стабилизации толщины пластмассовой изоляции (оболочки) в производстве кабельных изделий : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Хуссейн Хишам. – Иркутск, 2002. – 101 с.
9. Гельфанд, И. М. Обобщенные функции и действия над ними / И. М. Гельфанд, Г. Е. Шилев. – 2-е изд., перераб. – М. : Физматгиз, 1959. – 470 с.