

Выключатель может длительно осуществлять питание нагрузок с током потребления 2500 А при потере в выключателе избыточного давления элегаза и кратковременно при тех же условиях в течение 2,5 с с момента включения нагрузки поддерживать питание нагрузки с током потребления 3150 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г. Применение различных сред для дугогашения и изоляции в электрических коммутационных аппаратах напряжением 6–220 кВ. – Энергоэксперт, 2010, № 3 (20), с. 28–32.
2. Matsui Y., Nagatake K., Takeshita M. et al. Development and Technology of High Voltage VCBs. Brief History and State of Art – XXII Int.Symp.on Disch. and El.Ins. in Vacuum, 2006.
3. Sakaki M., Koga H., Eukuda Y., Kitamura H. Development of 72 kV Cubicle-Type Dry-Air Insulated Switchgear. – Japan AE Power Systems Review, 2010, vol. 3, August.
4. Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г. Создание вакуумной коммутационной аппаратуры на напряжение 72,5–220 кВ; состояние и перспективы. – Электричество, 2011, № 9, с. 28–31.
5. Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г. Метод эквивалентных тепловых источников для расчета нагрева токоведущих систем электрических аппаратов. – Электричество, 2010, № 10, с. 2–10.

[04.06.13]

* * *

Особенности подчиненного регулирования координат в самообучающихся мехатронных электроприводах циклического действия¹

НИКОЛЬСКИЙ А.А.

Самообучающиеся мехатронные электроприводы циклического действия предназначены для точного воспроизведения повторяющихся движений (привод манипуляторов, подачи режущего инструмента станков при обработке серийных деталей и т.п.). Показано, что системы, содержащие внутренний подчиненный контур самообучения по скорости исполнительного органа, требуют коррекции объекта управления не только в высокочастотной, но и в низкочастотной зонах его частотной передаточной функции (ЧПФ). Предложены системы с несколькими подчиненными контурами самообучения. Такие системы преследуют одновременно несколько связанных целей (своя цель в каждом контуре) и самостоятельно изменяют в процессе работы задающие воздействия отдельных контуров самообучения. Условия устойчивости для системы с двумя соподчиненными контурами самообучения определены как зона допустимого расположения годографа ЧПФ объекта управления на комплексной плоскости, образованной

Авторы: **Иванов Александр Николаевич** окончил энергетический факультет МГАУ им. В.П. Горячкина в 2007 г. Ведущий инженер ФГУП ВЭИ.

Морозов Станислав Андреевич окончил Рязанский радиотехнический институт в 1961 г. Инженер первой категории ФГУП ВЭИ.

Парфенов Дмитрий Евгеньевич окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Ведущий инженер-конструктор ФГУП ВЭИ.

Чемерис Владлен Семенович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1953 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию «Коммутационная износостойкость элементов дугогасительных устройств автокомпенсированных элегазовых выключателей» в ВЭИ. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Белкин Герман Сергеевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1962 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электрические аппараты» в ВЭИ. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Self-learning cyclic-duty mechatronic electric drives are intended to precisely reproduce repeating motions (for driving manipulators, for moving the cutting tool of lathes in processing serially produced parts, etc.). It is shown that systems containing an inner subordinate self-learning loop for the actuator motion speed require correction of the controlled plant not only in the high-frequency, but also in the low-frequency zones of its frequency transfer function. Systems containing a few subordinate self-learning loops are proposed. Such systems are intended to pursue several interconnected goals simultaneously (each loop pursues its own goal) and independently adjust the reference inputs of individual self-learning loops in the course of operation. The stability conditions for a system having two co-subordinate self-learning loops are defined as the permissible zone of the controlled plant loci in a complex plane formed by intersection of stable self-learning domains permitted for individual loops. A cyclic system containing two co-subordinate self-learning loops with respect to the tool

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 13-08-00246.

пересечением областей устойчивого самообучения, разрешенных для отдельных контуров. Для мехатронных приводов подачи станков некруглого точения предложена циклическая система с двумя соподчиненными контурами самообучения по координатам перемещения инструмента и формы изделий, исключая ошибки формы, вызванные периодическими погрешностями станка и деформациями заготовки при креплении.

Ключевые слова: самообучающиеся электроприводы, циклические системы управления, подчиненное регулирование, многоканальное самообучение, устойчивость, коррекция

Статья посвящена совершенствованию системы управления самообучающихся приводов точного воспроизведения циклически повторяющихся движений (приводы манипуляторов, подачи режущего инструмента станков при обработке серийных деталей и т.п.).

Впервые такие системы, названные модифицированными системами с памятью, были предложены в России в 1980 г. [1]. В дальнейшем они получили развитие как самообучающиеся (Self-learning) периодические или циклические системы (Repetitive control system) в США, Японии, России [2–6]. В отличие от традиционных следящих и программных систем самообучающиеся системы в процессе работы самостоятельно, итерационным путем, корректируют программу управления для следующего цикла, основываясь на информации о текущих ошибках. В результате в каждом последующем цикле обеспечивается все более точное воспроизведение заданной траектории движения исполнительного органа.

Способность циклической системы к самообучению обеспечивается применением в контуре управления особого линейного динамического звена – периодического интегратора (Р-интегратора, РИ), называемого также блоком запоминания, генератором периодических сигналов [5]. Особенности РИ определяют специфику итерационных процессов самообучения с точки зрения устойчивости, темпа сходимости, точности, возможностей коррекции объекта и пр.

На практике используются РИ трех базовых видов:

РИ₁, представляющий собой звено запаздывания на время цикла T , охваченное единичной положительной обратной связью;

РИ₂, в котором аналогичное звено запаздывания включается в цепь положительной обратной связи;

РИ₃, представляющий собой параллельно соединенные РИ₁ и РИ₂.

displacement coordinates and shape of articles is proposed for the mechatronic drives used to move the cutting tools in nonround turning lathes. The use of this system makes it possible to exclude shape errors stemming from periodic errors of the lathe and deformations occurring in the billet in fixing it.

Key words: self-learning electric drives, cyclic-duty control systems, subordinate control, multichannel self-learning, stability, correction

Соответствующие передаточные функции РИ:

$$\begin{aligned} W_{\text{ри1}}(p) &= e^{-Tp} / (1 - e^{-Tp}); & W_{\text{ри2}}(p) &= 1 / (1 - e^{-Tp}); \\ W_{\text{ри3}}(p) &= (1 + e^{-Tp}) / [2(1 - e^{-Tp})], \end{aligned} \quad (1)$$

где $p = d/dt$ – символ дифференцирования или переменная Лапласа, s^{-1} .

Выполнив в (1) формальную замену p на jw [7], где w – круговая частота, и применив формулу Эйлера $e^{-Tp} = \cos(wT) - j\sin(wT)$, получим выражения частотной передаточной функции (ЧПФ) РИ_{*i*} ($i=1, 2, 3$):

$$W_{\text{ри}i}(jw) = a_i + jb_i(w), \quad (2)$$

где $a_1 = -0,5$; $a_2 = 0,5$; $a_3 = 0$; $b_1 = b_2 = b_3 = -0,5\sin(wT) / [1 - \cos(wT)]$.

Для краткости изложения ниже вместо выражений типа «объект (или звено) с передаточной функцией $W(p)$ » будут использоваться выражения «объект (или звено) $W(p)$ ».

Структурная схема самообучающейся системы с РИ₁ представлена на рис. 1.

На схеме рис. 1 обозначено: $W_{\text{и}}(p)$ – объект управления (например следящий привод подачи станка), замкнутый своими внутренними обратными связями (например по перемещению и скорости его изменения). Ограничимся рассмотрением объектов, для которых $W_{\text{и}}(p) = 1$ при $p = 0$;

$1/W_0(p)$, $W_{\text{ф}}(p)$ – последовательный корректирующий элемент и фильтр, используемые для обеспечения устойчивости процесса самообучения [6];

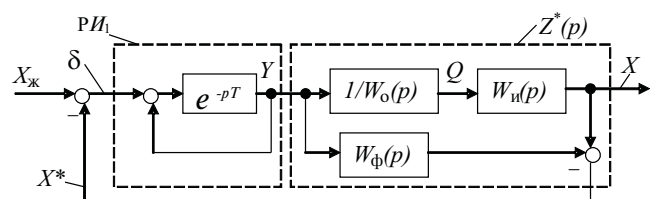


Рис. 1. Структурная схема самообучающейся системы

$Z^*(p)$ – скорректированный объект управления для контура самообучения;

$X_{ж}, X, d$ – приведенные к выходу системы задающее воздействие, регулируемая механическая координата (перемещение, скорость) рабочего органа и ошибка системы;

Y, Q, X^* – сигналы на выходах РИ, последовательного корректирующего устройства и скорректированного объекта управления $Z^*(p)$.

В самообучающейся системе рис. 1 звено e^{-pT} запаздывания на время T цикла описывает формирование сигнала Y на выходе РИ с использованием значений ошибки d не в текущие моменты времени t , а в соответствующие моменты времени предыдущего цикла $t-T$.

Использование корректирующих звеньев $1/W_o(p)$ и $W_{\phi}(p)$ вытекает из необходимости обеспечения устойчивости процесса самообучения в системе с РИ. Устойчивость обеспечивается выполнением ограничений, налагаемых на свойства ЧПФ скорректированного объекта управления:

$$Z^*(j\omega) = c(\omega) + jd(\omega). \tag{3}$$

Согласно критерию Найквиста [7] на границе устойчивости в системе с РИ_{*i*} $W_{риi}(j\omega) = a_i(\omega) + jb_i(\omega)$ и с объектом управления $Z^*(j\omega)$ должны выполняться соотношения:

$$\begin{aligned} a_i(\omega)c_{ri}(\omega) - b_i(\omega)d_{ri}(\omega) &= -1; \\ b_i(\omega)c_{ri}(\omega) + a_i(\omega)d_{ri}(\omega) &= 0, \end{aligned} \tag{4}$$

где $c_{ri}(\omega) = \text{Re}[Z^*(j\omega)]$; $d_{ri}(\omega) = \text{Im}[Z^*(j\omega)]$ отвечают границе устойчивости.

Искомые точки границы устойчивости из (4):

$$\begin{aligned} c_{ri}(\omega) &= -a_i(\omega) / [a_i^2(\omega) + b_i^2(\omega)]; \\ d_{ri}(\omega) &= b_i(\omega) / [a_i^2(\omega) + b_i^2(\omega)]. \end{aligned} \tag{5}$$

Варьируя ω в широких пределах (0∞), получаем на комплексной плоскости кривую $d_{ri}(\omega) = f[c_{ri}(\omega)]$ в виде геометрического места точек $\{c_{ri}(\omega); jd_{ri}(\omega)\}$, расположенных на границе области устойчивого самообучения (ОУС). Для базовых РИ₁, РИ₃ кривые $d_{ri}(\omega) = f[c_{ri}(\omega)]$ имеют вид замкнутых контуров на комплексной плоскости. Для устойчивости самообучения достаточно, чтобы годограф ЧПФ скорректированного объекта управления $Z^*(j\omega) = c(\omega) + jd(\omega)$ целиком вписывался в указанный контур.

На рис. 2 показаны границы ОУС для объектов с РИ₁ (окружность 1), РИ₂ (окружность 2) и РИ₃ (прямая 3) [8]. При этом окружность 1 ограничивает разрешенную область расположения годографа

ЧПФ $Z^*(j\omega) = c(\omega) + jd(\omega)$ скорректированного объекта, окружность 2 ограничивает область, в которую этот годограф не должен заходить, а прямая 3 отделяет разрешенную для расположения годографа ЧПФ правую полуплоскость от запрещенной левой.

Очевидно, устойчивое самообучение в системе с любым РИ и с нескорректированным объектом $W_{и}(p)$, имеющим порядок выше первого, невозможно (см., например, кривую 4 на рис. 2, значительно выходящую за пределы ОУС). Базовый РИ₁ обладает более узкой ОУС, чем РИ₂ и РИ₃, но в отличие от последних позволяет применять для коррекции объекта управления не только сигналы, наблюдаемые в текущий момент времени, но и сигналы, наблюдавшиеся в аналогичный момент времени предыдущего цикла. При этом РИ₁ позволяет при формировании корректирующих сигналов выполнять операции над сигналами, невозможные с РИ₂ и РИ₃ (дифференцирование, опережение во времени), использовать неминимально-фазовые звенья.

Для систем с РИ₁ в [6, 8] описаны методы коррекции динамических свойств с помощью опережающих звеньев, эффективные даже для сложных объектов управления высокого порядка с элементами запаздывания, распределенностью параметров и сегнетогистерезисом. Общий принцип формирования опережающего сигнала заключается в «расщеплении» звена запаздывания e^{-Tp} в РИ₁ на два или несколько последовательно соединенных звеньев $e^{-Tp} = e^{-(T-T_o)p} e^{-T_o p}$. В схеме рис. 1 сигнал Q , опережающий на время T_o сигнал Y на выходе РИ₁, формируется в точке «расщепления» звена запаздывания, что эквивалентно включению показанного на схеме последовательного звена опережения $1/W_o(p) = e^{T_o p}$.

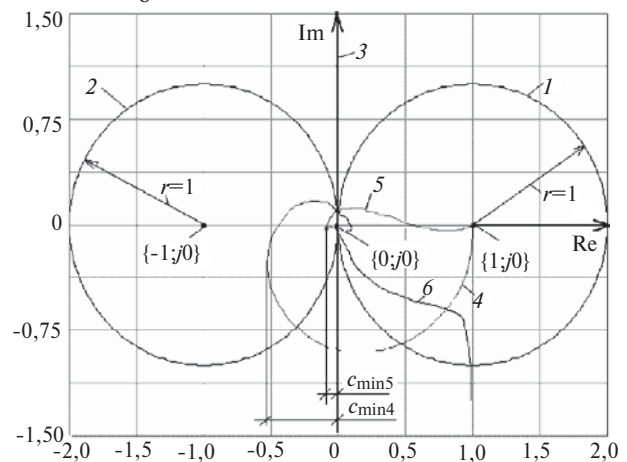


Рис. 2. Границы устойчивого самообучения для базовых РИ различных видов: 1, 2, 3 – границы ОУС для РИ₁, РИ₂, РИ₃; 4 – годограф ЧПФ нескорректированного объекта управления $W_{и}(p)$; 5 – годограф ЧПФ объекта с коррекцией звеном опережения $1/W_o(p) = e^{T_o p}$; 6 – годограф ЧПФ апериодического объекта $Z^{**}(j)$ в системе с РИ в контуре скорости

Опережающее на время T_0 последовательное корректирующее звено $1/W_0(p) = e^{T_0 p}$ осуществляет (см. рис. 2) фазовую коррекцию годографа ЧПФ $W_{и}(j\omega)$ исходного объекта управления (кривая 4), превращая его в годограф ЧПФ $W_{и}(j\omega)/W_0(j\omega)$ скорректированного объекта (кривая 5). При этом все точки исходной кривой 4 поворачиваются на комплексной плоскости против часовой стрелки так, что кривая 4 трансформируется в кривую 5. Корректирующий фильтр $W_{\phi}(p)$ завершает необходимую деформацию кривой 5, смещая в ОУС те точки ее высокочастотной части, которые еще могут остаться вне ОУС после применения опережающей коррекции.

Объект управления $W_{и}(p)$ в рассмотренной выше системе рис. 1 может быть выполнен по-разному. В частности, он может быть следящим приводом, замкнутым по перемещению X рабочего органа и содержащим ряд внутренних подчиненных контуров регулирования, например скорости и тока. В целях самообучения схема рис. 1 содержит дополнительный внешний контур с РИ, замкнутый по координате X .

Циклические системы с подчиненным контуром самообучением. Широкое распространение структур следящих приводов с несколькими вложенными друг в друга контурами регулирования координат, так называемых систем подчиненного регулирования [9], заставляет исследовать особенности циклических систем не только с внешними, но и с внутренними, подчиненными, контурами самообучения.

На рис. 3,а показана альтернативная схеме рис. 1 двухконтурная структура самообучающейся периодической системы с внешним контуром регулирования перемещения X и с подчиненным внутренним контуром самообучения, замкнутым по скорости V рабочего органа. На схеме обозначено: $W_c(p)$ – объект управления внутреннего, подчиненного, контура самообучения, представляющий собой контур скорости V , замкнутый своей внутренней обратной связью по V , для которого $W_c(0)=1$; $W_{ри}(p)$ – РИ, выполняющий роль регулятора скорости во внутреннем, подчиненном, контуре самообучения; $1/p$ и p – звенья, связывающие между собой координаты скорости V и перемещения X , а также периодические сигналы заданного перемещения $X_{ж}$ и заданной скорости перемещения $V_{ж}$ соответственно; $W_{п}(p)$ – регулятор положения во внешнем контуре регулирования; d_X, d_V – ошибки контуров регулирования перемещения и скорости.

Первое отличие рассматриваемой схемы от традиционной структуры подчиненного регулирования заключается в том, что регулятор внешнего контура $W_{п}(p)$ не способен сформировать периоди-

ческое задание $V_{ж}$ на входе внутреннего контура самообучения, необходимое для его нормальной работы. Приходится формировать дополнительный периодический входной сигнал $V_{ж}$ и подавать его на вход внутреннего контура самообучения (штриховые линии на рис. 3,а).

Асимптотическая устойчивость линейной системы рис. 3,а не зависит от наличия периодических возмущений $X_{ж}$ и $V_{ж}$ или их отсутствия. Поэтому для анализа устойчивости самообучения в системе рис. 3,а без потери общности можно положить $X_{ж} = V_{ж} = 0$ и преобразовать ее структуру к виду рис. 3,б с одной единичной отрицательной обратной связью по некоторой синтетической переменной U (в данном случае $U(p) = V(p) + X(p)W_{п}(p)$). Схема рис. 3,б структурно идентична базовой схеме самообучающейся системы на рис. 1. В разомкнутой части преобразованной структуры рис. 3,б находятся последовательно соединенные РИ $W_{ри}(p)$ и скорректированный объект управления для контура самообучения $Z^{**}(p)$, причем

$$Z^{**}(p) = W_c(p)[1 + W_{п}(p)/p]. \quad (6)$$

Из подобия схем рис. 3,б и рис. 1 очевидно, что скорректированный объект $Z^{**}(p)$ должен иметь годограф ЧПФ $Z^{**}(j\omega)$, удовлетворяющий критерию устойчивости (5) и вписывающийся в ОУС, отвечающую виду применяемого РИ. Рассмотрим свойства объекта самообучения (6) в простейшем случае, приняв контур скорости за аperiodическое звено $W_c(p) = 1/(1 + T_m p)$, а регулятор положения пропорциональным $W_{п}(p) = K_{п} = 1/T_{п}$. Примерный вид годографа ЧПФ объекта $Z^{**}(j\omega) = c(\omega) + jd(\omega)$, где $c(\omega) = (T_{п} - T_m) / [T_{п}(1 + T_m^2 \omega^2)]$, $d(\omega) = -(1 + T_{п} T_m \omega^2) / [T_{п} \omega(1 + T_m^2 \omega^2)]$, показан на рис. 2 (кривая б). Там же нанесена ОУС для РИ₁ (кривая л). Видно, что даже при аperiodическом контуре скорости $W_c(p)$ годограф ЧПФ $Z^{**}(j\omega)$ в области низких частот выходит из ОУС.

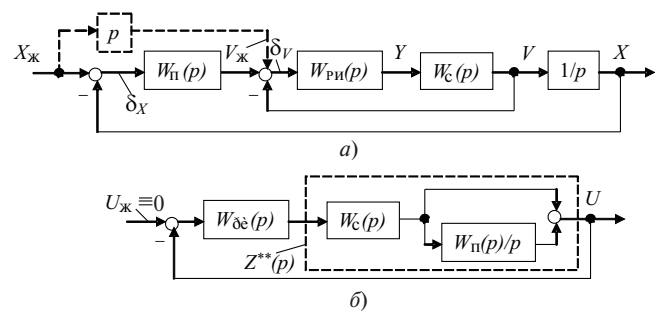


Рис. 3. Периодическая система подчиненного самообучения с внутренним контуром скорости (а) и преобразованная структура с одной обратной связью для анализа устойчивости (б)

Это связано с присутствием интегральной составляющей в передаточной функции объекта (6).

Впрочем в случае апериодического контура скорости самообучение может быть устойчивым при использовании РИ₂ или РИ₃ (см. ОУС, кривые 2 и 3 на рис. 2). Однако, если порядок передаточной функции контура скорости $W_c(p)$ выше первого, то годограф ЧПФ $Z^{**}(j\omega)$ выйдет за пределы ОУС для всех видов РИ, в том числе для РИ₂ и РИ₃. При этом для устойчивого самообучения необходима коррекция объекта (6), по крайней мере, в высокочастотной части годографа его ЧПФ. Выполнить эффективную коррекцию высокочастотной области при использовании РИ₂ или РИ₃ трудно по причинам, изложенным выше. В то же время при использовании РИ₁ легко реализуется как опережающая коррекция высокочастотной части годографа ЧПФ $Z^{**}(j\omega)$, так и коррекция интегральной составляющей в (6), ответственной за вид его низкочастотной части. Последняя реализуется, например, включением между РИ₁ и контуром скорости $W_c(p)$ на рис. 3,а реального дифференцирующего звена

$$W_d(p) = T_d p / (1 + T_d p), \quad (7)$$

которое также можно выполнить на основе описанного выше принципа «расщепления» звена запаздывания в РИ₁.

Таким образом, при учете описанных особенностей система с внутренним подчиненным контуром самообучения по скорости вполне реализуема. Сделанные по методам [8] оценки точности и темпа сходимости процесса самообучения в системе рис. 3,а дают результаты, близкие к показателям базового варианта рис. 1.

Циклические системы с многоканальным самообучением. Замкнутый контур самообучения циклической системы на рис. 1 с особым (термин А.А. Воронова [10]) линейным регулятором $W_{\text{ри1}}(p)$ структурно подобен внешнему контуру управления обычной следящей системы с традиционным регулятором положения и скорректированным объектом $Z^*(p)$. Использование структурных подобий с традиционными следящими системами ранее позволило синтезировать циклические системы с параллельным объединением нескольких каналов, обладающие повышенной точностью самообучения. На основе известного из теории следящих систем принципа двухканальности были предложены циклические системы с параллельным объединением «грубого» и «точного» каналов самообучения, в которых каждый канал выполняется как самообучающийся привод со своими РИ, устройствами коррекции и фильтрации [11].

Новые возможности предоставляет вариант двухканальной системы подчиненного самообучения, в которой каждый из соподчиненных контуров регулирования выполняется как контур самообучения со своим РИ и с устройствами коррекции.

Многоканальное самообучение в отличие от рассмотренного выше одноканального преследует одновременно несколько связанных целей (своя цель в каждом контуре) и самостоятельно изменяет в процессе работы задающие воздействия отдельных каналов самообучения (когда, например, выход РИ внешнего контура участвует в формировании задания для РИ внутреннего контура).

Эффективная система многоканального самообучения, выполненная по принципу подчиненного регулирования, разработана для привода подачи станка финишной обточки автомобильных поршней, имеющих сложную овально-бочкообразную форму.

Погрешности формы поршней определяются не только точностью движений инструмента, но и качеством станка (конусность, кривизна направляющих), а также деформациями от усилий резания и крепления заготовки на станке [12]. Погрешности могут быть устранены в двухканальной мехатронной системе подчиненного самообучения с контурами, замкнутыми по координатам движения инструмента X и формы детали F_0 (рис. 4).

Рассмотрим технологический процесс обточки поршней сложной овально-бочкообразной формы на станке некруглого точения с самообучающимся приводом подачи, который включает:

зажим заготовки на шпинделе, сопровождающийся ее деформацией;

собственно обточку с использованием самообучения, позволяющего исключить систематические ошибки и влияние периодических силовых возмущений f_x , возникающих при прохождении резцом фасок, отверстий и т.п. на траекторию движения X инструмента относительно суппорта;

разжим готового изделия с переносом на него деформационных погрешностей базирования и крепления заготовки;

измерение выбранных продольных и поперечных сечений изделия;

восстановление полного образа полученной при обработке формы F_0 путем интерполяции результатов измерения выборочных сечений;

коррекцию заданной траектории движения инструмента с учетом выявленных измерениями образа формы F_0 , деформационных и станочных погрешностей f_0 .

Форма изделия F_0 выявляется лишь апостериорно, после снятия его со шпинделя и переноса на

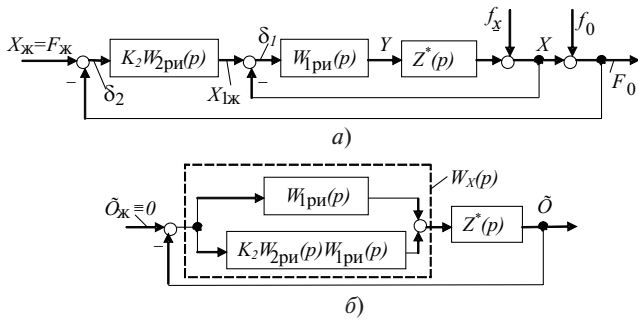


Рис. 4. Периодическая система с двумя соподчиненными контурами самообучения (а) и преобразованная структура с одной обратной связью для анализа устойчивости (б)

прибор контроля формы. В недавнем прошлом при контроле формы для обеспечения истинности измерений необходимо было выполнить длительные по времени ручные или полуавтоматические операции центрирования и совмещения осей. При этом для коррекции формы можно было использовать результаты выборочного контроля лишь каждого двадцатого, а то и сотого изделия. В таких условиях нельзя было организовать контур самообучения по форме изделия. Сейчас разработаны точные методы контроля формы [13], полностью исключающие непроизводительные операции при измерениях и позволяющие в автоматическом режиме на каждом изделии оперативно формировать сигнал обратной связи F_0 .

Однако, даже если образ формы изделия F_0 контролировать оперативно, то для решения задачи точного формообразования недостаточно организовать единственный контур самообучения по F_0 без подчиненного ему контура по X . Дело в том, что интерполяционное восстановление образа F_0 по ограниченному числу контрольных сечений (3–4 сечения) позволяет выявить только достаточно гладкие деформационные погрешности формы f_0 . В то же время непрерывно контролируемая координата X , детально описывая движения режущего инструмента с учетом периодических силовых возмущений f_x (возникающих, например, при прохождении резцом отверстий, лысок) в каждой точке поверхности изделия, не позволяет получить никаких сведений о возникающих при обработке деформационно-станочных погрешностях формы f_0 . Поэтому повысить точность формообразования можно, лишь объединив контуры положения резца и формы изделия в единую двухконтурную систему подчиненного самообучения (рис. 4,а).

На схеме рис. 4,а показаны: объект управления $Z^*(p)$ с ЧПФ вида (3), а также два контура самообучения – внешний, замкнутый по координате образа формы F_0 изделия, и внутренний, подчи-

ненный, контур самообучения, замкнутый по перемещению режущего инструмента X . В качестве регуляторов внутреннего и внешнего контуров выступают РИ $W_{1ри}(p)$ и $W_{2ри}(p)$ соответственно. Координаты образа формы F_0 , ошибки внутреннего d_1 и внешнего d_2 контуров самообучения, а также задающих сигналов $X_{ж}$, $F_{ж}$, $X_{1ж}$ и Y для контуров самообучения и для скорректированного объекта управления $Z^*(p)$ внутреннего контура приведены на рис. 4,а к единой размерности линейных перемещений X . Для исследования устойчивости циклической системы с двумя контурами самообучения приведем схему рис. 4,а к виду с единственной отрицательной обратной связью (см. рис. 4,б), положив без потери общности $X_{ж} = F_{ж} = f_0 = F_x = 0$ (аналогично преобразованиям рис. 3,а и б).

В структуре рис. 4,б регулятор $W_X(p)$ для объекта $Z^*(p)$ представляет собой комбинацию из РИ внутреннего $W_{1ри}(p)$ и внешнего $W_{2ри}(p)$ контуров самообучения:

$$W_X(p) = W_{1ри}(p) + K_2 W_{1ри}(p) W_{2ри}(p), \quad (8)$$

где K_2 — коэффициент адаптации внешнего контура самообучения.

Сначала рассмотрим случай, когда во внешнем и внутреннем контурах используются РИ одинакового вида с ЧПФ $W_{1ри}(j\omega) = W_{2ри}(j\omega) = W_{риi}(j\omega) = a_i(\omega) + jb(\omega)$.

С учетом (2), (3) и (8) запишем ЧПФ разомкнутой части на рис. 4,б:

$$W_p(j\omega) = Z^*(j\omega) W_X(j\omega) = [c(\omega) + jd(\omega)] [l(\omega) + j\pi(\omega)], \quad (9)$$

где $l(\omega) = a_i + K_2(a_i^2 + b^2)$; $\pi(\omega) = b(1 + 2K_2 a_i)$; $a_1 = -0,5$, $a_2 = 0,5$, $a_3 = 0$ для РИ 1, 2 и 3-го видов; $b_1 = b_2 = b_3 = -0,5 \sin(\omega T) / [1 - \cos(\omega T)]$.

При использовании во внутреннем и внешнем контурах самообучения РИ одинакового вида (с одинаковыми значениями a_i) координаты $d_r(\omega) = f[c_r(\omega)]$ границы ОУС для разомкнутого контура (9) с объектом (3) определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} c_r(\omega) l(\omega) - d_r(\omega) \pi(\omega) &= -1; \\ c_r(\omega) \pi(\omega) + d_r(\omega) l(\omega) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Решив (10), получим:

$$\begin{aligned} c_r(\omega) &= -l(\omega) / [l^2(\omega) + \pi^2(\omega)]; \\ d_r(\omega) &= \pi(\omega) / [l^2(\omega) + \pi^2(\omega)], \end{aligned} \quad (11)$$

где $l(\omega)$ и $\pi(\omega)$ взяты из (9).

Показанные на рис. 5 граница (11) ОУС $d_r(\omega) = f[c_r(\omega)]$ для системы с двумя контурами самообучения и одинаковыми РИ первого вида (кри-

вая 2) и граница (5) ОУС1 (кривая 1) для локализованного внутреннего контура, имеют вид замкнутых кривых на комплексной плоскости. Расчет ОУС2 на рис. 5 выполнен для $K_2 = 1/3$. Для устойчивой работы системы с двухканальным самообучением достаточно, чтобы годограф ЧПФ объекта управления $Z(j\omega) = c(w) + jd(w)$ целиком вписывался в обе указанные ОУС (11) и (5). Таким образом, ОУС для системы с двумя соподчиненными контурами самообучения определяется как область пересечения ОУС1 и ОУС2, разрешенных для отдельных контуров самообучения.

Анализируя ОУС2 (11) при двухконтурном самообучении с одинаковыми РИ первого вида в обоих контурах, можно заметить, что коэффициент адаптации внешнего контура K_2 должен выбираться из условия $0 < K_2 < 1$, так как при $K_2 = 0$ ОУС2 сводится к ОУС1 для системы с одноканальным самообучением (кривая 1, рис. 5), а при $K_2 = 1$ ОУС2 вырождается в прямую линию, соединяющую точки $\{0;j0\}$ и $\{4;j0\}$ на комплексной плоскости. Последнему случаю не удовлетворяет ни один реальный объект $Z_1^*(p)$ за исключением пропорционального звена $Z_1^*(p) = K$ ($0 < K < 2$), для которого самообучение не имеет большого смысла.

Выбирая $K_2 < 1$, следует иметь в виду, что с уменьшением коэффициента адаптации будет наблюдаться замедление процессов самообучения по форме деталей во внешнем контуре. С другой стороны, увеличение K_2 приводит к сужению ОУС, что наблюдается прежде всего в области, примыкающей к началу координат комплексной плоскости, где располагаются высокочастотные участки годографа ЧПФ объекта. В этом случае возникает

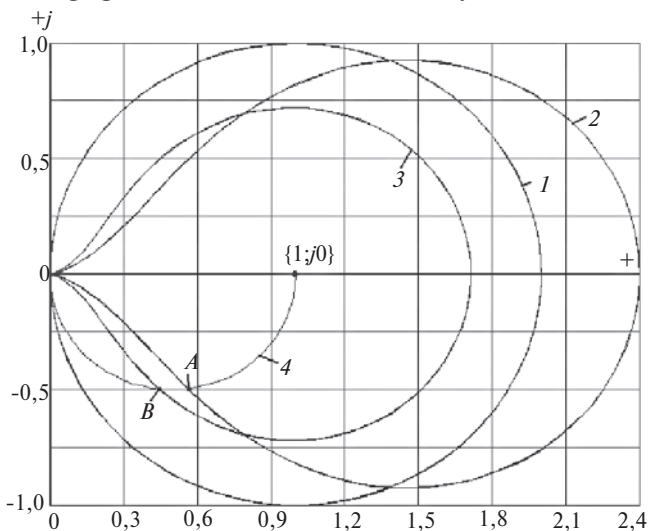


Рис. 5. Области устойчивого самообучения: 1 — одноконтурная система с РИ₁; 2 — двухконтурная система с РИ₁ во внутреннем и внешнем контурах; 3 — двухконтурная система с РИ₁ во внутреннем и РИ₂ во внешнем контурах; 4 — годограф ЧПФ апериодического звена первого порядка

необходимость использования более глубокой его коррекции в области высоких частот с помощью параллельных фильтров $W_\Phi(p)$, что приводит к возрастанию установившейся периодической ошибки самообучения [6, 8].

В более общем случае для внешнего и внутреннего контуров самообучения могут быть использованы РИ разных видов: с a_i во внутреннем контуре самообучения и с a_j во внешнем. Для рассматриваемого привода подачи станка некруглого точения такое решение не только возможно, но и целесообразно. Дело в том, что основные задачи «упреждающей» коррекции объекта управления решаются во внутреннем контуре, для чего необходимо использовать РИ первого вида. Объектом управления РИ внешнего контура самообучения является, как принято рассматривать в системах подчиненного регулирования, пропорциональное звено K_2 , не требующее специальных видов коррекции. Поэтому во внешнем контуре самообучения можно применять РИ всех трех базовых видов и показать, что при этом в общем случае границы ОУС определяются по (11), в которое следует подставлять:

$$l(w) = a_i + K_2 a_i a_j - K_2 b^2(w) \text{ и}$$

$$n(w) = b(w) + K_2 (a_i + a_j) b(w).$$

Кривая 3 на рис. 5 охватывает ОУС2 двухконтурной самообучающейся системы при $K_2 = 1/3$ и при использовании во внутреннем контуре РИ₁, а во внешнем — РИ₂. Сравнивая кривые 2 и 3, можно заметить, что ОУС при двух одинаковых РИ₁, в отличие от ОУС при разных РИ₁ и РИ₂, шире в области расположения низкочастотных участков годографов ЧПФ объектов управления $Z^*(j\omega)$ и уже в области высоких частот. Запас устойчивости, определяемый удаленностью годографа ЧПФ $Z^*(j\omega)$ от границ ОУС, критичен именно в высокочастотной области. Поэтому предпочтение следует отдать системе с РИ₁ во внутреннем и с РИ₂ во внешнем контурах самообучения.

В заключение отметим, что если для одноконтурной системы первый порядок объекта гарантирует устойчивость самообучения, то для двухконтурной это правило не работает. Кривая 4 на рис. 5 отвечает годографу ЧПФ объекта в виде апериодического звена, который вписывается в ОУС1 (окружность 1) и, следовательно, не нуждается в коррекции при одноконтурном самообучении. Однако при двухконтурном самообучении тот же объект необходимо корректировать в высокочастотной области его ЧПФ, поскольку кривая 4 выходит из ОУС2 левее точки А или точки В в зависимости от сочетания видов РИ, применяемых во внутреннем и внешнем контурах.

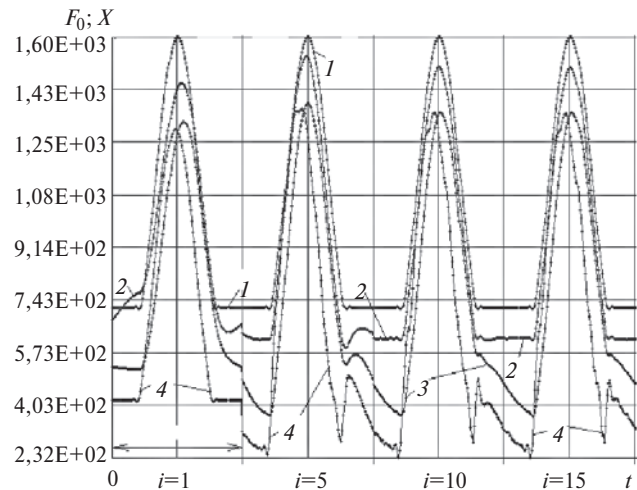


Рис. 6. Процессы в системе с двухконтурным самообучением (i — номер цикла самообучения): 1 — заданная форма изделия $F_{\text{ж}} = X_{\text{ж}}$; 2 — форма изделия F_0 ; 3 — перемещение X исполнительного органа (режущего инструмента); 4 — задающий сигнал $X_{1\text{ж}}$ для внутреннего контура самообучения

На рис. 6 показаны опытные процессы самообучения в двухконтурной системе адаптации по форме F_0 и перемещению X инструмента при использовании в обоих контурах РИ₁.

На рис. 6 — четыре процесса $F_{\text{ж}}(t)$, $F_0(t)$, $X(t)$ и $X_{1\text{ж}}(t)$ (кривые 1—4 соответственно), зафиксированных в одном и том же сечении тепловозного тронка в четырех циклах самообучения с порядковым номером i . За время $t = 0,03$ с шпиндель станка поворачивается на 180° . Для удобства просмотра кривые 1—4 раздвинуты по вертикали на 100 мкм. В данном сечении во внешнем контуре самообучения действует гармоническая деформация изделия f_0 с амплитудой около 100 мкм. При разности радиусов тронка 865 мкм в опыте зафиксирована среднеквадратическая ошибка во внешнем контуре самообучения 1,7 мкм (погрешность формы) и во внутреннем 3,0 мкм (ошибка по X).

Выводы. 1. В циклических мехатронных системах, построенных по принципам подчиненного регулирования и содержащих внутренний, подчиненный, контур самообучения по скорости исполнительного органа, необходима коррекция объекта управления как в высокочастотной, так и в низкочастотной зонах его ЧПФ.

2. Системы с несколькими подчиненными контурами самообучения преследуют одновременно несколько связанных целей и самостоятельно изменяют в процессе работы задающие воздействия отдельных каналов самообучения (когда выход РИ внешнего контура участвует в формировании задания для РИ внутреннего контура).

3. Условия устойчивости для системы с двумя соподчиненными контурами самообучения определены как зона допустимого расположения годографа ЧПФ объекта управления на комплексной плоскости, образованная пересечением областей

устойчивого самообучения, разрешенных для отдельных контуров.

4. В предложенной для мехатронных приводов подачи станков некруглого точения циклической системе с двумя соподчиненными контурами самообучения по координатам перемещения инструмента и формы изделий исключаются ошибки формы, вызванные периодическими погрешностями станка и деформациями заготовки при креплении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закс В.С. Об одной возможности повышения точности регулирования в следящих линейных системах циклического действия. — Автоматика и телемеханика, 1981, № 1, с. 170—174.
2. C.J. Li, C.Y. Li. On-Line Roundness Error Compensation via P-Integrator Learning Control. — Journal of Engineering for Industry, 1992, vol. 114, November, pp. 476—480.
3. Middleton R.H., Goodwin G.C., Longman R.W. A Method for Improving the Dynamic Accuracy of a Robot Performing a Repetitive Task. — Intrn. J. of Robotics Research, 1989, vol. 5, № 5, October, pp. 67—74.
4. Hara S., Yamamoto Y., Omata T., Nakato M. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals. — IEEE Transactions on automatic control, 1988, vol. 33, № 7, pp. 659—668.
5. Еремин Е.Л. Гиперустойчивость циклических систем управления с генератором периодических сигналов. — Информатика и системы управления, 2006, № 1(11), с. 224—234.
6. Никольский А.А. Устойчивость самообучающихся электроприводов подачи металлорежущих станков и точность процессов самообучения. — Электричество, 2007, № 5, с. 38—45.
7. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1989.
8. Никольский А.А. Устойчивость, точность и быстродействие самообучающихся мехатронных приводов циклического действия. — Электричество, 2013, № 9, с. 28—36.
9. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. —Л.: Энергоиздат, 1982.
10. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы. — М: Энергия, 1981.
11. Никольский А.А. Высокоточные многоконтурные самообучающиеся мехатронные системы с пьезокомпенсаторами для станков некруглого точения. — Электричество, 2012, № 8, с. 52—57.
12. Клепиков В.В., Никольский А.А., Спанаки К.Д. Функционально-ориентированная типовая технология изготовления поршней двигателя внутреннего сгорания. — Научные технологии в машиностроении, 2011, № 3(03), с.14—23.
13. Nikolskii A.A., Korolev V.V. Precision method of measurement of the form of cross-section of complex profile on out-of-round gauge without preliminary centering. — Measurement techniques, (New York: Springer), 2011, т.54, № 8.

[16.05.13]

Автор: **Никольский Алексей Анатольевич** окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института (МЭИ) в 1972 г. Докторскую диссертацию, посвященную управлению точными двухканальными следящими электроприводами с пьезокомпенсаторами в точном канале, защитил в 1991 г. Ведущий научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода МЭИ, генеральный директор ООО «Кольбен-Техно».