

# Самообучающиеся мехатронные приводы воспроизведения пространственно повторяющихся движений

НИКОЛЬСКИЙ А.А., КОРОЛЕВ В.В.

Большинство мехатронных самообучающихся электроприводов периодического действия (в роботах, манипуляторах, станках) должны воспроизводить циклические движения рабочего органа, повторяющиеся не во времени, а в функции геометрических координат перемещений. Для адекватного описания самообучающихся систем с параметрическими циклами в отличие от систем, периодических во времени, в рассмотрение вводятся сигналы в функции пространственного аргумента (например, угол поворота шпинделя станка некруглого точения), а также периодические интеграторы, в которых вместо звеньев запаздывания на время цикла используются звенья транспортно запаздывания по пространственным координатам. Решается задача коррекции объекта управления с целью обеспечения инвариантности его динамических свойств к параметрическим возмущениям. При параметрической циклическости динамика мехатронного привода подачи станка некруглого точения описывается дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, зависящими от скорости шпинделя. Девииции скорости шпинделя приводят к возникновению существенных погрешностей формы обрабатываемых некруглых деталей. Предложены методы коррекции, существенно снижающие ошибки систем с параметрической циклическостью.

Ключевые слова: самообучающиеся электроприводы, параметрические циклы, параметрические возмущения, коррекция, точность, станки некруглого точения, поршни ДВС

Одним из сравнительно новых видов адаптивных систем являются самообучающиеся циклические системы управления, предназначенные для точного воспроизведения периодически повторяющихся во времени циклов движений (типичных для роботов, манипуляторов, станков при обработке серийных изделий и других мехатронных систем) [1–4]. Для повышения точности в них применяется репетиционный подход, при котором ошибки на предыдущих циклах работы используются для уточнения управляющих воздействий на последующих циклах. Впервые подобные системы, названные модифицированными системами с памятью, были предложены в России в 1980 г. [1] и в дальнейшем получили развитие как самообучающиеся (Self-learning) периодические или циклические системы (Repetitive control system) не только в нашей стране, но и за рубежом [2–6]. В таких системах, в отличие от традиционных следящих, при определенных условиях периодические ошибки стремятся к нулю [6].

Способность к самообучению обеспечивается применением в контуре управления специфического регулятора – периодического интегратора (Р-интегратора, называемого в разных работах также блоком запоминания или генератором периодических сигналов [1, 5]), в основе которого лежит звено запаздывания на постоянное время цикла  $T$ , охваченное единичной положительной обратной связью. Структура самообучающейся циклической системы с Р-интегратором так называемого «причинного» вида приведена на рис. 1,а. На нем также

показан объект управления с передаточной функцией  $Z(p)$  – скорректированный следящий привод регулирования положения  $X(t)$  исполнительного механизма, предназначенного для отработки циклически изменяющегося во времени задающего сигнала  $X_{ж}(t)$ .

На схеме рис. 1,а обозначено:  $W_{и}(p)$  – передаточная функция исходного объекта управления (например, следящего привода подачи станка), замкнутого своими внутренними обратными связями (например, по перемещению и скорости его изменения); ограничимся рассмотрением объектов, для которых  $W_{и}(p) = 1$  при  $p = 0$ ;  $1/W_0(p)$  – передаточная функция последовательного корректирующего элемента, обеспечивающего устойчивость процесса самообучения [6];  $Z(p)$  – передаточная функция скорректированного объекта управления

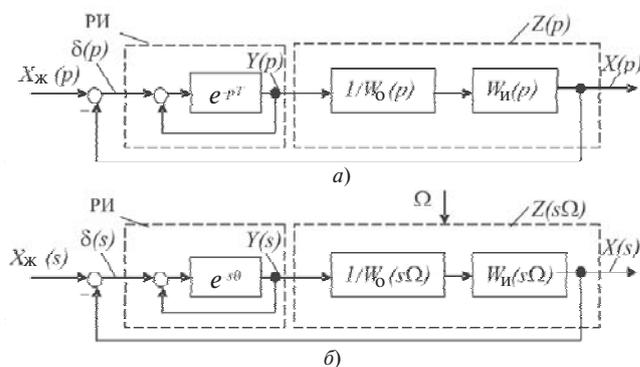


Рис. 1. Структурные схемы самообучающихся циклических систем: а – структура системы с циклическостью во времени; б – система с параметрической циклическостью

для контура самообучения;  $X_{ж.}(p)$ ,  $X(p)$ ,  $d(p)$ ,  $Y(p)$  – изображения по Лапласу задающего воздействия  $X_{ж.}(t)$ , регулируемой механической координаты  $X(t)$  (перемещения) рабочего органа, ошибки  $d(t)$  системы и сигнала  $Y(t)$  на входе объекта управления.

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

Структура связывает между собой изображения  $X_{ж.}(p)$ ,  $X(p)$  оригиналов  $X_{ж.}(t)$ ,  $X(t)$  и других переменных, полученные в соответствии с преобразованием Лапласа для периодических функций, например:

$$X(p) = \int_0^T e^{-pT} X(t) dt, \quad (1)$$

где  $p = j\omega = d/dt$  – комплексная переменная Лапласа или оператор дифференцирования по времени  $t$ ;  $j$  – мнимая единица;  $\omega$  – частота изменения сигнала во времени как аргумент при эквивалентном спектральном способе рассмотрения сигналов, а также частотных передаточных функций  $W(j\omega)$ .

**Самообучающиеся системы с параметрической цикличностью.** Во всех известных публикациях, посвященных самообучающимся системам циклического действия, рассматриваются исключительно системы, циклы работы которых строго повторяются во времени. Известно, однако, что цикличность на общефизическом уровне далеко не всегда увязана с однозначной временной периодичностью. При внимательном рассмотрении видно, что это относится и к большинству мехатронных систем: циклы их движений должны повторяться во все не во времени  $t$ , а именно в функции геометрических координат перемещений.

Так, движения резца при обработке  $X(j)$  и, соответственно, форма изделий некруглого точения (например, овально-бочкообразных поршней двигателей внутреннего сгорания) должны повторяться в функции угла поворота детали или шпинделя станка  $j$ . Движения манипулятора также, как правило, должны быть привязаны к параметрическому пространственному аргументу, а не ко времени. Лишь в частных случаях параметрические циклы сводятся к периодическим во времени при выполнении дополнительных условий эквивалентности. Например, для станка некруглого точения условием эквивалентности является строгое постоянство скорости шпинделя:

$$W = dj/dt = W_0 = \text{const}, \quad (2)$$

где  $W_0$  – постоянная заданная скорость шпинделя.

В реальности продолжительность циклов будет переменной  $T = \text{var}$ , ибо скорость шпинделя  $W$  не постоянна и может изменяться под действием возмущений как по систематическим законам (например, обратная пульсация скорости, заданная тахограмма), так и случайным образом.

Особенности самообучающихся систем при параметрической цикличности ранее не исследовались. Предварительные исследования показывают, что нарушение условий эквивалентности (2) при  $W = dj/dt = \text{var}$  вызывает существенные ошибки в системе, построенной на основе представлений о цикличности во времени [7]. Подход к самообучению на основе представлений о параметрической цикличности позволит объяснить эти явления и предложить методы снижения их влияния на точность мехатронной системы.

**Особенности описания мехатронных систем с параметрической цикличностью.** Для адекватного описания самообучающихся систем с параметрическими циклами в отличие от систем, периодических во времени, в рассмотрение необходимо вводить сигналы в функции пространственного аргумента, например угла поворота шпинделя  $j$  станка некруглого точения  $X_{ж.}(j)$ ,  $X(j)$ ,  $d(j)$ ,  $Y(j)$ , а также Р-интеграторы, в которых вместо звеньев запаздывания на время цикла  $T$  используются звенья транспортного запаздывания по пространственным координатам, например запаздывания на полный угол  $q$  поворота шпинделя станка некруглого точения за один цикл. Структурная схема системы с параметрической цикличностью показана на рис.1,б. Структура связывает между собой изображения  $X_{ж.}(s)$ ,  $X(s)$  оригиналов  $X_{ж.}(j)$ ,  $X(j)$  и других переменных, полученные в соответствии с отличной от (1) формой преобразования Лапласа:

$$X(s) = \int_0^q e^{-sj} X(j) dj, \quad (3)$$

где  $s = d/dj = jn$  – комплексная переменная Лапласа или оператор дифференцирования по пространственному аргументу;  $n$  – круговые частоты изменения сигнала по пространственному аргументу  $j$ .

По своему определению круговая частота есть производная по углу от аргумента тригонометрической функции, представляющей колебание [8]. В рассматриваемом случае

$$n = dj/dj = 1. \quad (4)$$

Частоты с кратностью  $in = i$  могут быть использованы в качестве аргумента при спектральном способе представления сигналов, например

$$X_{ж}(j) = X_{ж0} + \sum_{i=1}^k X_{жи} \sin(jj + j_{0i}), \quad (5)$$

где  $X_{жи}$ ,  $j_{0i}$  – амплитуда и начальная фаза  $i$ -й гармоники сигнала  $X_{ж}(j)$ .

Аналогично могут быть описаны спектры всех сигналов, зависящих от параметра  $j$ . Однако для описания входящих в систему динамических элементов ( $Z$ ,  $W_{и}$ ,  $W_0$ ), свойства которых не зависят от пространственных координат, должны быть использованы традиционные характеристики во временной области (импульсные, переходные функции времени), а также в сопряженных с ней частотной и комплексной областях (передаточные и частотные передаточные функции). Так, объект управления  $Z(p)$  на схемах рис. 1 может быть описан обыкновенными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами:

$$X(t)(a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n) = Y(t)(b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m); \quad n - m \in \mathbb{Z}. \quad (6)$$

Объединение таких элементов в одной структуре самообучающейся циклической системы с задающими сигналами, формирующимися в функции пространственного аргумента, а также с параметрическими Р-интеграторами корректно только при выполнении условий (2) тождества временных и параметрических циклов.

Описание аналогичного по порядку полиномов (6) объекта управления, который может быть включен в структурную схему системы с параметрической циклическостью, будет другим:

$$X(j)(A_0 + A_1 s + A_2 s^2 + \dots + A_n s^n) = Y(j)(B_0 + B_1 s + B_2 s^2 + \dots + B_m s^m); \quad n - m \in \mathbb{Z}. \quad (7)$$

Между дифференциальными операторами  $p$  и  $s$  в (6) и (7), как следует из (1) и (3), существует соотношение

$$p = d/dt = (d/dj)(dj/dt) = sW. \quad (8)$$

С учетом (8) найдем соотношения между коэффициентами дифференциальных уравнений (6) и (7):

$$A_i = a_i W^i; \quad B_k = b_k W^k; \quad i = 0, n; \quad k = 0, m. \quad (9)$$

Согласно (7), (9) объект управления в системе с параметрической циклическостью описывается дифференциальным уравнением (7) с переменными коэффициентами, зависящими от скорости шпинделя  $W$ .

Выполнив в (7) формальное преобразование (3) переменных  $X(j)$  и  $Y(j)$ , можно получить характеристику объекта, напоминающую его передаточную функцию в полиномиальной форме с переменными коэффициентами, зависящими от скорости:

$$Z(s) = X(s)/Y(s) = (B_0 + B_1 s + B_2 s^2 + \dots + B_m s^m) / (A_0 + A_1 s + A_2 s^2 + \dots + A_n s^n). \quad (10)$$

В общем случае передаточные функции систем с переменными параметрами выражаются не простым отношением многочленов, а более сложным [9]. Простое выражение передаточной функции (10) справедливо для рассматриваемых систем только в случае постоянства коэффициентов  $A_i$  и  $B_i$  на периоде циклическости от 0 до  $\varphi$ . Постоянство этих коэффициентов отвечает постоянству скорости шпинделя  $W = dj/dt = \text{const}$ , хотя она и может отличаться от постоянной заданной скорости  $W_0$ . Скорость шпинделя  $W(t)$  может быть представлена суммой постоянной заданной скорости  $W_0$  и ее девиации  $D_W(t)$ :

$$W(t) = W_0 + D_W(t). \quad (11)$$

К точности поддержания скорости шпинделя токарных станков, как правило, не предъявляется повышенных требований. Согласно ГОСТ для токарных станков с ЧПУ допускаются девиации скорости шпинделя  $|D_W| < (0,1, 0,15)W_0$  [10].

Выражение (10) точно описывает объект управления при  $D_W(t) = \text{const} \neq 0$  на периоде  $T$ . Если изменение скорости выполняется медленно, то (10) описывает объект управления с хорошим приближением. Наконец, если девиация скорости  $|D_W(t)|$  существенно меньше заданного значения  $W_0$ , то для расчета коэффициентов вместо (9) можно применять упрощенные формулы:

$$A_i = a_i [W_0^i + i W_0^{i-1} D_W(t)]; \quad B_k = b_k [W_0^k + k W_0^{k-1} D_W(t)]; \quad i = 0, n; \quad k = 0, m. \quad (12)$$

Описанный подход позволяет исследовать поведение регулируемых переменных в их естественном виде – как функций геометрических параметров.

**Задача коррекции объекта управления в системе с параметрической циклическостью.** Отметим, что описание объекта дифференциальными уравнениями вида (7) с переменными коэффициентами (9), (12) является исчерпывающе полным в отличие от описания с использованием передаточных функций вида (10), допустимого лишь в частных случаях.

Описание (7) наглядно показывает, что действие параметрических возмущений в структуре рис. 1,б направлено на изменение свойств эквивалентного объекта управления в функции скорости шпинделя  $W$ . Оно же подсказывает способы обеспечения инвариантности свойств объекта управления по отношению к действующему параметрическому возмущению.

Для обоснованного включения объекта управления в структуру системы с параметрической цикличностью рис. 1,б желательно так скорректировать его динамические свойства, чтобы обеспечить независимость передаточной функции объекта от скорости  $W$  и таким образом исключить переменные коэффициенты в выражении его передаточной функции  $Z(s)$ , например в (10). Очевидным способом придания объекту желаемых свойств является использование двух последовательно включенных корректирующих элементов, выполняющих в идеальном случае две связанные задачи:

первый корректирующий элемент описывается передаточной функцией с постоянными во времени параметрами и выполняет компенсацию свойств объекта  $Z(p) = W_{и}(p) / W_0(p)$  во временной области

$$W_{к1}(p) = 1 / Z(p) = W_0(p) / W_{и}(p); \quad (13)$$

второй элемент придает скорректированному объекту желаемые свойства в форме, не зависящей от возмущения по скорости шпинделя. Он вводит в систему замещающий объект управления, который описывается передаточной функцией с постоянными коэффициентами в параметрической области

$$W_{к2}(s) = Z(s). \quad (14)$$

Идеальный случай (13), (14) требует оценки его реализуемости и проведения анализа возможных способов выполнения применительно к самообучающимся мехатронным приводам.

По поводу реализуемости (13) следует вспомнить, что согласно критерию устойчивости самообучения [6] годограф частотной передаточной функции  $Z(j\omega)$  скорректированного объекта управления должен целиком находиться в правой части комплексной плоскости. Именно это требование накладывает ограничение на разность порядков полиномов  $n - m \leq 1$  в (6), (7) и (10). Иначе говоря, эквивалентный порядок скорректированного объекта управления  $Z(p)$  не превышает единицы, что исключает необходимость при построении корректирующего звена (13) использовать дифференцирование высокого по-

рядка и свидетельствует в пользу его реализуемости.

Что касается (14), то это звено априори реализуемо по соображениям порядка уравнений (7). Следует, однако, учесть, что для его практического исполнения нет других средств, кроме динамических звеньев, работающих во временной и сопряженной с ней частотной областях. Иначе говоря, в целях придания объекту управления инвариантности к параметрическому возмущению для построения корректирующего звена (14) придется использовать модель желаемого объекта управления  $Z(s) = Z(p / W)$  с параметрами, изменяющимися в функции скорости шпинделя  $W$ . Отметим, что при реализации звена (14) можно не воспроизводить в полной мере сложный замещающий объект, например (10), а ограничиться построением более простого – в виде, например, звена первого порядка или даже безынерционного звена  $Z(s) = 1$ .

Возможность реализации описанной коррекции иллюстрирует рис. 2, на котором показан пример с простейшим объектом управления в виде апериодического звена первого порядка  $Z(p) = 1 / (1 + T_0 p)$ .

Апериодический объект управления с постоянными параметрами смоделирован в аналоговом виде на операционном усилителе  $D_3$ :

$$Z(p) = 1 / (1 + T_0 p) = (R_0 / R_1) / (1 + p R_0 C_0);$$

$$R_0 / R_1 = 1; \quad R_0 C_0 = T_0. \quad (15)$$

Оба корректирующих звена (13) и (14) реализованы на операционных усилителях  $D_1$  и  $D_2$ :

$$W_{к1}(p) W_{к2}(p / W) = [R_0' / R_1' W] [R_0(W) / R_1' (1 + p R_0' C_0' / C_0) / [1 + p R_0(W) C_0]], \quad (16)$$

где  $C_0' = C_0 = C_0$ ;  $R_0' = R_0 = R_0$ ;  $R_1' W = R_0(W) = R_0 W_0 / W$ .

При таком выборе параметров в (16) реализуется скорректированный объект управления с «угловой» постоянной  $\tau_0 = R_0 C_0 W_0$ :

$$Z(s) = Z(p / W) = 1 / (1 + p R_0 C_0 W_0 / W) =$$

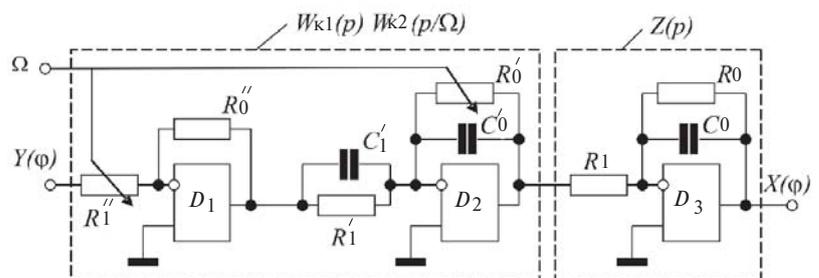


Рис. 2. Пример синтеза объекта управления, инвариантного к параметрическому возмущению  $W$

$$= 1 / (1 + sR_0C_0W_0) = 1 / (1 + sq_0), \quad (17)$$

инвариантный по отношению к девиациям скорости шпинделя  $D_W(t)$ .

Здесь рассмотрен пример точной компенсации свойств объекта, изменяющихся в функции параметрических возмущений. На рис. 3 приведены переходные характеристики исходного апериодического объекта управления  $h_0(t)$  и  $h_0(j, W)$ , а также скорректированного по (13), (14) апериодического объекта  $h_{кор}(j, W)$  при разных постоянных значениях скорости шпинделя  $W_1 < W_0 < W_2$ . Из графиков на рисунке видно, что вид реакции на единичный скачок  $Y(j)$  определяется скоростью шпинделя в системе с исходным объектом (кривые  $h_0(j)$ ) и не зависит от скорости (кривые  $h_{кор}(j)$ ) в случае применения коррекции (13), (14). С помощью коррекции исключается влияние на динамические свойства скорректированного объекта управления параметрических возмущений как медленных, так и быстрых.

Однако в реальности точная компенсация звеном (13) свойств объекта  $Z(p)$  невозможна, если учесть, что свойства исходного объекта  $W_{и}(jW)$  известны лишь приближенно и подвержены некоторой нестабильности во времени, особенно на высоких частотах  $W$ .

**Способы приближенной коррекции, снижающие зависимость скорректированного объекта от параметрических возмущений.** Сама возможность приближенного выполнения коррекции (13) не вызывает сомнения, так как нужный диапазон частот всегда может быть ограничен дополнительными фильтрами, а к сложному или недостаточно точно идентифицированному исходному объекту  $W_{и}(jW)$  могут быть применены упрощенные, в том числе достаточно грубые аппроксимации.

На рис. 4 приведена опытная (кривая 1) переходная характеристика  $h_1(t)$  быстродействующего

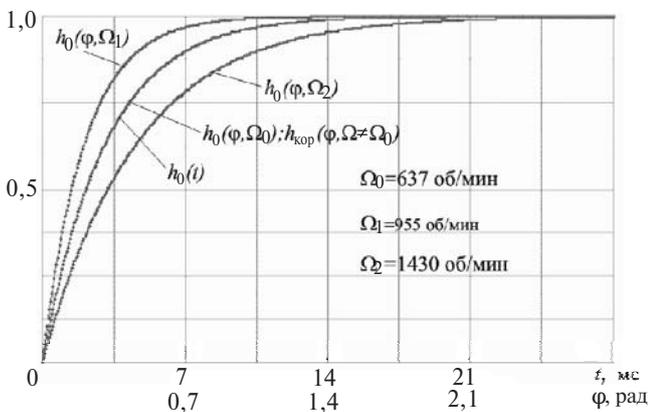


Рис. 3. Переходные характеристики исходного  $h_0$  и скорректированного  $h_{кор}$  по (13), (14) объектов управления

электродинамического привода поперечной подачи резца станка некруглого точения, отвечающая сложной, аналитически не определенной передаточной функции  $W_{и1}(p)$ . Там же (кривые 2 и 3) показаны грубые аппроксимации свойств реального объекта апериодическим звеном с постоянной времени  $T_0 = 2$  мс (кривая 2) или звеном запаздывания на время  $T_0 = 2$  мс (кривая 3). Соответствующие передаточные функции моделей, аппроксимирующих реальный объект:

$$W_{и}(p) = 1 / (1 + pT_0) \quad (18)$$

или

$$W_{и}(p) = e^{-pT_0}. \quad (19)$$

Наибольший интерес применительно к самообучающимся электроприводам подачи станков некруглого точения представляет вариант аппроксимации объекта звеном запаздывания (19). Дело в том, что на основе такой же аппроксимации в [6] предложен основной способ последовательной коррекции объекта, обеспечивающий устойчивое самообучение. С этой целью в систему вводится последовательное корректирующее звено опережения во времени

$$1 / W_0(p) = e^{pT_0} = e^{sT_0W} = e^{sqx(W)}, \quad (20)$$

компенсирующее запаздывание  $e^{-pT_0}$  на время  $T_0$ , присутствующее в аппроксимирующей модели (19). Запаздывание на постоянное время  $T_0$  в системе с параметрической циклической эквивалентно транспортному запаздыванию на переменный угол  $q_x(W) = T_0W$ , зависящий от скорости шпинделя. При наличии Р-интегратора опережение на угол  $q_x(W)$  можно реализовать идеально с использованием своеобразной «машины времени», встроенной в Р-интегратор самообучающейся системы. Дело в том, что сигнал на входе звена транспортного запаздывания  $e^{-sq}$  Р-интегратора (рис. 1, б) опережает сигнал на выходе последнего на угол

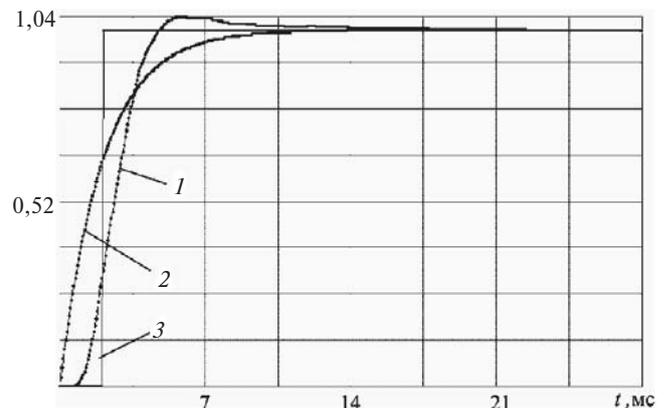


Рис. 4. Опытная переходная характеристика объекта управления (кривая 1) и варианты ее аппроксимации (кривые 2 и 3)

цикла  $q > q_x$ . Это позволяет выполнить первую часть коррекции  $W_{к1}(p)$  (13), используя прием расщепления звена транспортного запаздывания в соответствии со схемой на рис. 5. При выполнении второй части коррекции (14) можно положить  $Z(s)=1$ .

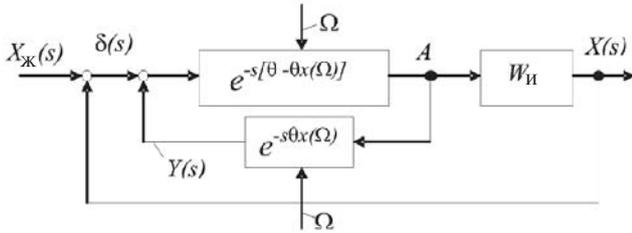


Рис. 5. Реализация в самообучающейся системе объекта управления с пониженной чувствительностью к девиации скорости шпинделя  $W(t)$

Как видно из рис. 5, сигнал  $A$  на входе исходного объекта управления  $W_и$  опережает сигнал  $Y$  на выходе Р-интегратора на постоянное время  $T_0$  или на переменный угол  $q_x(W) = T_0 W$ , зависящий от скорости  $W$ . Тем самым реализуется желаемая опережающая коррекция (20). При этом расщепленный параметрический Р-интегратор включает два звена транспортного запаздывания, каждое из которых зависит от изменений скорости шпинделя. В то же время Р-интегратор «в целом» описывается передаточной функцией  $W_{пи}(s)$  в своей обычной форме, не зависящей от изменений скорости:

$$W_{пи}(s) = Y(s) / d(s) = e^{-s[q - q_x(W)]} e^{-sq_x(W)} /$$

$$\{1 - e^{-s[q - q_x(W)]} e^{-sq_x(W)}\} = e^{-sq} / (1 - e^{-sq}). \quad (21)$$

Описанная коррекция снижает зависимость скорректированного объекта от параметрических возмущений по скорости шпинделя. Понятно, что она не может обеспечить полную инвариантность, поскольку использует грубую аппроксимацию (19) исходного объекта. Тем не менее оказывается весьма эффективной, что подтверждают эксперименты, проведенные для электродинамического привода с переходной функцией, отвечающей кривой 1 на рис. 4.

На рис. 6 показаны кривые ошибок  $d(j)$ , возникающих в самообучающейся системе при воспроизведении желаемого гармонического профиля  $X_ж(j)$  с амплитудой 225 мкм. Кривые 1, 3, 5 получены для привода, в котором корректирующее звено  $1/W_0(p)$  выполнено как звено транспортного опережения на постоянный угол  $q_x(W_0)$ . Кривые 2, 4, 6 получены при использовании описанной выше коррекции (20) со звеном транспортного опережения на переменный угол опережения, зависящий от скорости шпинделя  $q_x[W_0 + D_W(t)]$ . Эксперименты выполнены при обработке овального изделия на заданной скорости шпинделя  $n=1000$  об/мин ( $W_0 = 105 \text{ с}^{-1}$ ) при ее 10%-й девиации  $D_W(t)$ , изменяющейся во времени по гармоническому закону с разными частотами  $w_d$ :  $D_W(t) = 10,5 \sin(w_d t)$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

Как видно из рис. 6, коррекция (13), (14) на основе аппроксимации (19) весьма эффективна при

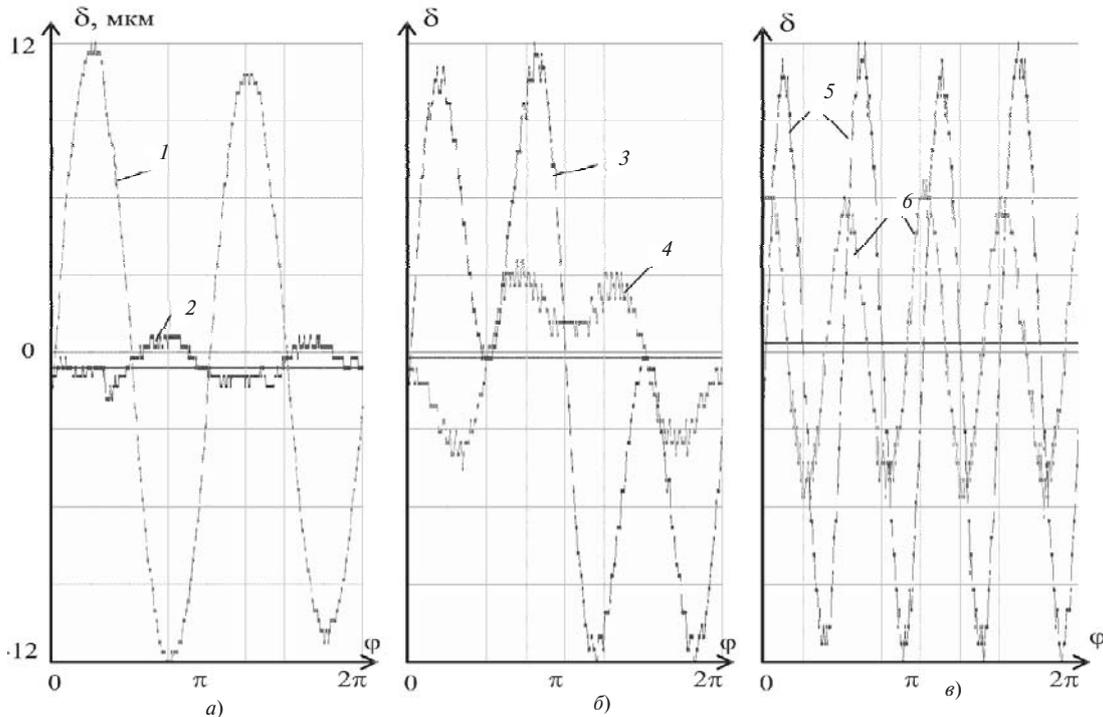


Рис. 6. Эффект снижения ошибок, вызванных гармонической девиацией скорости шпинделя при коррекции (13), (14) и аппроксимации (19) для частот девиации  $w_d$ : а –  $10,7 \text{ с}^{-1}$ ; б –  $106 \text{ с}^{-1}$ ; в –  $213 \text{ с}^{-1}$ ; кривые 1, 3, 5 – без коррекции, 2, 4, 6 – с коррекцией

низкочастотной девиации скорости шпинделя. С ростом частоты эффект снижается, но остается значительным даже на частотах девиации, превышающих частоту вращения шпинделя. Еще лучшие результаты по снижению влияния параметрических возмущений на точность системы можно получить, используя более точные по сравнению с (18), (19) способы аппроксимации объекта управления, например звеном второго порядка.

## 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. — Intern. J. of Robotics Research, 1989, vol.5, No 5, Okt., 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, No 7, pp. 659–668.

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 3, pp. 27–34.*

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. **Никольский А.А.** Влияние девиации скорости шпинделя на точность станков некруглого точения. — Электротехника, 2015, № 1, с. 28–36.

8. **Харкевич А.А.** Спектры и анализ. — М.: Наука, 1962, 236 с.

9. **Попов Е.П.** Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. — М: Наука, 1989, 304 с.

10. **Лебедев А.М., Орлова Р.Т., Пальцев А.В.** Следящие электроприводы станков с ЧПУ. — М.: Энергоатомиздат, 1988, 223 с.

[11.12.14]

*Авторы: Никольский Алексей Анатольевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1972 г. Защитил докторскую диссертацию в 1991 г. Ведущий научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода МЭИ, генеральный директор ООО «Кольбен-Техно».*

*Королев Владимир Викторович окончил МЭИ в 1970 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1985 г. Старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода МЭИ.*

## Self-Learning Mechatronic Drives for Replicating Spatially Repeating Motions

A.A. NIKOL'SKII and V.V. KOROLEV

*The majority of self-learning periodically acting mechatronic drives used in robots, manipulators, and lathes are intended to replicate cyclic motions of the working member repeating as a function of displacement geometrical coordinates rather than a function of time. Unlike systems operating periodically with time, for adequately describing self-learning systems with parametric cycles, signals varying as a function of spatial argument are introduced in consideration (e.g., the spindle rotation angle in a noncircular turning lathe), as well as periodic integrators, in which transport delay sections with respect to spatial coordinates are used for the cycle time instead of time delay sections. The problem of correcting a controlled plant with a view to achieve invariance of its dynamic properties with respect to parametric disturbances is solved. In case of a parametrically cyclic process, the dynamics of a mechatronic drive serving to feed the billet in a noncircular turning lathe is described by differential equations with variable coefficients depending on the spindle rotation speed. Deviations of spindle rotation speed entail the occurrence of essential inaccuracies in the shape of processed noncircular articles. Correction methods are proposed the use of which allows essentially smaller errors in operation of systems with parametric cyclicity to be achieved.*

*Key words: self-learning electric drives, parametric cycles, parametric disturbances, correction, accuracy, noncircular turning lathes, pistons of internal combustion engines*

## REFERENCES

1. **Zaks V.S.** *Avtomatika i telemekhanika (Automation and telemechanics)*, 1981, No. 1, pp. 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. — Intern. J. of Robotics Research, 1989, vol.5, No 5, Okt., 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, No 7, pp. 659–668.

5. **Eremin E.L.** *Informatika i sistemy upravleniya (Information and control systems)*, 2006, No. 1(11), pp. 224–234.

6. **Nikol'skii A.A.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2007, No. 5, pp. 38–45.

7. **Nikol'skii A.A.** *Elektrotehnika (Electrical Engineering)*, 2005, No. 1, pp. 28–36.

8. **Kharkevich A.A.** *Spektry i analiz* (Spectrums and analysis). Moscow, Publ. Nauka, 1962, 236 p.

9. **Попов Е.Р.** *Teoriya lineinykh system avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* (Theory of linear systems of automatic regulation and control). Moscow, Publ. Nauka, 1962, 304 p.

10. **Lebedev A.M., Orlova R.T., Pal'tsev A.V.** *Sledyashchiye elektroprivody stankov s ChPU* (Servodrives of the computer-controlled machines). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 223 p.

*Authors: Nikol'skii Aleksei Anatol'yevich* (Moscow, Russia) – Doctor Techn. Sci., Leading Scientific Researcher at the Moscow Power Engineering Institute (MPEI), General Director of the LLC «Kol'ben-Tekhno».

*Korolev Vladimir Viktorovich* (Moscow, Russia) – Cand. Techn. Sci., Senior Scientific Researcher, MPEI.

\* \* \*

## ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: [etr1880@mail.ru](mailto:etr1880@mail.ru);

[l.s.kudinova@rambler.ru](mailto:l.s.kudinova@rambler.ru)

### *Зарубежная подписка*

на журнал «Электричество»

оформляется через фирмы-партнеры ЗАО «МК-Периодика» или непосредственно

в ЗАО «МК-Периодика» по адресу:

Россия, 111524 Москва, Электродная ул., 10, стр. 3

ЗАО «МК-Периодика»;

тел. (495) 672-70-12; факс (495) 306-37-57

E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)

Internet: <http://www.periodicals.ru>

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC «МК-Periodica» in your country or to JSC «МК-Periodica» directly.

Address: Russia, 111524 Moscow; 10, str.3, Elektrodная ul.

JSC «МК-Periodica»

Tel.: (495) 672-70-12; fax (495) 306-37-57

E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)

Internet: <http://www.periodicals.org>