

# Высокоточные многоконтурные самообучающиеся мехатронные системы с пьезокомпенсаторами для станков некруглого точения

НИКОЛЬСКИЙ А.А.

*Разработаны итерационные структуры двухканальных электроприводов с механическим суммированием движений двух или нескольких самообучающихся приводов, предназначенных для воспроизведения точных повторяющихся движений. Применение новых разработок в приводах станков некруглого точения позволит, в сравнении с одноканальными самообучающимися приводами подачи, в несколько раз повысить точность и производительность обработки изделий машиностроения со сложными профилями поперечных сечений.*

**Ключевые слова:** электропривод, многоканальные самообучающиеся системы, металлорежущие станки, некруглое точение

Рассмотрены вопросы совершенствования мехатронных систем, предназначенных для точного воспроизведения циклически повторяющихся движений по заданной программе. Такие циклы воспроизводятся роботами, манипуляторами и, в частности, приводами подач станков некруглого точения при обработке партий одинаковых деталей, например, при бескопирной обточке поршней с овально-бочкообразной формой поверхности, валов с лысками и фасками, кулачков и т.п.

Ошибки формообразования при токарной обработке содержат как систематическую составляющую, повторяющуюся от детали к детали, так и случайную, вызываемую вибрационными смещениями шпиндельного узла и режущего инструмента относительно друг друга, случайными изменениями скорости шпинделя, неоднородностями обрабатываемого материала.

Наиболее эффективным средством уменьшения систематических ошибок является использование привода подачи с самообучением, при котором ошибки формы, наблюдаемые при обработке предыдущей детали, учитываются при формировании программы управления движением резца для обработки последующих деталей [1]. При использовании электродинамического привода управления резцом (обладающего в следящем режиме полосой пропускания не более 60 Гц) самообучение позволило более чем на порядок (до 500–700 Гц) расширить частотный диапазон точного воспроизведения повторяющейся от детали к детали траектории движения режущего инструмента. На этой основе

*Iterative structures of two-channel drives with mechanical summation of the motions of two or more self-educating drives intended for reproducing precise repeating motions are developed. The use of new developments in the drives of nonround turning lathes will make it possible to achieve much better accuracy and much higher processing speed of machinery construction articles with intricate profiles of their cross sections as compared with single-channel self-educating feed drives.*

**Key words:** electric drive, multichannel self-educating systems, metal cutting machines, nonround turning

были реализованы самообучающиеся электроприводы подачи и массово внедрены специализированные токарные станки для обработки автотракторных поршней [2].

Для уменьшения случайных составляющих ошибки формы в [3] разработаны способы управления, обеспечивающие линеаризацию сегнетогистерезиса быстродействующих пьезодвигателей, предназначенных для компенсации указанных случайных ошибок формообразования при точении в широком диапазоне рабочих частот от нулевой до резонансной. На рис. 1 представлены кинематические схемы двухканальных самообучающихся приводов с параллельным (рис. 1,а) и последовательным (рис. 1,б) суммированием движений электродинамического двигателя ЭД и пьезокомпенсатора ПК для управления режущим инструментом Р. Применение устройств компенсации приводит к (2–3)-кратному снижению отклонений формы обрабатываемого изделия от заданной и к улучшению качества поверхности по параметру шероховатости на 1–1,5 класса [3].

Оказалось, однако, что использование дополнительного канала пьезокомпенсации эффективно не только для снижения случайных ошибок, но и для уменьшения неустранимых самообучением систематических (повторяющихся от цикла к циклу) ошибок, вызванных необходимостью введения в структуру адаптивной системы специальных фильтров  $W_{\Phi}(p)$ , обеспечивающих устойчивость процессов самообучения.

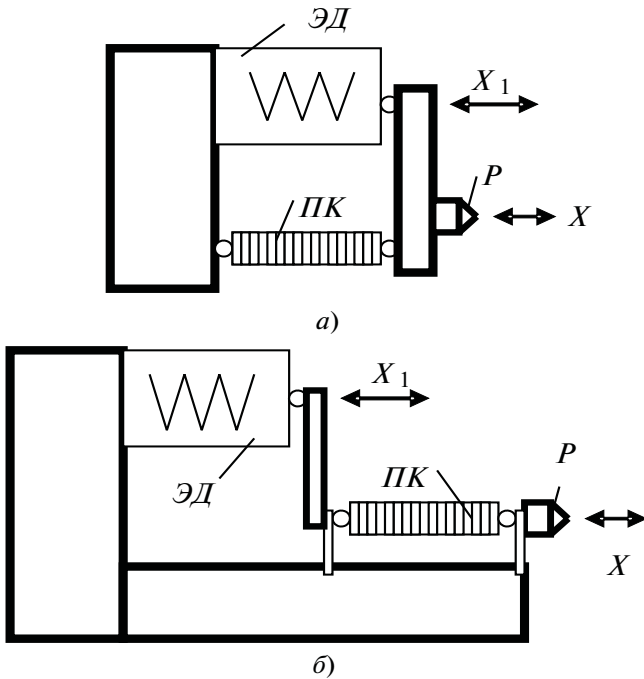


Рис. 1. Параллельная (а) и последовательная (б) схемы сложения движений в двухканальных приводах

На рис. 2 приведена структурная схема одноканальной самообучающейся системы, где  $X_{ж}$ ,  $X$  – задающее воздействие, описывающее желаемую форму изделия, и перемещение рабочего органа (резца);  $\delta$  – ошибка формообразования;  $p = d/dt = j\omega$  – оператор Лапласа,  $c^{-1}$ ;  $\omega$  – круговая частота,  $c^{-1}$ ;  $W_{и}(p)$  – объект регулирования контура самообучения, которым является следящий электродинамический привод, замкнутый своими внутренними обратными связями по перемещению  $\Delta_1$  и скорости его изменения;  $1/W_o(p)$ ,  $W_{ф}(p)$  – последовательный и параллельный корректирующие элементы, необходимые для обеспечения устойчивости процесса самообучения [1];  $Y$ ,  $Q$  – сигналы на выходе  $P$ -интегратора и на выходе последовательного корректирующего устройства.

Для упрощения все сигналы схемы рис. 2 и далее по тексту статьи условно рассматриваются в единой размерности линейного перемещения резца  $X$ . Движения разных исполнительных двигателей приводятся к перемещению  $X$  с единичным коэффициентом, хотя реальные коэффициенты реду-

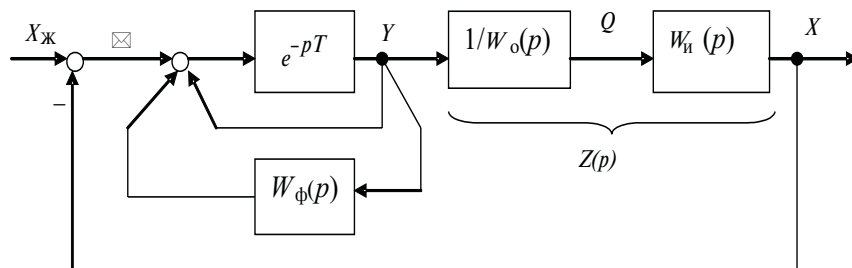


Рис. 2. Структурная схема одноканальной самообучающейся системы с фильтром

кции от различных двигателей к инструменту могут быть различными, что не снижает строгости рассмотрения задачи синтеза новых структур точных самообучающихся приводов.

Самообучение обеспечивается применением специфического регулятора, так называемого  $P$ -интегратора, представляющего собой звено запаздывания на время цикла обработки одной детали  $T$ , охваченное единичной положительной обратной связью. Звено запаздывания в схеме рис. 2 описывает ту особенность рассматриваемой системы, что для вычисления управляющих воздействий при самообучении используются значения ошибки формы не в текущие моменты времени, а в соответствующие моменты времени на предыдущем цикле обработки, с отставанием на период цикличности  $T$ .

Для обеспечения устойчивости процессов самообучения при действии высокочастотных возмущений в структуру самообучающейся системы параллельно  $P$ -интегратору необходимо вводить фильтры низкой частоты  $W_{ф}(p)$ . Характеристики и методы расчета таких фильтров подробно рассмотрены в [1].

Сглаживающий фильтр  $W_{ф}(p)$  должен обеспечивать ослабление высокочастотных составляющих, но в то же время передавать сигнал  $Y$  с выхода на вход звена запаздывания без фазовых искажений.

Преобразуем структурную схему рис. 2 так, чтобы фильтр  $W_{ф}(p)$  вошел в модифицированный объект регулирования  $Z^*(p)$  для  $P$ -интегратора. После преобразований получим схему рис. 3, для которой

$$Z^*(p) = Z(p) - W_{ф}(p), \tag{1}$$

где  $Z(p) = W_{и}(p) / W_o(p)$  – передаточная функция истинного объекта регулирования для  $P$ -интегратора.

Обеспечивая устойчивость процесса самообучения, фильтр способствует возникновению ошибки, которая по мере продолжения самообучения стремится уже не к нулю, как это имеет место при отсутствии фильтра, а к некоторому установившемуся процессу  $\delta(p)$ , повторяющемуся на каждом цикле [1].

В самом деле, по «окончании» самообучения, когда число циклов в пределе стремится к бесконечности, нулевая установившаяся ошибка  $d$  в системе достигается лишь в отношении разницы  $d = X_{ж}(p) - X^*(p) \equiv 0$ , а не в отношении истинной ошибки системы  $\delta(p) = X_{ж}(p) - X(p)$ . Учитывая отлич-

чия  $X$  от  $X^*$  (рис. 3), легко получить выражение установившейся ошибки системы:

$$\delta(p) = -X(p)W_{\phi}(p) / Z(p). \quad (2)$$

Формула (2) связывает сигналы ошибки и перемещения резца по истечении бесконечного числа циклов самообучения. Практическим приближением к предельному случаю является достаточно большое число циклов, по истечении которого дальнейшее самообучение при сохранении стационарных условий не приводит к существенному повышению точности формы детали. Наблюдаемые после этого процессы условимся называть «установившимися» процессами или процессами по окончании самообучения.

Соответствующие (2) выражения, связывающие ошибку  $\delta(p)$  и желаемую траекторию движения  $X_{ж}(p)$ , а также реальную  $X(p)$  и желаемую  $X_{ж}(p)$  траектории движения по окончании самообучения:

$$\delta(p) = -X_{ж}(p)W_{\phi}(p) / [Z(p) - W_{\phi}(p)]; \quad (3)$$

$$X(p) = X_{ж}(p)Z(p) / [Z(p) - W_{\phi}(p)]. \quad (4)$$

Ориентировочные оценки предельной точности воспроизведения движений самообучающихся систем сведены в таблицу. Первая строка таблицы содержит результаты расчетов зависимости амплитуды  $A_{\delta}$  от частоты  $\omega$  установившейся (по истечении большого числа циклов самообучения) ошибки воспроизведения гармонического сигнала  $X_{ж}(\omega)$  единичной амплитуды. Расчеты выполнены при типовой настройке самообучающегося привода подачи с электродинамическим двигателем, используемым в станках для обточки поршней.

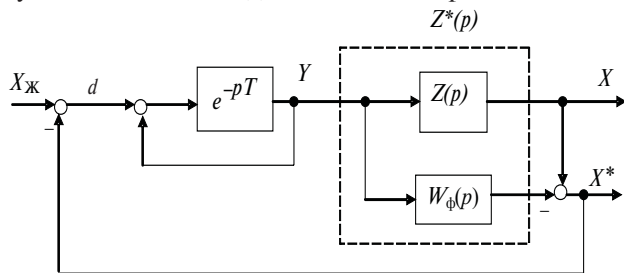


Рис. 3. Структурная схема с приведением фильтра к объекту управления

Достижение целей пьезокомпенсации рассмотренных выше случайных и систематических составляющих ошибок формы обеспечивается различными структурными решениями. Так, ошибка, вызванная вибрационными возмущениями СПИД, подавляется прямой компенсацией измеренных вибрационных смещений  $\Delta x$  (см. рис. 4), т.е. для этой цели сигнал  $\Delta x$  используется в качестве за-

дающего сигнала схемы управления деформацией  $\Delta$  пьезокомпенсатора [3]. Для подавления случайных ошибок формы, вызванных изменениями скорости шпинделя, а также систематических ошибок формы, вызванных необходимостью применения фильтра  $W_{\phi}(p)$  в контуре самообучения, в качестве задания для схемы управления деформацией пьезокомпенсатора следует использовать сигнал ошибки  $\delta$  на выходе главного сумматора контура самообучения. Соответствующая структурная схема показана на рис. 4.

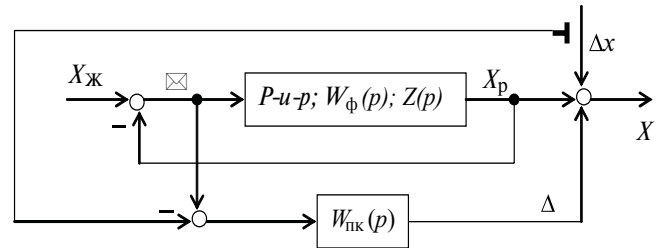


Рис. 4. Структурная схема самообучающейся системы с прямой компенсацией измеренных случайных ошибок

На схеме рис. 4 обозначено:  $P$ - $u$ - $p$  – блок структурной схемы, включающий  $P$ -интегратор;  $W_{\phi}(p)$  – фильтр;  $Z(p)$  – скорректированный объект управления в контуре самообучения;  $X_p$  – перемещение резца;  $X$  – относительное смещение инструмента и детали (с учетом возмущения  $\Delta x$ ), определяющее форму изделия;  $W_{пк}(p)$  – передаточная функция линеаризованного пьезокомпенсатора.

При отсутствии канала прямой компенсации в самообучающейся системе имеют место следующие ошибки формы: ошибка от действия случайного возмущения  $\delta_c = X - X_p = \Delta x$ ; установившаяся ошибка, вызванная применением фильтрации

$$\delta_{\phi}(p) = -X_{ж}(p)W_{\phi}(p) / [Z(p) - W_{\phi}(p)]. \quad (5)$$

Структура схемы на рис. 4 позволяет получить соотношения для расчета аналогичных остаточных ошибок формы при использовании пьезокомпенсатора:

ошибка формы от действия вибрационных возмущений

$$\delta_c^{\Pi} = X_{ж} - X_p = \Delta x [1 - W_{пк}(p)]; \quad (6)$$

установившаяся ошибка, вызванная применением фильтрации

$$\delta_{\phi}^{\Pi} = -X_{ж}(p)W_{\phi}(p)[1 - W_{пк}(p)] / [Z(p) - W_{\phi}(p)]. \quad (7)$$

Таким образом, использование линеаризованных пьезокомпенсаторов позволяет в  $1/[1 - W_{пк}(p)]$  раз снизить уровень ошибок формы, возникающих

как от действия вибрационных и «скоростных» возмущений, так и от применения необходимой фильтрации в контуре самообучения. Вторая строка таблицы иллюстрирует эффективность использования прямой пьезокомпенсации для снижения установившихся ошибок самообучающейся системы, вызванных необходимостью фильтрации. Анализ возможных значений установившейся ошибки самообучения при воспроизведении формы самых сложных поршней указывает на возможность снижения ее как минимум на порядок при использовании пьезокомпенсаторов с типовыми диапазонами управляемых деформаций 10–20 мкм.

Учитывая выраженные колебательные свойства пьезокомпенсатора и его высокую механическую добротность, оценим диапазон частот эффективной пьезокомпенсации. Предельная частота возмущений, на которых еще сохраняется эффективность пьезокомпенсации, отвечает условию

$$|1 - W_{ПК}(j\omega)| < 1, \tag{8}$$

или на частотах ниже резонансной  $\omega_{рез}$

$$|W_{ПК}(j\omega)| < 2. \tag{9}$$

Разумеется, при конструировании мехатронных устройств пьезокомпенсации следует принимать меры по повышению резонансной частоты компенсатора, не перегружая его лишними массами исполнительного органа и элементов его крепления.

Если возможности компенсации случайных возмущений ограничиваются выражением (6), то установившаяся ошибка в самообучающейся системе с пьезокомпенсаторами, вызванная необходимостью фильтрации, может быть снижена за счет предлагаемых ниже новых структурных решений в значительно большей мере, чем это описывает формула (7).

Вид самообучающейся системы	Амплитуда установившейся ошибки $A_\delta$ при частоте $\omega, c^{-1}$				
	0	500	1000	1500	2000
Одноканальная с одним ЭД	0	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$
Одноканальная с одним ЭД и прямой пьезокомпенсацией	0	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
Двухканальная с двумя самообучающимися ЭД	0	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Двухканальная с двумя самообучающимися ЭД и ПК	0	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$

В статье впервые рассматриваются системы с несколькими одновременно действующими контурами самообучения. Для организации связи между контурами самообучения предлагается использовать известные принципы построения многоканальных систем: итерационных, комбинированных, иерархических, ориентированных ранее исключительно на следящие системы.

На рис. 5 приведена известная «итерационная» структура двухканальной электромеханической системы [4]. Здесь ошибка  $\delta_1 = X_{ж} - X_p$  воспроизведения заданного движения  $X_{ж}$  приводом  $W_1$  первого «грубого» канала является задающим сигналом для контура регулирования выходного сигнала  $\Delta$  привода  $W_2$  второго «точного» канала. В конечном итоге движения первого и второго приводов, складываясь, порождают итоговое перемещение исполнительного механизма (например, резца токарного станка). Как известно [5], добротность (коэффициент усиления) двухканальных следящих систем при отсутствии динамического взаимовлияния каналов определяется произведением добротностей, а порядок астатизма – суммой порядков астатизма локализованных каналов.

Эти их преимущества, остающиеся справедливыми для широкого диапазона воспроизводимых частот также и при учете динамического взаимовлияния каналов, определили широкое распространение двухканальных следящих приводов при реализации наиболее точных электромеханических систем (локаторов, радиотелескопов, устройств аутотрекинга магнитных и оптических носителей и т.п.) [6]. Терминология самообучающихся систем, относящихся к классу программных, не позволяет использовать для их описания понятия добротности и порядка астатизма. Поэтому в настоящей статье свойства самообучающихся систем сравниваются по характеристикам установившихся ошибок самообучения.

Сравнивая структуры рис. 5 и 4, нетрудно заметить, что они совпадают, если в блок структурной схемы рис. 5  $W_1(p)$  включить  $P$ -интегратор, фильтр  $W_\phi(p)$  и скорректированный объект управления

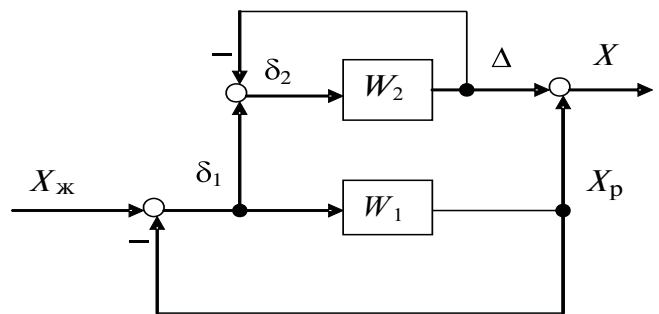


Рис. 5. Структурная схема итерационной двухканальной электромеханической системы

$Z(p)$  в контуре самообучения, а звено  $W_2(p)$ , охваченное обратной связью по перемещению  $\Delta$ , заменить передаточной функцией пьезокомпенсатора  $W_{пк}(p)$ . Таким образом, структура рис. 4 самообучающейся системы с прямой пьезокомпенсацией ошибок обладает всеми внешними признаками классической итерационной двухканальной структуры рис. 5. Преимущества двухканального решения (самообучающегося привода в сочетании с прямой пьезокомпенсацией) по снижению установившихся ошибок самообучения, вызванных необходимостью фильтрации, как раз и иллюстрируют данные второй строки таблицы. Экспериментальные исследования такой системы [3] подтвердили ее практическую работоспособность и высокую эффективность.

Осознание возможности распространения классических двухканальных структурных решений на самообучающиеся системы позволило предложить еще более кардинальное решение проблем точности воспроизведения заданных движений, когда каждый канал (и «грубый» и «точный») выполняется как самообучающийся привод со своим  $P$ -интегратором, устройствами коррекции и фильтрации. Такая структура, полученная путем замены блоков  $W_1$  и  $W_2$  (рис. 5) на блоки, включающие  $P$ - $u_1$ ,  $W_{\phi 1}(p)$ ,  $Z_1(p)$  (как на рис. 3), а также  $P$ - $u_2$ ;  $W_{\phi 2}(p)$ ;  $Z_2(p)$  в соответствующих каналах, приведена на рис. 6.

В этой системе оба  $P$ -интегратора имеют одинаковые постоянные времени запаздывания  $T$ , рав-

ные времени цикличности, а параметры фильтров  $W_{\phi i}(p)$  определяются исходя из конкретных свойств объектов управления соответствующих каналов  $Z_i(p)$ . Подобный итерационный подход может быть распространен не только на двухканальные, но и на многоканальные самообучающиеся системы.

При отсутствии взаимовлияния каналов ошибка всей системы

$$\delta = X_{ж} - X = \delta_1 - \Delta = \delta_2 \tag{10}$$

равна ошибке второго, «точного», канала  $\delta_2$ .

Выражение, аналогичное (5), связывающее между собой ошибку «грубого» контура адаптации  $\delta_1(p)$  и желаемую траекторию движения  $X_{ж}(p)$  по окончании самообучения, имеет вид:

$$\delta_1(p) = -X_{ж}(p)W_{\phi 1}(p) / [Z_1(p) - W_{\phi 1}(p)]. \tag{11}$$

Соответствующая установившаяся ошибка «точного» контура самообучения, заданием для которого является ошибка «грубого» канала  $\delta_1(p)$ ,

$$\delta_2(p) = -\delta_1(p)W_{\phi 2}(p) / [Z_2(p) - W_{\phi 2}(p)]. \tag{12}$$

Установившаяся ошибка самообучения двухканальной системы с учетом (10)–(12) определяется как

$$\delta(p) = \frac{X_{ж}(p)W_{\phi 1}(p)W_{\phi 2}(p)}{[Z_1(p) - W_{\phi 1}(p)][Z_2(p) - W_{\phi 2}(p)]}. \tag{13}$$

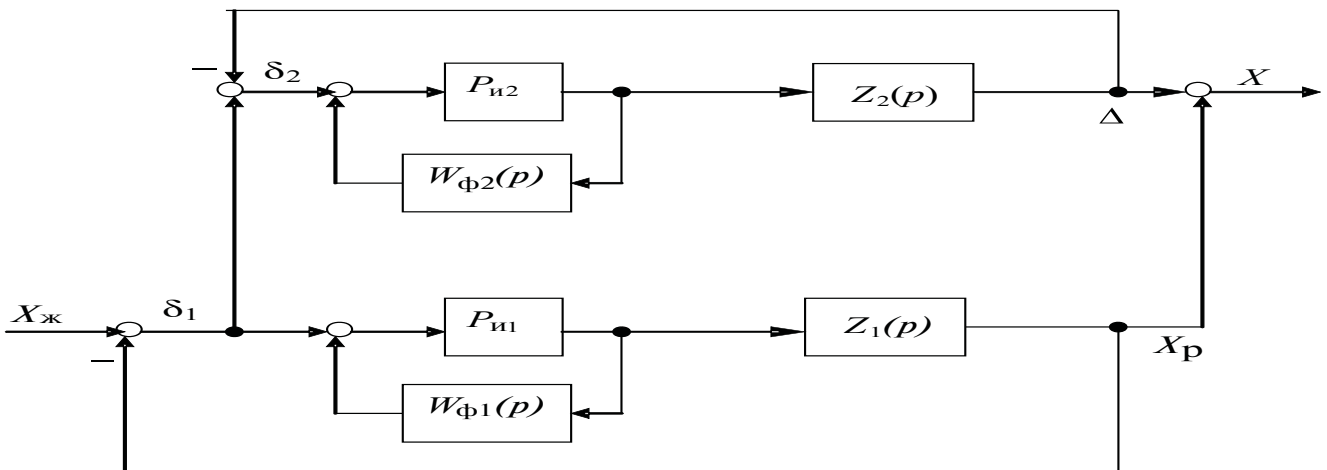


Рис. 6. Структурная схема двухканальной итерационной системы с двумя контурами самообучения

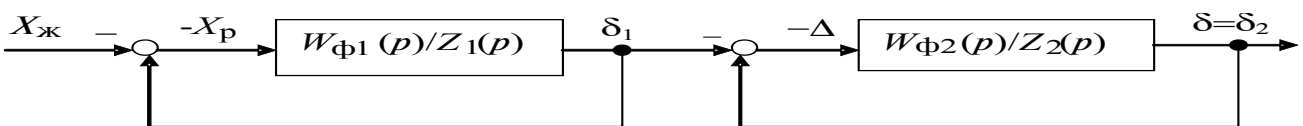


Рис. 7. Связь между желаемой формой и ее установившейся ошибкой в двухканальной системе с двумя контурами самообучения

Выражению (13) отвечает структурная схема рис. 7, связывающая между собой желаемую траекторию движения режущего инструмента  $X_{\text{ж}}(p)$  и установившуюся ошибку двухканальной системы  $\delta(p)$  по окончании бесконечного (а в реальности – достаточно большого) числа циклов самообучения.

Из (13) и рис. 7 можно видеть, что на всех частотах спектра желаемой траектории  $X_{\text{ж}}(p)$ , на которых модуль относительной (отнесенной к модулю соответствующей гармоники спектра  $X_{\text{ж}}(p)$ ) ошибки одноканальной самообучающейся системы  $|\delta_1^*| \ll 1$ , соответствующая относительная ошибка двухканальной самообучающейся системы  $|\delta^*| = |\delta_2^*| \ll |\delta_1^*| \ll 1$ .

В последней строке таблицы приведены амплитуды установившейся ошибки  $A_{\delta}$  при единичном по амплитуде гармоническом задающем воздействии  $X_{\text{ж}}$  с частотой  $\omega$  в двухканальной системе с объединением приводов на базе самообучающегося электродинамического двигателя и самообучающегося пьезокомпенсатора.

Интересно, что в качестве второго канала с целью снижения установившейся ошибки самообучения может успешно использоваться не только быстродействующий самообучающийся пьезокомпенсатор, но и второй самообучающийся электродинамический привод с параметрами настроек, аналогичными настройкам первого самообучающегося электродинамического привода. Предпоследняя строка таблицы показывает, что эффективность такого решения ниже, чем в системе с

самообучающимся электродинамическим приводом и с самообучающимся пьезокомпенсатором, однако остается заметно большей, чем в любых вариантах систем с единственным контуром самообучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский А.А. Устойчивость самообучающихся электроприводов подачи металлорежущих станков и точность процессов самообучения. – Электричество, 2007, №5.
2. Кацевич В.Л., Никольский А.А., Спанаки К.Д. Двухканальные самообучающиеся электроприводы подачи станков для обточки автомобильных поршней. – Наука и промышленность России, 2002, № 6–7.
3. Никольский А.А., Королев В.В. Экспериментальные исследования самообучающихся мехатронных систем с пьезокомпенсаторами для станков некруглого точения. – Электричество, 2011, № 12.
4. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Блейз Е.С., Данилов Ю.А., Казмиренко В.Ф. и др. Следящие приводы. Кн.1./Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Энергия, 1976.
6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982.

[29.03.12]

*Автор: Никольский Алексей Анатольевич окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института (МЭИ) в 1972 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию по тематике управления точными двухканальными электроприводами с пьезокомпенсаторами в точном канале. Ведущий научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода МЭИ.*

\* \* \*

**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>