

УДК 519-7

А.К. Клименко, канд. техн. наук

### ОБ ОЦЕНКЕ СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ ПРОЦЕССА В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ С ДИСКРЕТНОЙ ОБРАТНОЙ МОДЕЛЮ

**Аннотация.** Существуют системы с адаптивной корректировкой циклически повторяющихся управляющих программ. Важным показателем их качества является скорость сходимости процесса адаптации. Оценивается скорость сходимости в адаптивной системе с обратной моделью.

**Ключевые слова:** управляющая программа, автоматизированный объект, обратная модель, сходимость процесса адаптации, скорость сходимости.

А.К. Klymenko, PhD

### ABOUT THE ESTIMATION OF A VELOCITY OF CONVERGENCE OF PROCESS IN THE ADAPTIVE SYSTEM WITH DISCRETE REVERSE MODEL

**Abstract.** There are systems with adaptive updating of the cyclical repeating controlling programs. The important indicator of their quality is the velocity of convergence of the process of adaptation. The velocity of convergence in adaptive system with reverse model is estimated.

**Keywords:** controlling program, automated object, inverse model, convergence of the process of adaptation, velocity of convergence.

О.К. Клименко, канд. техн. наук

### ПРО ОЦІНКУ ШВИДКОСТІ ЗБІЖНОСТІ ПРОЦЕСУ В АДАПТИВНІЙ СИСТЕМІ З ДИСКРЕТНОЮ ОБЕРНЕНОЮ МОДЕЛЮ

**Анотація.** Існують системи з адаптивним коректуванням керуючих програм, які циклічно повторюються. Важливим показником їх якості є швидкість збіжності процесу адаптації. Оцінюється швидкість збіжності в адаптивній системі з оберненою моделлю.

**Ключові слова:** керуюча програма, автоматизований об'єкт, обернена модель, збіжність процесу адаптації, швидкість збіжності.

**Введение.** В настоящее время возникают проблемы при создании адаптивных систем управления. В числе адаптивных называются самонастраивающиеся, самоорганизующиеся, самообучающиеся и обучаемые системы. В качестве обучаемых могут выступать системы программного управления циклически повторяющимися технологическими процессами с адаптивной корректировкой управляющих программ.

Важный показатель качества обучаемых систем – скорость сходимости процесса адаптации. Это качество особенно важно при работе в условиях случайных возмущающих воздействий. В данной работе рассматривается скорость сходимости процесса в обучаемой системе, для реализации контура адаптации которой используется обратная модель (ОМ) автоматизированного объекта.

**Анализ известных источников.** Существуют автоматизированные технологические объекты (АТО), в которых управление осуществляется по циклически повторя-

ющимся программам. Примерами таких АТО являются металлорежущие станки с программным управлением и станы горячей прокатки. Автоматизированный технологический объект может рассматриваться как системы автоматического управления. Управляющие программы для них готовятся в условиях неполной информации об объекте управления и возмущающих воздействиях. Поэтому требуется корректировка управляющих программ как во время их разработки, так и в процессе эксплуатации.

Управляющая программа  $x(n)$  циклически повторяется и не изменяется от цикла к циклу. Продолжительность программы –  $N$  тактов дискретного времени. На основании зарегистрированных ошибок формируется сигнал адаптивной корректировки  $c_v(n)$  управляющей программы  $x(n)$  по формуле

$$c_v(n) = c_{v-1}(n) + \Delta c_v(n) = c_{v-1}(n) + \gamma_v f\{\epsilon_{v-1}(n)\}, \\ n \in [0, N], v=1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $v$  – номер цикла корректировки;

© Клименко А.К., 2012

$\Delta c_v(n)$  – приращение корректирующего сигнала;  $\gamma_v$  – коэффициент усиления в контуре адаптивной корректировки;  $\varepsilon_{v-1}(n)$  – ошибка предшествующего цикла воспроизведения управляющей программы;  $f\{\cdot\}$  – функция, определяемая этой ошибкой и обеспечивающая сходимость процесса ее минимизации.

Опубликован ряд работ по обеспечению сходимости процесса (1), но в них не рассматривалась скорость сходимости. В частности, как показано в [5], в условиях случайных возмущений для обеспечения сходимости процесса необходимо бесконечное число циклов корректировки, что на практике неосуществимо.

Основополагающим техническим решением в задачах обеспечения сходимости процесса адаптации, как для регулярной, так и случайной составляющих ошибки, явилось использование в адаптивном контуре системы ОМ АТО.

Указанная ОМ должна удовлетворять следующему требованию: переходная характеристика комплекса из последовательно соединенных ОМ и АТО в дискретном времени имеет вид:

$$h_k(n) = \begin{cases} 1 & \text{при } n \geq 1, \\ 0 & \text{при } n \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n$  – дискретное время.

Техническое решение дискретной ОМ, удовлетворяющей условию (2), было найдено на базе компьютерных технологий. Оно защищено авторским свидетельством [1] и описано, например, в [3].

В опубликованных работах не рассматривались вопросы оценки скорости сходимости процесса адаптации. Возникла потребность использования понятия скорости сходимости. Чем выше скорость сходимости, тем меньшее число циклов адаптации требуется для уменьшения ошибки до желаемой величины.

Целью данной статьи является разработка численного способа оценки скорости сходимости процесса в рассматриваемой адаптивной системе с ОМ.

К решаемым в работе задачам относятся: введение показателя скорости сходимости процесса адаптации,

разработка методики численного определения показателя скорости от параметров АТО и внешней среды,

определение зависимости показателя скорости от номера производимой корректировки программы при известных параметрах внешней среды.

**Исходные данные.** Вопрос оценки скорости сходимости процесса адаптации рассматривается на примере системы, описанной в [2]. Структурная схема указанной адаптивной системы изображена на рис.1.

Символами на схеме обозначены: УП – управляющая программа; С – сумматор; АТО – автоматизированный технологический объект; ОМ – обратная модель; ДИ – дискретный интегратор; БСА – блок статистического анализа; БУ – блок умножения; СУ – сравнивающее устройство.

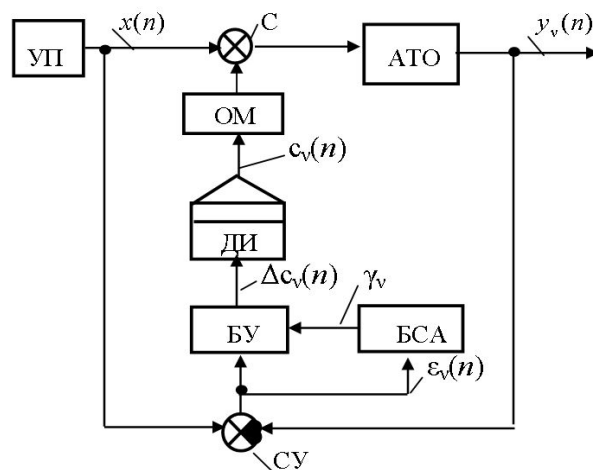


Рис.1. Структурная схема адаптивной системы

Обратная модель, входящая в адаптивный контур системы, представляет собой дискретную следящую систему, а АТО, как правило, имеет непрерывный выходной сигнал, измеряемый в определённые промежутки времени. В качестве исходного математического описания АТО при осуществлении ОМ, как показано в [3], используется импульсная переходная функция (ИПФ) АТО в дискретном времени.

Если при создании ОМ исходным математическим описанием АТО выступает его передаточная функция, то она преобразуется в (ИПФ) следующим образом. Из передаточной функции путем преобразования Лапласа

строится переходная характеристика  $h(t)$ .  
 Задается шаг квантования ОМ по времени  $T$ .  
 Формируется числовой массив ИПФ

$$k(n + \tau) = h(t) \Big|_{t=(n+\tau)T} - h(t) \Big|_{t=(n-1+\tau)T},$$

$$n \in [0, N_1],$$

где  $n$  – дискретное время;  $\tau$  – конструктивный временной сдвиг в сторону опережения;  $N_1$  – время затухания.

В ОМ, как это показано в [3], может быть реализована зависимость:

$$c(n) = \left[ x(n) - \sum_{m=1}^{N_1} c(n-m)k(m+\tau) \right] / k(\tau), \quad (3)$$

где  $x(n)$  и  $c(n)$  являются соответственно входным и выходным сигналами ОМ.

Если входящий в зависимость (3) конструктивный временной сдвиг выбран равным единице ( $\tau = 1$ ), то переходная характеристика комплекса «ОМ-АТО» удовлетворяет требованиям (2).

Рассматриваемая дискретная ОМ не описывается передаточной функцией. Но комплекс «ОМ-АТО» может рассматриваться как звено чистого запаздывания на один такт дискретного времени с коэффициентом передачи, равным единице.

В качестве исходных данных ниже приведены некоторые математические зависимости из работы [2].

Поскольку ОМ имеет временное запаздывание на один такт дискретного времени, зарегистрированный сигнал ошибки подается на вход ДИ с опережающим временным сдвигом на ту же величину. Это приводит к прекращению корректирующего сигнала

$$\Delta c_v(n) = \gamma_v \varepsilon_v(n+1). \quad (4)$$

Из приращения (4) следует, что передаточная функция последовательно соединенных адаптивного контура системы по рис.1 и АТО становится равной единице.

В адаптивной системе имеют место случайные возмущающие воздействия, которые приложены к точке измерения ошибки воспроизведения программы. Для общей ошибки  $v$ -го цикла воспроизведения программы, представляющей собой отклонение размеров обработанных деталей от заданных, принимается выражение

$$\varepsilon_v(n) = \bar{\varepsilon}_v(n) + \tilde{\varepsilon}_v(n), \quad n \in [0, N], \quad (5)$$

где  $\bar{\varepsilon}_v(n)$  и  $\tilde{\varepsilon}_v(n)$  – соответственно регулярная и случайная составляющие ошибки.

Поскольку случайная составляющая принимается аддитивной, между средним квадратом общей ошибки и средними квадратами ее составляющих справедливо следующее соотношение

$$M\{\varepsilon_v(n)^2\} = M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\},$$

$$n \in [0, N]. \quad (6)$$

Входящий в адаптивную систему по рис. 1 блок статистического анализа БСА предназначен для нахождения оптимального коэффициента усиления  $\gamma_{v+1}$ , обеспечивающего минимум среднеквадратичной ошибки воспроизведения программы после ее корректировки. Условие оптимальности определяется следующим соотношением:

$$\gamma_{v+1} = \frac{M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\}}{M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}}. \quad (7)$$

Возмущающие воздействия являются аддитивными. Поэтому составляющие ошибок соседних циклов воспроизведения программы удовлетворяют таким требованиям:

$$\bar{\varepsilon}_v(n) = \bar{\varepsilon}_{v-1}(n), \quad \tilde{\varepsilon}_v(n) \neq \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n),$$

$$M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\} = M\{\tilde{\varepsilon}_{v-1}(n)^2\}. \quad (8)$$

Критерием оптимальности процесса адаптации в адаптивной системе (рис. 1) – минимизация среднего квадрата ошибки, определяемой выражением (6) на всем интервале программы. Этому критерию соответствует стремление к нулю среднего квадрата регулярной составляющей ошибки, т.е.

$$\lim_{v \rightarrow \infty} M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} = 0, \quad n \in [0, N].$$

**Изложение результатов.** Сначала введем показатель скорости сходимости процесса адаптации, которая определяется тем, во сколько раз уменьшается средний квадрат регулярной составляющей ошибки после одного цикла корректировки программы. В качестве показателя скорости принимаем выражение

$$V_{v+1} = \frac{M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} - M\{\bar{\varepsilon}_{v+1}(n)^2\}}{M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\}}, \quad (9)$$

где  $V_{v+1}$  – показатель скорости адаптации при переходе с  $v$ -го на  $(v+1)$ -й цикл корректировки программы.

В случае полного исчезновения регулярной составляющей ошибки в результате одного цикла корректировки программы скорость адаптации максимальна ( $V_{v+1} = 1$ ). Если же корректировка не приводит к изменению среднего квадрата ошибки, то числитель в (9) исчезает, что свидетельствует о нулевом значении скорости сходимости ( $V_{v+1} = 0$ ).

А теперь рассмотрим влияние удельной доли случайной составляющей в объеме регистрируемой ошибки на скорость сходимости процесса адаптации за один цикл корректировки программы.

До корректировки программы ошибка управления имеет вид (5), а для среднего квадрата ошибки справедливо выражение (6).

Полагаем, что после  $v$ -го цикла корректировки программы уже известны средние квадраты регулярной и случайной составляющих ошибки. При этом средний квадрат случайной составляющей остается постоянным для всех циклов воспроизведения корректируемой программы.

Для определения показателя скорости сходимости (9) требуется вычислить средний квадрат регулярной составляющей ошибки после одной корректировки. Указанная ошибка определяется введением приращения корректирующего сигнала (4) на вход дискретного интегратора ДИ

$$\epsilon_{v+1}(n) = \bar{\epsilon}_{v+1}(n) + \tilde{\epsilon}_{v+1}(n) + \Delta\epsilon_{v+1}(n), \quad (10)$$

где  $\Delta\epsilon_{v+1}(n)$  — изменение ошибки, порождаемое приращением (4).

Как показано в [2], выражение для ошибки (10) после преобразований с использованием зависимостей (8)

$$\epsilon_{v+1}(n) = \bar{\epsilon}_v(n)(1 - \gamma_{v+1}) + \tilde{\epsilon}_{v+1}(n) - \gamma_{v+1}\tilde{\epsilon}_v(n),$$

а ее средний квадрат на интервале  $[0, M]$  с учетом аддитивности помехи преобразуется к такому виду

$$M\{\epsilon_{v+1}(n)^2\} = M\{\bar{\epsilon}_v(n)^2\}(1 - \gamma_{v+1})^2 + M\{\tilde{\epsilon}_{v+1}(n)^2\} + M\{\gamma_{v+1}\tilde{\epsilon}_v(n)^2\}. \quad (11)$$

Средний квадрат ошибки (11) может быть представлен как сумма квадратов регулярной и непрерывной составляющих, где регулярная составляющая

$$M\{\bar{\epsilon}_{v+1}(n)^2\} = (1 - \gamma_{v+1})^2 M\{\bar{\epsilon}_v(n)^2\} + \gamma_{v+1}^2 M\{\tilde{\epsilon}_v(n)^2\}. \quad (12)$$

В состав получаемой регулярной составляющей переходит часть случайной составляющей ошибки предыдущего цикла  $\tilde{\epsilon}_v(n)$  из-за неизбежного попадания ее в дискретный интегратор. Этим объясняется влияние случайных возмущающих воздействий на скорость сходимости процесса адаптации.

Используя соотношение (12), приведем выражение для показателя скорости (9) к следующему виду:

$$V_{v+1} = \gamma_{v+1}(2 - \gamma_{v+1}) - \frac{\gamma_{v+1}^2 M\{\tilde{\epsilon}_v(n)^2\}}{M\{\bar{\epsilon}_v(n)^2\}}. \quad (13)$$

Для удобства дальнейших выкладок введем дополнительную переменную, равную отношению средних квадратов случайной и регулярной составляющих ошибки,

$$\tilde{\sigma}_v = M\{\tilde{\epsilon}_v(n)^2\} / M\{\bar{\epsilon}_v(n)^2\}, \quad (14)$$

где  $\tilde{\sigma}_v$  — переменная, которую будем называть интенсивностью помех.

Важным фактором, влияющим на показатель скорости сходимости, является коэффициент усиления в адаптивном контуре адаптивной системы. Он определяется соотношением случайной и регулярной ошибки по условию оптимальности (7).

Используя выражения (14) и (7) с подстановкой их в (12), можно установить, как изменяется средний квадрат постоянной составляющей ошибки после корректировки программы:

$$M\{\bar{\epsilon}_{v+1}(n)^2\} = \frac{\tilde{\sigma}_v}{1 + \tilde{\sigma}_v} M\{\bar{\epsilon}_v(n)^2\}. \quad (15)$$

На основании тех же соотношений получаем из (13) упрощенное выражение для показателя скорости сходимости процесса в адаптивной системе с ОМ:

$$V_{v+1} = 1 / (1 + \tilde{\sigma}_v) = \frac{M\{\bar{\epsilon}_v(n)^2\}}{M\{\bar{\epsilon}_v(n)^2\} + M\{\tilde{\epsilon}_v(n)^2\}}. \quad (16)$$

Полученные выражения (15) и (16) показывают, что при корректировке программы в адаптивной системе с ОМ на снижение скорости адаптации влияют только случайные возмущения. Параметры же самой системы на скорость адаптации не влияют.

Полученные формулы отражают циклически повторяющиеся процедуры и не показывают зависимостей скорости адаптации от параметров случайных возмущений. Для получения этих зависимостей требуется численное моделирование.

Моделирование было выполнено на примерах работы адаптивной системы по рис.1 следующим образом. Предполагается, что все полученные выше формулы справедливы, а передаточная функция последовательно соединенных адаптивного контура и АТО равна единице. На входы адаптивного контура и БСА поступают результаты измерений с выхода сравнивающего устройства СУ. В БСА, как это показано в [2], вычисляются средние квадраты регулярной и случайной составляющих ошибок, зарегистрированных при каждом двух воспроизведениях программы.

При моделировании принимается, что средние квадраты регулярной и случайной составляющих ошибки уже известны и задаются в различных отношениях перед каждой корректировкой программы. Вычисляется интенсивность помех  $\bar{\sigma}_v$ . По формулам (15) и (16) находятся соответственно средний квадрат регулярной составляющей ошибки и показатель скорости сходимости, получаемые при воспроизведении скорректированной программы.

При моделировании ставились две задачи: определить, как зависит скорость сходимости от интенсивности помех за один цикл корректировки, и оценить, как изменяется скорость сходимости от цикла к циклу корректировки.

Результаты моделирования показаны в приведенных ниже таблицах и на построенных по ним графиках.

В табл.1 приведены расчетные данные, отражающие зависимость скорости сходимости от интенсивности помех за один цикл корректировки, а также получаемые в процессе расчета значения оптимального коэффициента усиления  $\gamma_{v+1}$  и регулярной составляющей ошибки  $M\{\bar{\epsilon}_{v+1}(n)\}^2$ .

В качестве исходных данных моделируемой адаптивной системы было принято, что до корректировки средний квадрат регу-

лярной составляющей ошибки равен единице, а средний квадрат случайной составляющей изменяется от эксперимента к эксперименту от нуля до 2.

### 1. Зависимость скорости сходимости от интенсивности помех

| $M\{\bar{\epsilon}_v(n)\}^2$ | $\gamma_{v+1}$ | $M\{\bar{\epsilon}_{v+1}(n)\}^2$ | $V_v$ |
|------------------------------|----------------|----------------------------------|-------|
| 0                            | 1              | 0                                | 1     |
| 0.1                          | 0.91           | 0.091                            | 0.91  |
| 0.2                          | 0.833          | 0.167                            | 0.833 |
| 0.3                          | 0.714          | 0.214                            | 0.714 |
| 0.5                          | 0.667          | 0.333                            | 0.667 |
| 0.7                          | 0.558          | 0.411                            | 0.558 |
| 0.8                          | 0.555          | 0.444                            | 0.555 |
| 1.                           | 0.5            | 0.5                              | 0.5   |
| 1.2                          | 0.455          | 0.545                            | 0.455 |
| 1.5                          | 0.4            | 0.6                              | 0.4   |
| 2.0                          | 0.333          | 0.667                            | 0.333 |

Полученные расчетным путем данные, приведенные в табл.1, графически отображены на рис.2. График показывает зависимость скорости сходимости процесса от интенсивности случайных помех. В случае отсутствия помех скорость сходимости максимальна, а показатель скорости равен единице. Увеличение уровня помех влечет за собой монотонное снижение скорости сходимости.

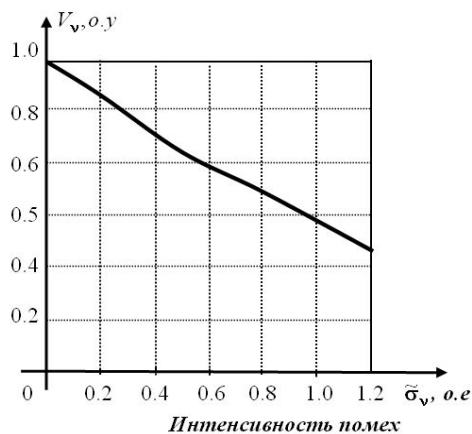


Рис.2. Зависимость скорости сходимости в цикле от интенсивности помех

В табл. 2 отображены результаты решения второй задачи моделирования. Приведены зависимости скорости сходимости процесса адаптации от номера цикла корректировки программы при различной интенсивности случайных возмущений.

2. Зависимость скорости сходимости от номера цикла корректировки

| $\tilde{\sigma}_0$ | $\nu$ | $\tilde{\sigma}_\nu$ | $\bar{\delta}_\nu$ | $V_\nu$ |
|--------------------|-------|----------------------|--------------------|---------|
| 0.1                | 0     | 0.1                  | 1                  | 0       |
|                    | 1     | 1.09                 | 0.091              | 0.91    |
|                    | 2     | 2.12                 | 0.047              | 0.32    |
|                    | 3     | 3.12                 | 0.0319             | 0.24    |
|                    | 4     | 4.52                 | 0.0216             | 0.181   |
|                    | 5     | 5.64                 | 0.0177             | 0.1506  |
| 0.5                | 0     | 0.5                  | 1                  | 0       |
|                    | 1     | 1.5                  | 0.333              | 0.4     |
|                    | 2     | 2.5                  | 0.2                | 0.285   |
|                    | 3     | 3.52                 | 0.142              | 0.221   |
|                    | 4     | 4.54                 | 0.1104             | 0.180   |
|                    | 5     | 5.55                 | 0.09               | 0.152   |
| 1.0                | 0     | 1                    | 1                  | 0       |
|                    | 1     | 2                    | 0.5                | 0.333   |
|                    | 2     | 3                    | 0.333              | 0.25    |
|                    | 3     | 4                    | 0.25               | 0.2     |
|                    | 4     | 5                    | 0.2                | 0.066   |
|                    | 5     | 6                    | 0.15               | 0.14    |

Символами в табл.1 обозначены:  $\tilde{\sigma}_0$  – интенсивность помех до первой корректировки;  $\nu$  – номер цикла корректировки;  $\tilde{\sigma}_\nu$  – интенсивность помех в произвольных циклах;  $\bar{\delta}_\nu$  – регулярная составляющая ошибки;  $V_\nu$  – показатель скорости сходимости. Из табл. 2 видно, что скорость сходимости уменьшается как от цикла к циклу. Чем выше интенсивность помех, тем большее количество циклов требуется для уменьшения регулярной составляющей ошибки до желаемой величины.

Материалы таблицы отражены в графике на рис. 3. Оси координат соответствуют регулярной составляющей ошибки  $\bar{\delta}_\nu$  и номеру цикла корректировки  $\nu$ . Номера приведенных кривых соответствуют интенсивности помех  $\tilde{\sigma}_0$  до первой корректировки.

Из табл.2 видно, что после каждого цикла корректировки доля случайной составляющей ошибки увеличивается, вследствие

чего скорость сходимости процесса адаптации неуклонно снижается.

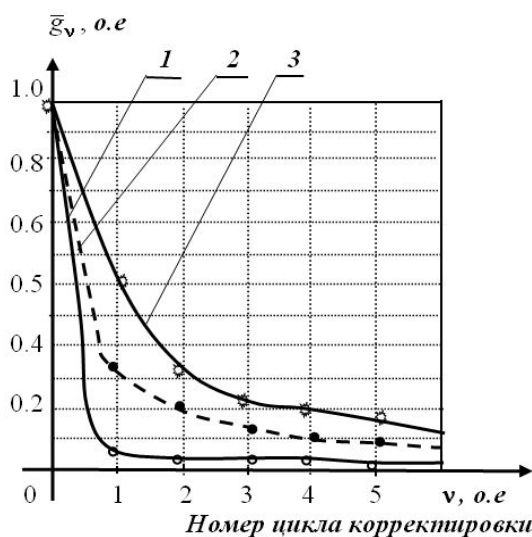


Рис.3. Зависимость скорости сходимости от номера цикла корректировки (1 –  $\tilde{\sigma}_0 = 0,1$ ; 2 –  $\tilde{\sigma}_0 = 0,5$ ; 3 –  $\tilde{\sigma}_0 = 1,0$ )

**Выводы**

1. Предложен показатель скорости сходимости процесса в адаптивной системе с дискретной ОМ и показана методика его вычисления. Получены кривые зависимости скорости сходимости от интенсивности возмущающих воздействий.

2. Адаптивная система с ОМ и оптимизацией коэффициента усиления в контуре адаптации обладает хорошими качествами относительно скорости сходимости. При отсутствии помех процесс адаптации завершается за один цикл корректировки, а при ограниченной интенсивности помех требуется лишь несколько циклов.

3. Это преимущество достигается за счет использования в блоке адаптации БСА. Но, как правило, за получаемые результаты приходится платить. В нашем случае такой платой является необходимость выполнения двукратного воспроизведения программы для обеспечения работоспособности БСА. Это снижает скорость сходимости. Для более интенсивного ускорения процесса адаптации нужно разработать такой БСА, для обеспечения функционирования которого исчезнет

необходимость двукратного воспроизведения программы.

4. Изложенные результаты могут быть применены, например, при решении задачи отладки управляющих программ для станков с ЧПУ. При этом автоматическое измерение обработанных деталей может выполняться как на автоматизированной координатно-измерительной машине (КИМ), так и на станке, где деталь обработана. Устройства адаптации могут быть внешними, а действующие системы ЧПУ при этом не усложняются.

#### Список использованной литературы

1. А. с. СССР 1406563, МКИ G 05 B 5/01. Корректирующее устройство / Клименко А.К., Клименко В.Г. (СССР). – № 4041877/24-24; заявл. 25.03.86; опубл. 30.06.88, Бюл. №24.

2. Клименко А.К. Об оптимизации коэффициента усиления в адаптивной системе с обратной моделью / А.К. Клименко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2006. – № 2. – С.125–131.

3. Клименко А.К. Об упрощенном численном конструировании обратной модели динамического объекта / А.К. Клименко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – № 1. – С.14–24.

4. Клименко А.К. О сходимости процессов адаптации в цифровых системах программного управления станками / А.К. Клименко // Адаптивные системы управления металлорежущими станками. Под ред. А.Е. Кобринского, Сер. С–1. – М.: – НИИМАШ. – 1971. – С.58–67.

5. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. – М.:– Наука, 1968. – 400 с.

#### References

1. Copyright certificate 1406563 USSR, MKI G 05 B 5/01. Correction unit / Klymenko A.K., Klymenko V.G. (USSR). – № 4041877/24–24; appl. 25.03.86, publ. 30.06.88, Bull. N 24 [in Russian].

2. Klymenko A.K. On the optimization of the coefficient of amplification in an adaptive system with feedback model / *Automatiks. Automation. Electrical complexes and systems.* – 2006.– № 2. – P.125–131 [in Russian].

3. Klymenko A.K. About simplified numerical development of the inverse model of a dynamic object / *Automatics. Automation. Electrical equipment and systems.* – 2007. – № 1. – P. 16–24 [in Russian].

4. Klymenko A.K. The convergence of processes of adaptation in digital systems software machine control / *Adaptive control machine tools*, ed. A.E.Kobrinского. Ser.C–1. – Moscow: – NIIMASH. – 1971. – P. 58–67 [in Russian].

5. Tsytkin J.Z. *Adaptation and Learning in Automatic Systems.* – Moscow: – Nauka, 1968. – 400 p. [in Russian].



Клименко  
Александр Константинович,  
канд.техн. наук, доцент  
Бердянского  
Госпедуниверситета,  
т.: (+380-6153)-70329,  
моб. +380-99-304-73-79,  
E-mail: aklym@ukr.net

Получено 14.02.2012