

## Литература

1. Чигиринский, Ю.Л. Математические методы управления процессами механической обработки : монография / Ю. Л. Чигиринский ; ВолгТУ. - Волгоград, 2010. - 139 с.
2. Лепестов Ф. Autodesk product design suite: инновационное проектирование, САПР и графика, 2012. № 1 (183). С. 35-38.
3. Бочкарев П.Ю., Митин С.Г., Бокова Л.Г. Разработка дополнительных показателей оценки производственной технологичности для учета особенностей многономенклатурных механообрабатывающих систем // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева, 2015. № 4. С. 16–20.
4. Митин С.Г., Бочкарев П.Ю. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем // Научные технологии в машиностроении, 2016. № 11. С. 44-47.
5. Booch G. Object-oriented analysis and design with applications. - Boston: Addison-Wesley, 2016. - 380 с.
6. The Standish Group International, Inc. URL: <http://www.standishgroup.com>. (дата обращения 25.12.2017).

УДК 681.5.015.3

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
МНОГОМЕРНЫМИ ДИСКРЕТНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ПО  
КРИТЕРИЮ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ****И.Х.Сиддиков, М.О.Атажонов (ТашГТУ)**

*В статье рассмотрены результаты разработки алгоритма оптимального управления многомерными дискретными динамическими объектами по критерию быстродействия. Предложен модифицированный метод реализации алгоритма, базирующийся на представлении дискретной системы в виде пространства переменных состояний и на теореме об N-интервалах. Показано, что при определении значений управляющих воздействий следует использовать значения прогнозируемых ошибок, позволяющих улучшить качество процесса управления и обеспечить высокую точность вычисления управляющих воздействий.*

*Мақолада кўп ўлчамли динамик объектларни дискрет бошқарув тизимларини тезкорлик меъзони бўйича оптимал маънода синтезлаш алгоритмини ишлаб чиқиш масаласи кўриб чиқилган. Кўйилган масалани ечиш учун модификацияланган усул таклиф қилинган бўлиб, ушбу усул дискрет тизимни ўзгарувчан холитлар фазоси ва N-интерваллар теоремаси кўринишида тавсифлашга асосланган. Бошқарувчи таъсирлар қўйматларини аниқлашда башоратловчи хатоликлар қўйматларидан фойдаланиш таклиф этилган, бу эса бошқарув жараёни сифатини сезиларли даражада яхшилаш ва бошқарувчи таъсирларни ҳисоблашни юқори аниқлигини таъминлаш имконини беради.*

*The article deals with the development of a synthesis algorithm in the sense of the optimal control of multidimensional dynamic objects by the criterion of speed. To solve this problem, we propose a modified method based on the representation of a discrete system in the form of a space of state variables and using the theorem on N-intervals. When determining the values of control actions, it is proposed to use the values of predicted errors that allow improving the quality of the control process and will provide high accuracy of calculation of control actions.*

ISSN 1684-789X

ИСЛОМ КАРИМОВ  
НОМИДАГИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ  
ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

---

**ТошДТУ  
ХАБАРЛАРИ**

**ВЕСТНИК  
ТашГТУ**

2 / 2018

## CONTENTS

### FUNDAMENTAL SCIENCES

<b>Sh. Qayumov, A.B.Qayumov.</b> The construction of a mathematical model and the development of computational algorithms for solving the three – dimensional problem of computing.....	3
<b>A.Olimov, A.Yuldashev, A. Fayziev.</b> Choice of the space of generalized functions for exponential lagrangians.....	10

### ELECTRONICS AND AUTOMATION, INFORMATION TECHNOLOGY AND INFORMATION SECURITY

<b>H.Z. Igamberdiev, U.F.Mamirov.</b> Regularized algorithms of identification of uncertainty dynamic control objects .....	16
<b>O.O.Zaripov, U.SH.Hamrokulov.</b> Improvement of the integrated system of automated design of design and technological preparation of additive production.....	21
<b>I.H.Siddikov, M.O.Atajonov.</b> Development of algorithm of optimum control by multidimensional discrete dynamic objects by quick criteria .....	28
<b>R.M. Aliev, M.M. Aliev.</b> Analysis of the method of monitoring the state of the travel site on the high-speed line.....	35
<b>N.M. Aripov, SH.SH. Kamaletdinov.</b> Improvement of cargo and commercial work in the conditions of application of electronic document flow on railway transport of the Republic of Uzbekistan.....	39
<b>G. Sh. Abidova.</b> Selection of the type used analog-to-digital converter for processing signal on output adsorption installation.....	45
<b>H.N.Zaynidinov, F.R.Nurjanov.</b> Processing of digital images of the face using the Wavelet method. ....	50
<b>B.M.Akxmedov, A.A.Begunov, R.A.Ibragimov, F.Y. Xudoyqulov.</b> The solution of the problem of ensuring the uniformity of measurements of the humidity of gases.....	57

### ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING, ALTERNATIVE ENERGY SOURCES ALTERNATIVE

<b>SH. E.Begmatov.</b> Secondary source of power supply with high coefficient of efficiency.....	63
<b>N.T.Tashboyev, E.B.Saitov, N.R.Umirova,G.A.Xazratov.</b> The essence of the electrophysical parameters of semiconductor materials in the conversion of solar energy into electricity.....	67
<b>N.O.Usmonov.</b> Analysis of cogeneration of electric and thermal energy at mini-CHPP.....	73
<b>K.S.Djuraev, F.T.Shadibekova, H.T.Usmonov.</b> Calculation of parameters and operating modes of a low-capacity hydro-accumulation installation.....	79

**Ключевые слова:** широтно-импульсный модулятор, синтез оптимального управления методов и алгоритмов, дискретизация динамических моделей, микропроцессорный регулятор, дифференциальные уравнения.

Решению задачи синтеза оптимальных управляющих воздействий в системах с линейной модуляцией сигналов посвящено достаточно много трудов, методов и алгоритмов [1-3]. Основными недостатками этих методов является их чрезвычайно громоздкий и сложный математический аппарат, большое число упрощающих предположений и выкладок, сложность интерпретаций получаемых результатов. Кроме того, использование этих методов часто приводит к получению систем дифференциальных уравнений в частных производных или алгебраических трансцендентных уравнений, точное решение которых невозможно; при некорректности отдельных выкладок решения в принципе может не быть; применение численных методов решения при большой мерности полученной системы даже при использовании возможностей современных компьютеров может дать абсолютно неприемлемый результат. Кроме того, применение существующих способов решения подобных задач даже с использованием современной компьютерной техники не может гарантировать получение приемлемых результатов. Поэтому разработка машиноориентированных методов синтеза управляющих воздействий в системах с широтно-импульсной модуляцией применения, не требующего специальной математической подготовки, является актуальной задачей. Для решения поставленной задачи предлагается метод, базирующийся на интерпретации динамики импульсных систем в виде пространства переменных состояний и использовании теоремы об  $N$  – интервалах [4]. Использование этого метода для систем с нелинейной модуляцией управляющего воздействия требует модификации известного алгоритма решения задачи перевода многомерного линейного динамического объекта, имеющего  $M$  входных и  $N$  выходных регулируемых переменных из заданного начального состояния в требуемое конечное состояние за минимальное количество тактов управления. Предполагается, что период дискретизации по всем входным сигналам одинаковый. Минимально возможное число тактов перевода в соответствии с теоремой об  $N$  – интервалах определяется выражением:

$$L = \text{Int} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij} / M + 0.5 \right\}. \quad (1)$$

где  $P_{ij}$  - порядок передаточной функции (дифференциального уравнения) канала;  $j$ -й вход;  $i$  -  $i$  -й выход объекта управления.

Требуемое состояние объекта управления определяется условиями:

$$Y_i(L + K) = G_i(L + K), \quad i = \overline{1, N}, \quad K = \overline{0, \overline{N}_i}, \quad (2)$$

где  $Y_i(L + K)$  - значение  $i$ -й выходной переменной в  $(L + K)$ -м такте;

$G_i(L + K)$  - требуемое значение  $i$ -й выходной переменной;  $C_i$  - число тактов фиксации  $i$ -й выходной переменной.

На основе анализа динамики поведения объекта управления изменим условия (2) на следующие

$$Y_i(L + K) = E_i(L + K), \quad i = \overline{1, N}, \quad K = \overline{0, \overline{N}_i}. \quad (3)$$

где  $E_i(L + K) = G_i(L + K) - Y_i^*(L + K), \quad (4)$

$Y_i^*(L + K)$  - прогнозируемое значение  $i$ -той выходной переменной при условии:

Если невыполнение 1-го условия осуществляется тривиально, то 2-е условие, как правило, требует значительной трудоемкости при вычислении. Для преодоления этой трудности рассмотрим один из подходов, обеспечивающий выполнение условия (13), которое заключается в искусственном увеличении число тактов управления.

Допустим, что решение задачи синтеза для линейной импульсной системы при числе тактов перевода, определяемым выражением (1), привело к невыполнению условия (13). Увеличим число тактов перевода на  $J$ . Примем сначала  $J=1$ . Тогда значения прогнозируемых ошибок изменятся, и будут определяться выражением:

$$E_i^j(L+K) = E_i(L+K) - \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^J U_j(m) * \omega_{ij}(L+K-m+1), \quad (14)$$

$$i = \overline{1, N}, \quad K = \overline{1, C_1 + J},$$

где подставляем найденные выражения для прогнозируемых ошибок в выражения (12), что позволит выразить  $L$  в виде основных управляющих воздействий для каждой входной переменной  $J$  через дополнительные управления:

$$U_j(J+m) = U_j(j+m) + \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^J \omega_{ij}(L+k-m+1+J) * U_k(i) \quad (15)$$

Теперь необходимо решить оптимизационную задачу, связанную с минимизацией критерия:

$$F = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{L+J} U_j^2(i) \rightarrow \min, \quad (j = \overline{1, M}; i = \overline{1, J}) \quad (16)$$

Приведенная выше задача решается просто при использовании метода наименьших квадратов. В результате ее решения находятся значения вспомогательных управляющих воздействий  $U_j(k), (k = \overline{1, J})$ . Если все они удовлетворяют условию (13), то по формуле (14) находим значения прогнозируемых ошибок, подставляем их в выражение (12) и находим значения управляющих воздействий  $U_j(k), (k = \overline{J+1, L+J})$ . Их также необходимо проверить на выполнение условия (13). Если оно выполняется, то можно переходить к следующему этапу синтеза. Иначе, значение  $J$  необходимо увеличить на единицу и повторить процедуру минимизации суммы квадратов управляющих воздействий.

После того как в результате постепенного увеличения числа тактов управления добиваемся выполнения условия (13), переходим непосредственно к итерационной процедуре синтеза управляющих воздействий в классе широтно-импульсных сигналов. Решение этой задачи основывается на положении о том, что суммарная площадь управляющих импульсов по каждому выходу для линейной импульсной системы и системы с широтно-импульсной управляющей модуляцией должны быть равны. При этом значения управляющих воздействий, найденные при синтезе для линейной импульсной системы, являются поправками в виде изменения площади соответствующих управляющих сигналов, модулированных по ширине. Определим основные этапы решения задачи:

1) принимаем  $\tau_j(i) = |U_j(i)|,$

$$v(i) = \begin{cases} A_j^* \sin g\{U_j(i)\} (i-1) * T < t \leq n_{pu}(i=1) * T + \tau_j(i); \\ 0, n_{pu}(i-1) * T + \tau_j(i) < t \leq i * T, \end{cases}$$

где  $i = \overline{1, M}; i = \overline{1, J}$ .

(17)

Приведенные выше управляющие воздействия являются вспомогательными, ориентированными на минимизацию амплитуд управляющих воздействий, и поэтому в дальнейшем не изменяются.

2) определяется состояние системы на момент  $t = JT$ . Это состояние принимается за начальное, в дальнейшем не изменяется и служит для вычисления прогнозируемых ошибок в последующие моменты времени.

3) определяется номер итерации:

$$q = 0; U_j^q(i) = 0; \tau_j^q(i) = 0; \text{ где } j = \overline{1, M}; i = \overline{J+1, J+L}. \quad (18)$$

4) рассчитываются значения переходного процесса в системе для:

$$5) t = J + L + K; K = \overline{0, C_1}.$$

6) определяются прогнозируемые значения ошибок  $E_i^q(J + L + K); i = \overline{1, N}; K = \overline{0, C_1}$ .

7) по формулам (12) рассчитываются управляющие воздействия для линейной импульсной системы. Предполагается, что коэффициенты  $R_{jm}$  определены ранее. Обозначим найденные значения воздействий в виде  $U_j(J + K)$ .

8) Рассчитываем аналоги управляющих воздействий для широтно-импульсной системы:

$$U_j^{q+1}(i) = U_j^q(i) + U_j(i), \quad \tau_j^{q+1}(i) = U_j^{q+1}(i) / A_j; j = \overline{1, M}; i = \overline{J + 1, J + L}.$$

По формуле (18) определяем вид управляющего воздействия.

9) если  $|U_j(i)| < \varepsilon; j = \overline{1, M}; i = \overline{J + 1, J + L}$ ,

где  $\varepsilon$  - наперед заданная погрешность вычисления, следовательно решение найдено и далее осуществляется переход к пункту 4.

Рассмотрим применение предлагаемой методики на примере синтеза управляющих воздействий для системы, имеющей структуру, показанную на рис 1.

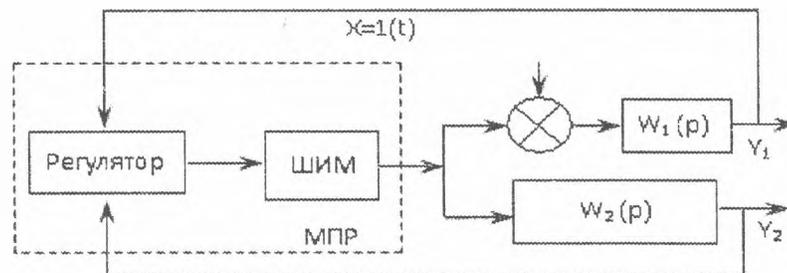


Рис. 1. Структура широтно-импульсной системы

Пусть  $W_1(p) = 1/5p + 1; W_2(p) = 5/2(2p + 1); T = 1; G_1 = 5; A = 100; G_2 = 2$

Находим  $h_1(t) = L^{-1}[W_2(p)/p] = 5(-2 + t + 2e^{-t/2})$

Рассчитываем значения переходных процессов и весовых функций:

Для того чтобы установившееся значение  $Y_1(t)$  было равно  $G_1 = 5$ , принимаем  $X=5$ . Для данной системы имеем:  $L = 3; C_1 = 0; C_2 = 1$ . Из коэффициентов весовых функций формируем систему линейных уравнений вида (7):

$$W = \begin{bmatrix} 0,12152 & 0,14841 & 0,18127 \\ 3,5525 & 2,6135 & 1,0653 \\ 4,12205 & 3,5525 & 2,6135 \end{bmatrix}$$

Решение системы линейных уравнений (7) дает следующий результат:

$$\left. \begin{aligned} U(1) &= -14,3 * E_1(3) - 12,07 * E_2(3) + 14,88 * E_2(4) + 64,8 * X \\ U(2) &= -23,07 * E_1(3) + 20,254 * E_2(3) - 24,2564 * E_2(4) - 104,088 * X \\ U(3) &= -87,09 * E_1(3) - 8,49 * E_2(3) + 9,88 * E_2(4) + 39,295 * X \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Принимая начальные условия за нулевые, получим:  $E_1(3) = G_1$ ;  $E_2(3) = G_2$ ;  $E_2(4) = G_2$ .  
Подстановка полученных значений в (19) дает:

$$U(1) = -388,42; \quad U(2) = -625,014; \quad U(3) = -236,186;$$

Легко убедиться в том, что условие (13) не выполняется. Принимаем  $J=1$ , тогда:

$$\begin{aligned} E_1(4) &= G_1 - \omega_1(4) * U(1) \\ E_2(4) &= G_2 - \omega_2(4) * U(1) \\ E_2(5) &= G_2 - \omega_2(5) * U(1) \end{aligned}$$

Подстановка этих выражений в (21) вместо  $E_1(3)$ ,  $E_2(3)$ ,  $E_2(4)$  дает:

$$\begin{aligned} U(2) &= -388,42 - 2,43 * U(1) \\ U(3) &= 625,014 + 1,93 * U(1); \\ U(4) &= -236,186 - 0,5 * U(1) \end{aligned}$$

Используем обычную процедуру метода наименьших квадратов для минимизации функции:

$$F = \sum_{k=1}^4 U^2(k) \rightarrow \min, \quad \frac{\partial F}{\partial U(1)} = 4537,47 + 21,77 * U(1) = 0.$$

Откуда находим  $U(1) = -208,44$

Поскольку найденное управление не удовлетворяет условию (13), принимаем  $J = J + 1$  и осуществляем минимизацию функции по переменным  $U(1)$  и  $U(2)$ :

$$F = \sum_{k=1}^5 U^2(k) \rightarrow \min$$

В результате расчета получаем  $U(1) = -135,6$  и  $U(2) = 21,5$ . Поскольку условие (13) не выполняется, принимаем  $J = J + 1 = 3$  и минимизируем критерий  $F = \sum_{k=1}^6 U^2(k) \rightarrow \min$  по переменным  $U(1)$ ,  $U(2)$ ,  $U(3)$ . В результате получим:

$$U(1) = -86,273; \quad U(2) = -20,73; \quad U(3) = 37,6; \quad U(4) = 73,02; \quad U(5) = 56,77; \quad U(6) = 59,747$$

Все полученные выше значения удовлетворяют (13), поэтому можно переходить к итеративной процедуре поиска воздействий, модулированных по ширине.

Принимаем  $\tau_1 = 0,862773$ ;  $\tau_2 = 0,2073$ ;  $\tau_3 = 0,3736$ ;

$$V_1 = \begin{cases} -100, & 0 \leq t \leq \tau_1 \\ 0, & \tau_1 < t \leq 1 \end{cases} \quad V_2 = \begin{cases} -100, & 1 \leq t \leq 1.2073 \\ 0, & 1.2073 < t \leq 2 \end{cases} \quad V_3 = \begin{cases} -100, & 2 < t \leq 2.3736 \\ 0, & 2.3736 < t \leq 3 \end{cases}$$

Необходимо найти  $\tau_4$ ,  $\tau_5$ ,  $\tau_6$  и, соответственно,  $V_4$ ,  $V_5$ ,  $V_6$ ,

Результаты итеративного поиска в соответствии с изложенной методикой приведены в табл.1:

Таблица 1

**Значения управляющих воздействий и выходных сигналов по результатам итеративного поиска**

G	U(4)	U(5)	U(6)	4	5	6
0	76,1575	50,48	-56,6	0,7616	0,5048	0,566
1	-29,428	48,97	-19,544	0,4359	1	0,7355
2	7,616	-2,297	-5,3	0,512	0,977	0,79
3	0,03672	-2,834	2,798	0,5124	0,9487	0,79
4	-0,948	1,35	-0,402	-0,402	0,503	0,76
5	0,36	-0,199	-0,16	0,50695	0,9602	0,7647
6	-0,00986	-0,1157	0,1256	0,50645	0,959	0,765
7	-0,051	0,08	-0,029	0,5059	0,96	0,768

Найденные управляющие воздействия позволяют уменьшить ошибку регулирования динамических объектов на 3%. При необходимости ошибки регулирования можно минимизировать путем дальнейшего итерационного поиска.

В заключение можно сказать, что разработанный алгоритм синтеза оптимален по критерию быстродействия дискретных систем управления многомерными динамическими объектами. Предлагаемый модифицированный метод, базирующийся на представлении дискретной системы в виде пространства переменных состояний и использования теоремы N-интервалов, даёт возможность получения точных расчетов, в том числе и по экономическим критериям. Сравнительный анализ полученных результатов с известными методами показал, что применение предложенного метода позволяет увеличить точность расчета управляющих воздействий на 10 % по сравнению с существующими методами и обеспечить уменьшение ошибки регулирования на 3%.

#### Литература

1. Горячев В., Чуприн А. Широтно-импульсный модулятор на цифровых логических элементах // Первая миля. -М., 2017. № 1 (62). С. 68-75.
2. Игамбердиев Х.З., Салахутдинов Р.Т., Сиддиков И.Х. Двухуровневая схема синтеза воздействий для многомерных систем // Межвузовский сборник научных трудов "Актуальные вопросы в области технических и фундаментальных наук". Вып. 4. -Ташкент: ТГТУ, 2000. С. 38-40.
3. Андрейчиков А.В., Андрейчикова. О.Н. Интеллектуальные информационные системы. - М.: Финансы и статистика, 2004. С.-424.
4. Воротников В.И., Румянцев В.В. Устойчивость и управления по части координат фазового вектора динамических систем: теория, методы и приложения. - М.: Научный мир, 2001. С. 127-195.
5. Aleksandrov A.Y., Aleksandrova E.B., Zabko A.P. Stability analysis for a class of nonlinear nonstationary systems via averaging // Nonlinear Dynamics and Systems Theory. 2013. V. 13. № 4. P. 332-343.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ

<b>Ш. Каюмов, А.Б. Каюмов.</b> Построение математической модели и разработки вычислительных алгоритмов решения трехмерной задачи вытеснения.....	3
<b>А.Олимов, А.Юлдашев, А. Файзиев.</b> Выбор пространства обобщенных функций для экспоненциальных лагранжианов.....	10

### ЭЛЕКТРОНИКА И АВТОМАТИКА, ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Х.З.Игамбердиев, У.Ф.Мамиров.</b> Регуляризованные алгоритмы идентификации неопределенных динамических объектов управления.....	16
<b>О.О.Зарипов, У.Ш.Хамрокулов.</b> Совершенствование интегрированной системы автоматизированного проектирования конструкторско-технологической подготовки аддитивного производства.....	21
<b>И.Х.Сиддиков, М.О.Атажонов.</b> Разработка алгоритма оптимального управления многомерными дискретными динамическими объектами по критерию быстродействия....	28
<b>Р.М.Алиев, М.М.Алиев.</b> Анализ метода контроля состояния путевого участка на высокоскоростной линии.....	35
<b>Н.М. Арипов, Ш.Ш. Камалетдинов.</b> Совершенствование грузовой и коммерческой работы в условиях применения электронного документооборота на железнодорожном транспорте Республики Узбекистан.....	39
<b>Г.Ш.Абидова.</b> Выбор типа используемого аналого-цифрового преобразователя для обработки сигналов на выходе адсорбционной установки.....	45
<b>Х.Н.Зайнидинов, Ф.Р.Нуржанов.</b> Обработка цифровых изображений лица методом Вейвлет.....	50
<b>Б.М.Ахмедов, А.А.Бегунов, Р.А.Ибрагимов, Ф.Ё.Худойкулов.</b> Решение задачи обеспечения единства измерений влажности газов.....	57

### ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

<b>Ш.Э.Бегматов.</b> Вторичный источник электропитания с высоким коэффициентом полезного действия.....	63
<b>Н.Т.Гашбоев, Э.Б.Сантов, Н.Р.Умирова, А.Г.Хазратов.</b> Сущность электрофизических параметров полупроводниковых материалов при преобразовании солнечной энергии в электроэнергию .....	67
<b>Н.О.Усмонов.</b> Анализ когенерации электрической и тепловой энергии на мини-ТЭЦ..	73
<b>К.С.Джураев, Ф.Т.Шадибекова, Х.Т.Усмонов.</b> Расчет параметров и режимов работы гидроаккумулирующей установки малой мощности.....	79

$$U_j(m) = 0, \quad j = \overline{1, M}, \quad m = \overline{1, L}. \quad (5)$$

На основе динамических моделей можно легко получить зависимости, связывающие выходные переменные объекта с его входными переменными для линейных импульсных систем. В случае нулевых начальных условий эти зависимости будут иметь вид:

$$Y_i(L+K) = \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^L U_j(m) * \omega_{ij}((L+K-m+1)*T), \quad i = \overline{1, N}, \quad K = \overline{0, C_i}, \quad (6)$$

где  $T$  - период дискретизации управляющего сигнала;  $\omega(qT)$  - значение весовой функции (реакции на импульс длительности  $T$ ) в  $q$ -м такте.

Совмещая систему выражений (6) с условиями (3), получим системы линейных алгебраических уравнений:

$$W * U = E, \quad (7)$$

где  $W$ - матрица коэффициентов весовых функций:

$$W = [\omega_{ij}(L+K-m+1)] \quad (8)$$

$U$  - вектор-столбец прогнозируемых значений ошибок:

$$U = [U_1(1), U_1(2), \dots, U_1(L), U_2(1), \dots, U_2(L), U_m(1), \dots, U_m(L)]^T \quad (9)$$

$E$ -вектор-столбец прогнозируемых значений ошибок:

$$\hat{A} = [\hat{A}_1(1), \hat{A}_1(2), \dots, \hat{A}_1(L), \hat{A}_2(1), \dots, \hat{A}_2(\tilde{N}_2+L), \hat{A}_n(L), \dots, E_n(C_i+L)]^T \quad (10)$$

$$\text{Размерность системы (7) равна: } M * L = \sum_{i=1}^N C_i \quad (11)$$

Решив систему линейных уравнений (7), получим искомые управляющие воздействия в виде линейных комбинаций прогнозируемых ошибок:

$$U_j(m) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{C_i} R_{im} \left( \sum_{s=1}^{i-1} C_s + K \right) * E_i(L+K), \quad (12)$$

где  $R_{im}$  - вектор - строка матрицы  $\omega^{-1}$ .

Подставляя в выражение (12) значения прогнозируемых ошибок в соответствии с изменяющимися на текущий момент начальными условиями, можно рассчитать числовые значения управляющих воздействий.

Полученное выражение (12) фактически является основной корректирующей процедурой при итеративном поиске управляющих воздействий, модулированных по ширине. Но прежде рассмотрим некоторые необходимые условия, выполнение которых должно обеспечить решение поставленной задачи. Во-первых, период повторения импульсов при широтно-импульсной модуляции должен быть равен периоду дискретизации управляющего сигнала при синтезе для линейной импульсной системы. Во-вторых, должно выполняться условие:

$$|U_j(m)| < A_j, \quad (13)$$

где  $A_j$  - амплитуда модулированных по ширине управляющих воздействий.