

**АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

- [11] Golinko I.M. Dinamichna model teplomasoobminnih protsesiv u kameri forsunochnogo zvolozhennya / I.M. Golinko, A.I. Kubrak, I.E. Galitska // Informatsiyi sistemi, mehanika ta keruvannya. 2014. № 11, S. 61–71.;
- [12] Golinko I.M. Kompleksna dinamichna model promislovogo konditsionera iz forsunochnim zvolozhuvachem u prostori stanu / I.M. Golinko, I.E. Galitska // Girotehnologiyi, navigatsiya, keruvannya ruhom i konstruyuvannya aviatsiyno;
- [13] kosmichnoyi tehniki: zbirka dopovidey Н Mizhnarodnoyi naukovо-praktichnoyi konferentsiyi, 16 - 17 kvitnya 2015 r., - Kiyiv, 2015. S. 201-207.;
- [14] Katalog. VENTUS – ventilyatsionnye agregaty i tsentralnye konditsioneryi. –M.: VTSGroup, 2003. –156 с.;
- [15] Kuo B. Teoriya i proektirovanie tsifrovyyh sistem upravleniya: per. s angl. –M.: Mashinostroenie, 1986. –448 s.;
- [16] Rey U. Metody upravleniya tehnologicheskimi protsessami / U. Rey. –M.: Mir, 1983. –368 s.;
- [17] Golinko I.M. Analiz sistemi keruvannya dlya promislovogo konditsionera iz parozvolozhuvachem / I.M. Golinko, V.G. Tregub // Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy. –2012, № 6/8(60). –S. 14–18.;
- [18] Krasnov Yu.S. Sistemyi ventilyatsii i konditsionirovaniya / Yu.S. Krasnov, A.P. Borisoglebskaya, A.V. Anti-pov. – M.: TermoKul, 2004. –373 s.

Отримано в редакцію: 09.01.2016 р./ Прийнято до друку: 11.01.2016 р./ Received by edition: 09.01.2016. Approved for the press: 11.01.2016

УДК 378.147:621.372.542/.544

## **АПРОКСИМАЦИЯ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ**

Linearization in a digital filter control characteristic problem for a specialized computer system

Ухина А.В.<sup>1</sup>, к.физ-мат.н., доц. Яценко Т.П.<sup>2</sup>, д.т.н., проф. Ситников В.С.<sup>3</sup> (Ukhina H.V., Yatsenko T.P., Sytnikov V.S.1)

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

<sup>1</sup>E-mail: [anyuta.uhina@inbox.ru](mailto:anyuta.uhina@inbox.ru)

<sup>2</sup>E-mail: [kuwtat@ukr.net](mailto:kuwtat@ukr.net)

<sup>3</sup>E-mail: [sitnvs@mail.ru](mailto:sitnvs@mail.ru)

Copyright © 2014 by author and the journal “Automation technological and business - processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### **Аннотация**

Определены зависимости, которые можно использовать для получения линейной характеристики управления АЧХ при аппроксимации характеристики. Показана возможность такого управления.

### **Abstract**

Определены зависимости, которые можно использовать для получения линейной характеристики управления



**АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

**АЧХ при аппроксимации характеристики. Показана возможность такого управления.**

**Ключевые слова**

**Аппроксимация, первичная обработка сигналов, метод «трубы», метод «веера», коэффициенты передаточной функции.**

**Введение**

Специализированные компьютерные системы (СКС) активно внедряются в различные сферы жизнедеятельности человека. Они предназначены для сбора и обработки информации от датчиков, принятия решения и выработки управляющего воздействия на объект управления или соответствующие механизмы. Для повышения эффективности подобных систем необходимо управлять характеристиками перестраиваемых частотно-зависимых компонент. Например, в большинстве СКС имеются компоненты предварительной обработки и фильтрации входных сигналов, в состав которых наиболее часто входят цифровые фильтры. Для этой цели чаще всего рекомендуется использовать полиномиальные цифровые фильтры, отличительной особенностью которых является плоская амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) в полосе пропускания. К их числу относятся известные фильтры Бесселя, Баттерворта и Чебышева второго рода [1-3].

За счет изменения коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции возможно как комплексное, так и раздельное управление характеристиками фильтра [4]. Однако в большинстве случаев для повышения их эффективности и плавного управления необходима линейная характеристика управления АЧХ устройства фильтрации. Обычно фильтры высокого порядка реализуются за счет соединения фильтров низкого порядка для обеспечения независимой перестройки характеристик.

**Изложение**

Анализ влияния коэффициентов передаточной функции цифрового фильтра на АЧХ проведен по передаточной функции первого порядка

$$H(z) = \frac{a_0 \pm a_1 z^{-1}}{1 + b z^{-1}}, \quad (1)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b$  – соответственно действительные коэффициенты числителя и знаменателя,  $\pm$  – в числителе соответствуют НЧ (+) и ВЧ (-).

Для фильтров первого порядка коэффициенты числителя в общем случае равны ( $|a_0|=|a_1|$ ) и являются коэффициентом усиления  $k=|a_0|=|a_1|$ . Тогда передаточную функцию (1) для фильтра нижних частот (НЧ) можно записать в виде:

$$H(z) = k \frac{1 \pm z^{-1}}{1 + b z^{-1}} \quad (2)$$

Из (2) следует, что линейное управление АЧХ возможно коэффициентом усиления  $k$  за счет изменения коэффициентов числителя, что характерно для адаптивных фильтров. Однако, для уменьшения влияния шума на полезную составляющую сигнала при обработке необходима перестройка частоты среза фильтра.

В работах [4, 5] показаны возможные пути перестройки АЧХ НЧ и ВЧ, а также трудности перестройки, вызванные тем, что коэффициенты числителя и знаменателя нелинейно зависят от частоты.

Для линеаризации характеристики управления АЧХ необходимо знание рабочего диапазона управления и заданной точности линеаризации. В большинстве случаев при высокой точности линеаризации диапазон управления разбивается на участки линейного управления, т.е. осуществляется кусочно-линейная аппроксимация. Полученная, таким образом, система линейных уравнений с ограничениями используется СКС для перестройки АЧХ цифрового фильтра.

Следует отметить, что при управлении цифровым фильтром необходимо осуществлять перестройку частоты среза с целью уменьшения влияния помех на полезную составляющую входного сигнала. В работе [5] получена зависимость нормированной частоты среза  $\overline{\omega}_c$  НЧ в зависимости от коэффициента  $b$  знаменателя передаточной функции фильтра Чебышева второго рода и уровня пульсаций в полосе задержания RS (в dB), рис. 1



**АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

$$\bar{\omega}_c = \arccos \left( - \frac{1 - 2c^2 \frac{1+b^2}{(1+b)^2}}{1 - 4c^2 \frac{b}{(1+b)^2}} \right), \quad (3)$$

где  $c^2 = \frac{1}{\sqrt{10^{0.1RS}}}$ ,  $\bar{\omega}_c = 2\pi \frac{f}{f_d}$ ,  $\bar{\omega}_c \in [0, \pi]$ ,  $f$ ,  $f_d$  – соответственно текущая линейная частота и частота дискретизации.

В работе [5] для аппроксимации приведенных зависимостей разработан алгоритм, который основан на Чебышевской аппроксимации [6]. На основе анализа характера аппроксимируемой зависимости алгоритм выбирает направление аппроксимации либо с начала кривой, либо с ее конца.

Наиболее важным участком алгоритма аппроксимации считается блок, в котором происходит определение граничной точки между двумя участками аппроксимации. На каждой итерации происходит смещение конечной точки участка аппроксимации на одну позицию и заполнение матрицы размером  $N \times N$  (где  $N$  – количество точек, на которое разбивается участок, аппроксимируемой кривой) строками, каждая из которых содержит массивы точек для первого участка. Затем осуществляется пересчет коэффициента знаменателя  $b$  и нормированной частоты среза  $\bar{\omega}_c$ , с целью получения расчетной погрешности и ее сравнения со значением заданной погрешности. Однако данный алгоритм обладает рядом недостатков: сложностью вычислений, большим объемом занимаемой памяти, относительно длительным временем выполнения.

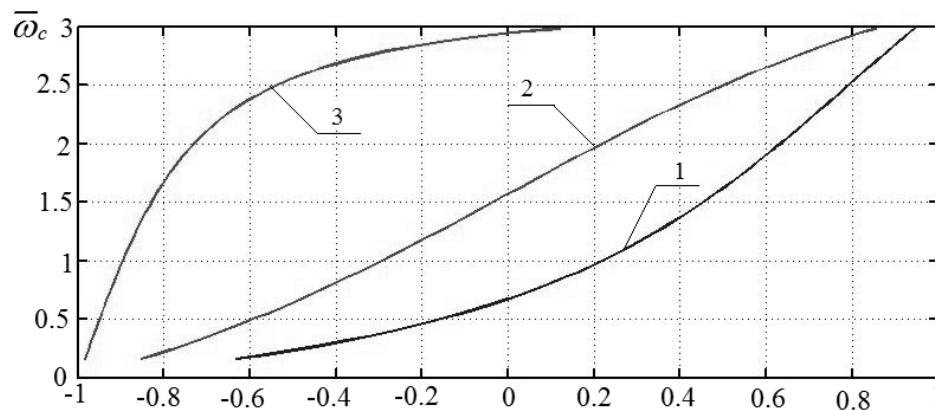


Рис. 1 – График зависимости частоты среза фильтра  $\bar{\omega}_c$  от коэффициента  $b$  знаменателя передаточной функции фильтра Чебышева второго рода при уровнях пульсаций в полосе задержания  $RS = 0,05$  dB (1); 3 dB (2); 20 dB (3)

Поэтому возникла необходимость рассмотреть алгоритмы аппроксимации, которые позволят упростить алгоритм аппроксимации и объем вычисления, а чтобы ускорить процесс получения линейных участков управления в зависимости от заданной погрешности.

В соответствии с Чебышевской аппроксимацией кривая на участке аппроксимации должна находиться внутри “трубы”, рис. 2.



**АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

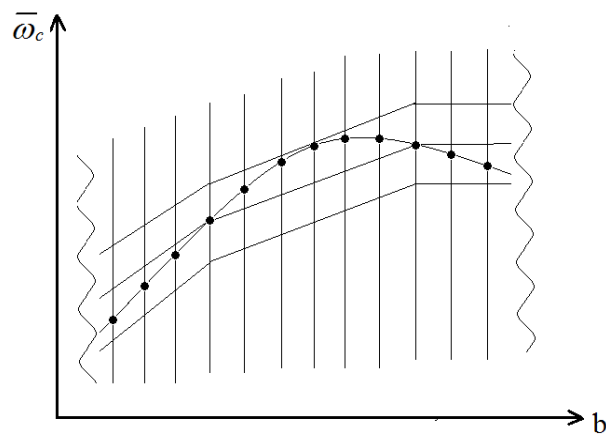


Рис. 2 – Графическое пояснение к Чебышевской аппроксимации по методу “трубы”

В этом случае можно указать границы “трубы” на участке аппроксимации и сравнивать значения исходной кривой с границами “трубы”, заменяя вычисления значений сравнением текущего значения с границами “трубы”. Тогда возникает задача вычисления границ “трубы”. Для этого нет необходимости анализировать характер аппроксимируемой зависимости, а начиная с первой точки строить аппроксимирующую прямую к последующим точкам. Последовательность действий в этом случае может быть такой.

На первом этапе между первой точкой участка аппроксимации и  $n$ -ой точкой строится прямая линия. На величину погрешности “трубы” определяется верхняя и нижняя ее границы.

Следует отметить, что может быть два пути определение границ. Первый путь – вычисления верхней и нижней границы по тем же крайним точкам участка. Второй – прибавления к найденной прямой величину погрешности “трубы”. Отметим, что относительная погрешность “вычислительного” пути от “найденного” может достигать до 1%.

На втором этапе осуществляется сравнение текущих значений с границами “трубы”. Если текущие значения находятся внутри “трубы” то берется следующее  $n+1$ -ое значение и процесс повторяется пока текущее значение кривой не превысит границы “трубы”. В этом случае процесс аппроксимации останавливается. Делается переход назад на одну точку (от  $n+1$  к  $n$ ) и осуществляется пересчет параметров аппроксимирующего участка.

Погрешность аппроксимации на участках показана на рис. 3, при заданной относительной погрешности  $\delta = 0.01$ . Алгоритм процесса аппроксимации по этому методу приведен на рис. 4.

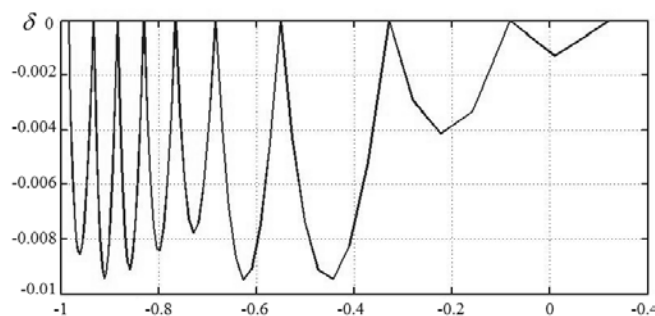


Рис. 3 – Зависимость относительной погрешности аппроксимации  $\delta$  по методу “трубы” от коэффициента  $b$  знаменателя передаточной функции фильтра Чебышева второго рода при уровне пульсации в полосе задержания  $RS=20$  dB



АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

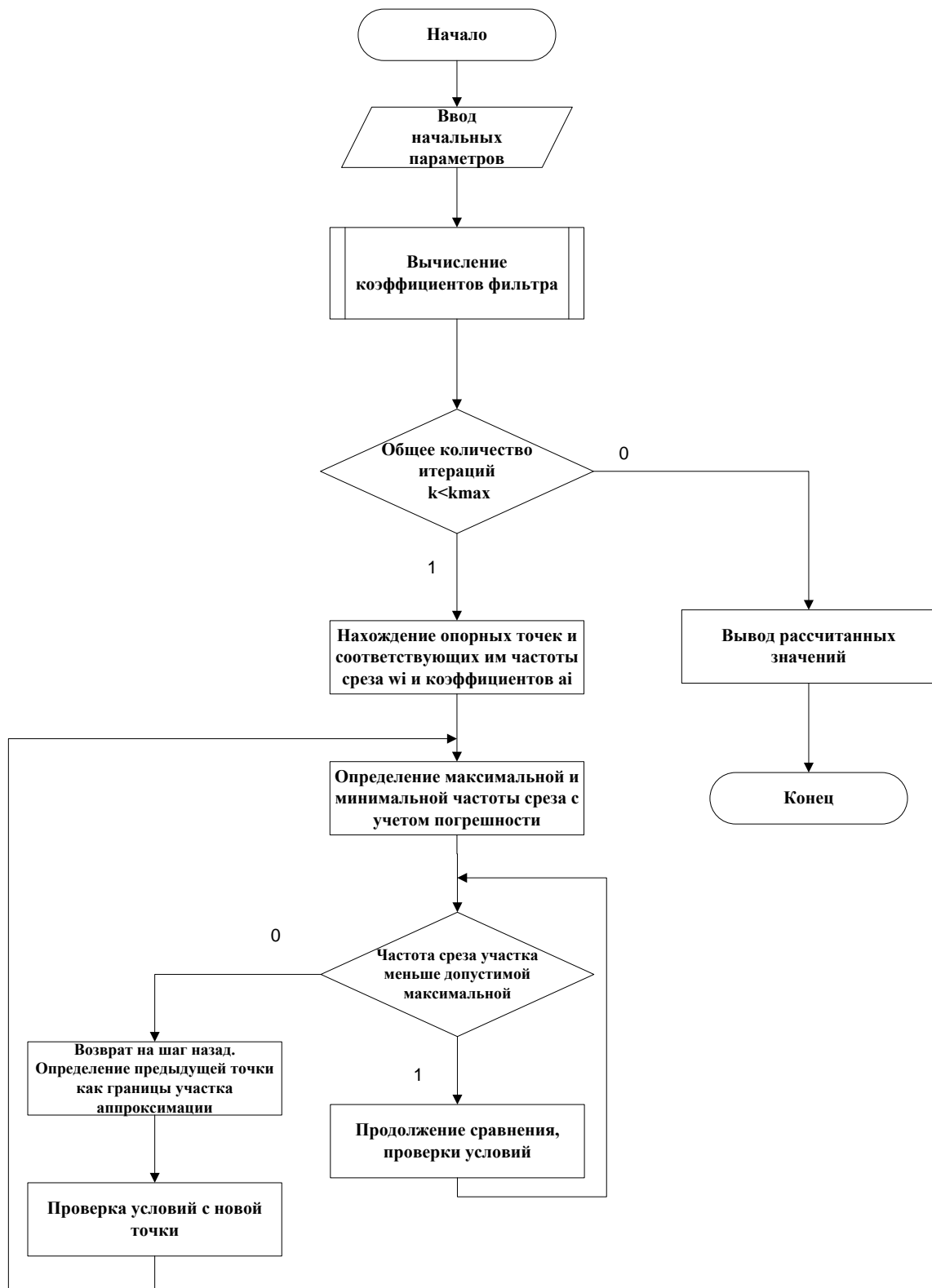


Рис. 4 – Алгоритм аппроксимации зависимости частоты среза фильтра от коэффициента  $b$  знаменателя передаточной функции фильтра Чебышева второго рода по методу “трубы”



**АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

В итоге аппроксимации получена система уравнений вида  $y(k) = a_0 \cdot x(k) + b_0$ ,

$$\begin{cases} \bar{\omega}_c = 9.8820 \cdot b + 0.1571, & -0.9843 < b \leq -0.9326, \\ \bar{\omega}_c = 8.8745 \cdot b + 0.6676, & -0.9326 < b \leq -0.8840, \\ \bar{\omega}_c = 7.2745 \cdot b + 1.0996, & -0.8840 < b \leq -0.8300, \\ \bar{\omega}_c = 5.4879 \cdot b + 1.4923, & -0.8300 < b \leq -0.7656, \\ \bar{\omega}_c = 3.8254 \cdot b + 1.8457, & -0.7656 < b \leq -0.6835, \\ \bar{\omega}_c = 2.3645 \cdot b + 2.1598, & -0.6835 < b \leq -0.5506, \\ \bar{\omega}_c = 1.2387 \cdot b + 2.4740, & -0.5506 < b \leq -0.3287, \\ \bar{\omega}_c = 0.6357 \cdot b + 2.7489, & -0.3287 < b \leq -0.0816, \\ \bar{\omega}_c = 0.3864 \cdot b + 2.9060, & -0.0816 < b \leq +0.1217, \end{cases} \quad (4)$$

В данном методе приходится дополнительно вычислять границы трубы и проверять попадания в нее текущих значений заданной кривой. Однако можно пойти другим путем, когда по ходу анализа вычисляются значения заданной относительной погрешности аппроксимирующих значений прямой и текущих значений кривой (метод “веера”).

На первом этапе по этому методу также как и в предыдущем между первой точкой участка аппроксимации и  $n$ -ой точкой строится прямая линия.

На втором этапе осуществляется вычисление относительной погрешности между значениями этой прямой и текущими значениями кривой. Если текущие значения имеют относительную погрешность меньше или равную заданной, то берется следующее  $n+1$ -ое значение и процесс повторяется пока для текущего значения кривой относительная погрешность будет больше заданной.

В этом случае процесс аппроксимации останавливается. Делается переход назад на одну точку (от  $n+1$  к  $n$ ), осуществляется пересчет параметров аппроксимирующего участка. Погрешность аппроксимации на участках показана на рис. 5. Алгоритм процесса аппроксимации по методу “веера” показан на рис. 6.

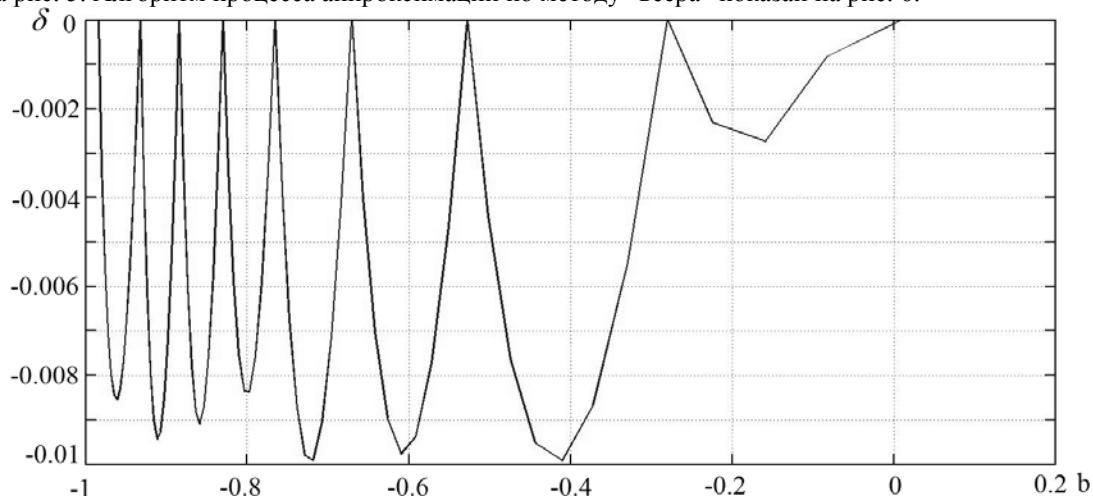


Рис. 5 – Зависимость относительной погрешности аппроксимации  $\delta$  по методу “веера” от коэффициента  $b$  знаменателя передаточной функции фильтра Чебышева второго рода при уровне пульсации в полосе задержания  $RS=20$  dB



## АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

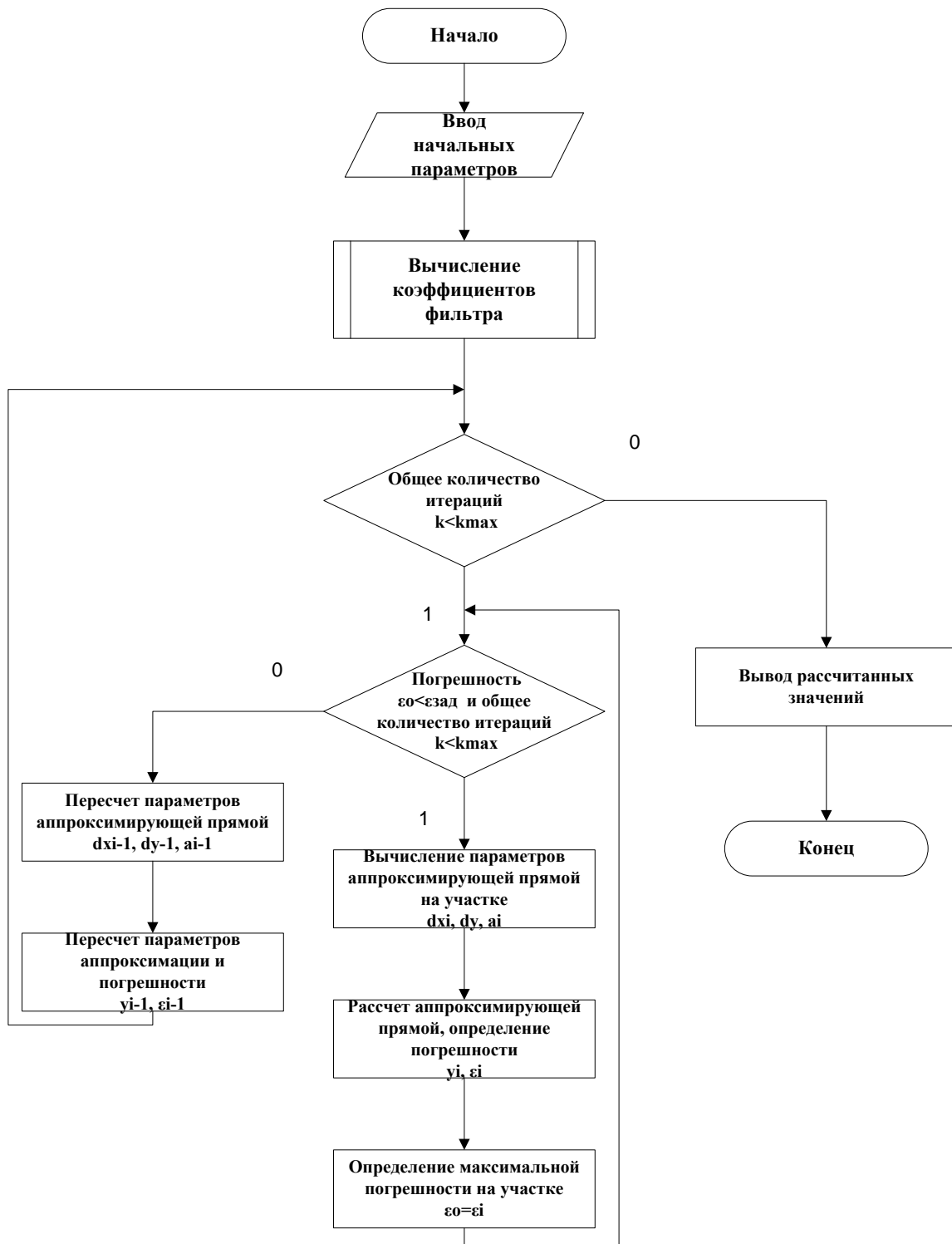


Рис. 6 – Алгоритм аппроксимации зависимости частоты среза  $\overline{\omega_c}$  фильтра от коэффициента  $b$  знаменателя передаточной функции фильтра Чебышева второго рода по методу “веера”



**АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

В итоге аппроксимации получена система уравнений аналогичная (1)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bar{\omega}_c = 9.8820 \cdot b + 0.1571, & -0.9843 < b \leq -0.9326, \\ \bar{\omega}_c = 8.8745 \cdot b + 0.6676, & -0.9326 < b \leq -0.8840, \\ \bar{\omega}_c = 7.2745 \cdot b + 1.0996, & -0.8840 < b \leq -0.8300, \\ \bar{\omega}_c = 5.4879 \cdot b + 1.4923, & -0.8300 < b \leq -0.7656, \\ \bar{\omega}_c = 3.7168 \cdot b + 1.8457, & -0.7656 < b \leq -0.6705, \\ \bar{\omega}_c = 2.1972 \cdot b + 2.1991, & -0.6705 < b \leq -0.5275, \\ \bar{\omega}_c = 1.1095 \cdot b + 2.5133, & -0.5275 < b \leq -0.2798, \\ \bar{\omega}_c = 0.5826 \cdot b + 2.7882, & -0.2798 < b \leq +0.0101, \\ \bar{\omega}_c = 0.3520 \cdot b + 2.9452, & +0.0101 < b \leq +0.1217, \end{array} \right. \quad (5)$$

Сравнивая полученные результаты аппроксимации зависимости частоты среза фильтра  $\bar{\omega}_c$  от коэффициента  $b$  знаменателя передаточной функции фильтра Чебышева второго рода при уровнях пульсаций в полосе задержания  $RS = 20$  dB можно отметить, что с точностью до погрешности вычислений эти методы дают одинаковые результаты. Отличие начинается с пятой строки систем линейных уравнений (4) и (5), где сказываются вычислительные погрешности.

За счет оптимизации второго алгоритма можно упростить вычисления и ускорить процесс нахождения системы линейных уравнений при заданной погрешности аппроксимации  $\delta$ .

На рис. 7 представлены АЧХ, построенные по формуле и аппроксимированным значениям коэффициентов  $k$  и  $b$  фильтра. Для уменьшения погрешности необходимо увеличить количество участков аппроксимации для достижения заданной точности воспроизведения АЧХ при ее перестройке.

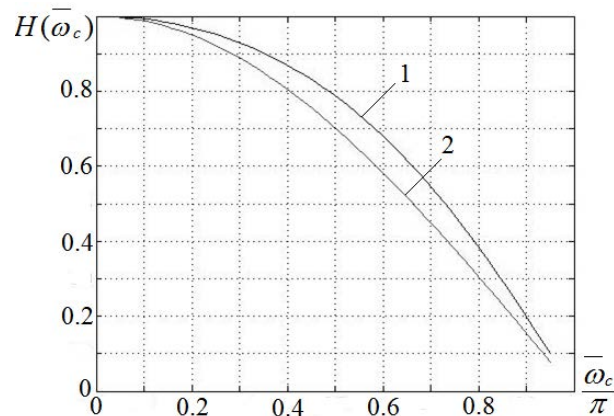


Рис. 7 – Графики АЧХ построенные по формуле (1) и аппроксимированным (2) значениям коэффициентов  $k$  и  $b$  фильтра

#### Заключение

Таким образом, в результате аппроксимации получены системы линейных уравнений, описывающие характеристику управления, кроме того показана возможность такого управления.



**АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ****Литература**

- [1] Illiev G. Efficient design of adaptive complex narrowband IIR filters / Illiev G., Nikolova Z., Stoyanov G., Egiazarian K. / XII European Signal Processing Conference “EUSIPCO-2004” / 6-10 Sept., 2004, Vienna, Austria – p.p. 1597-1600.;
- [2] Устройство адаптивной фильтрации речевых сигналов “Золушка-микро-3” [http://speetech.by/manuals/manual\\_zolushka\\_micro3.pdf](http://speetech.by/manuals/manual_zolushka_micro3.pdf);
- [3] Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко — СПб.: Питер, 2006. — 751 с.;
- [4] Букашкин С.А. Справочник по расчету и проектированию ARC-схем; Под ред. А.А. Ланне — / С.А. Букашкин, В.П.Власов, Б. Змий и др. М. Радио и связь, 1984. — 368 с.;
- [5] Дикусар Е.В. Аппроксимация характеристики управления полиномиальной компонентой первого порядка / Е.В. Дикусар, А.А. Швец, Г.А.Грицкевич// Праці одеськ.політехн. ун-та – 2011 – Вип.1(35) – С. 141-146.;
- [6] Литовченко Н.М. Анализ критериев аппроксимации амплитудно-частотной характеристики устройства / Н.М. Литовченко, В.С. Ситников, А.В. Яковлев // Холодильна техніка і технологія. — 2006. — № 1(99). — С. 86—88.;

**References**

- [1] Illiev G. Efficient design of adaptive complex narrowband IIR filters / Illiev G., Nikolova Z., Stoyanov G., Egiazarian K. / XII European Signal Processing Conference “EUSIPCO-2004” / 6-10 Sept., 2004, Vienna, Austria – p.p. 1597-1600.;
- [2] Ustroistvo adaptivnoi fil'tratsii rechevykh signalov “Zolushka-mikro-3” [http://speetech.by/manuals/manual\\_zolushka\\_micro3.pdf](http://speetech.by/manuals/manual_zolushka_micro3.pdf);
- [3] Sergienko A.B. Tsyfrovaia obrabotka signalov / A.B. Sergienko – SPB.: Piter, 2006. – 751 s.;
- [4] Bukashkin S.A. Spravochnik po raschetu i proektirovaniu ARC-skhem; Pod. red. A.A. Lanne - / S.A. Bukashkin, V.P. Vlasov, B.F. Zmii i dr. M. Radio I sviaz', 1984. – 368 s.;
- [5] Dikusar E.V. Approksimatsiia kharakteristiki upravleniia polynomial'noi komponentoi pervogo poriadka / E.V. Dikusar, A.A. Shvets, G.A. Gritskevich // Pratsi odes'k.politekhn.un-ta – 2011 – Vyp.1(35) – S. 144-146.;
- [6] Litovchenko N.M. Analiz kriteriev approksimatsii amplitudno-chastotnoi kharakteristiki ustroistva / N.M. litovchenko, V.S. Sitnikov, A.V. Iakovlev // Kholodyl'na tekhnika i tekhnologiia. – 2006. - №1(99)ю – S. 86-88.

Отримано в редакцію: 26.01.2016 р./ Прийнято до друку: 28.01.2016 р./ Received by edition: 26.01.2016. Approved for the press: 28.01.2016

УДК 004.9; 519.816

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ АНАЛІЗУ КАР'ЄРНОГО РОЗВИТКУ ТА ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО АТЕСТАЦІЇ РОЗРОБНИКІВ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

**Водолазкіна К.О., аспірантка<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

Copyright © 2014 by author and the journal “Automation technological and business - processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

