

АНОТАЦІЯ

Ухіна Г.В. Моделі та методи підвищення ефективності частотно-залежних компонент комп'ютерних систем. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2020.

У вступі розглядаються системи, в яких виникає задача використання компонент комп'ютерних систем, які можуть комплексно або роздільно перебудовувати свої характеристики програмно-апаратними засобами в залежності від умов функціонування для підвищення ефективності системи. Наприклад, в безпілотних літальних апаратах (БПЛА) є системи визначення безпечної висоти при посадці, а у наземних платформ - пристрої визначення відстані до перешкоди. Також у двигунів внутрішнього згоряння сучасних автомобілів такі компоненти використовуються для визначення детонації у двигуні.

Однак, в розглянутих комп'ютерних системах, які функціонують в реальному часі, існуючі підходи мають обмеження по часу перебудови і не є оперативними, що має вплив на ефективність системи. Тому, має місце протиріччя між ефективністю компонентів системи при перебудові та оперативністю його реалізації.

Основною причиною виникнення зазначеного протиріччя є використання складних методів перебудови з великими обчислювальними витратами. В дисертаційній роботі пропонується новий підхід до розв'язання цього протиріччя за рахунок побудови нових моделей та методу перебудови зі зменшеними обчислювальними витратами.

Тому завдання побудови компонент комп'ютерних систем, які можуть комплексно або роздільно перебудовувати свої характеристики програмно-апаратними засобами в залежності від умов функціонування є актуальною.

Також для підвищення ефективності частотно-залежних компонент (ЧЗК) необхідно розробити методи перебудови, оцінки стійкості та тривалості перехідного процесу зі зменшеними обчислювальними витратами.

Ефективність компонент комп'ютерних систем визначається як зменшення обчислювальних витрат (ОВ) при перебудові у зв'язку з тим, що подібні системи працюють в реальному часі при обмежених обчислювальних ресурсах і обмеженому енергоживленні.

У першому розділі розглядаються існуючі моделі ЧЗК, методи їх перебудови, методи оцінки стійкості та тривалості перехідного процесу. Підраховуються обчислювальні витрати на їх реалізацію. Виявлено, що:

1. Методи, алгоритми і процедури прямих методів перебудови, при частотному перетворенні виявляються значно складними для обчислення в реальному часі.

2. При застосуванні перетворення частоти сигналу є необхідність усунення непотрібної копії спектра, а також фільтрації так званого дзеркального каналу, а це додаткові апаратні або програмні витрати. Для усунення перерахованих частот можна використовувати керований ФНЧ або ФВЧ з октавною зміною частоти зрізу, що, однак, вимагає додаткових обчислювальних витрат.

3. На реалізацію розглянутих методів необхідна велика кількість операцій, а отже вони мають великі обчислювальні витрати, що ускладнює їх використання у системах реального часу.

Виходячи з цього виникає необхідність розробки методу перебудови частотно-залежних компонент комп'ютерних систем зі зменшеними обчислювальними витратами, що дає можливість підвищити ефективність ЧЗК.

У другому розділі проведено аналіз передавальних функцій і частотних характеристик ЧЗК першого і другого порядків Баттерворта, Чебишева, Чебишева інверсного і еліптичного, який показав, що:

1. Амплітудно-частотні і фазочастотні характеристики ФНЧ і ФВЧ першого порядку різних типів мають приблизно однакові характеристики. Істотні зміни в характеристиках проявляються в другому порядку.

2. Амплітудно-частотні і фазочастотні характеристики СФ і РФ першого порядку, які описуються передавальними функціями другого порядку різних типів, мають приблизно однакові характеристики. Істотні зміни в характеристиках проявляються в другому порядку при описі передавальної функції четвертого порядку.

3. Для передавальних функцій першого порядку ФНЧ і ФВЧ характерна рівність коефіцієнтів чисельника $|a_0| = |a_1|$, але для ФНЧ $a_0 = a_1$, а для ФВЧ $a_0 = -a_1$.

4. Для передавальних функцій другого порядку ФНЧ та ФВЧ коефіцієнти чисельника дорівнюють один одному $a_0 = a_2$, а коефіцієнт a_1 може приймати різні значення.

5. Така ж картина виявляється для СФ і РФ першого порядку, коли коефіцієнти чисельника рівні $a_0 = a_2$, коефіцієнт a_1 для СФ дорівнює нулю $a_1 = 0$, а для РФ має різні значення $a_1 \geq 0$.

В результаті аналізу передавальних функцій і частотних характеристик ЧЗК першого і другого порядків складені конкретні математичні моделі компонент, які враховують особливості їх частотних характеристик, що дозволяє структурувати їх передавальні функції. Таке уявлення математичних моделей дозволяє перейти до розрахунку коефіцієнтів передавальної функції при заданій частоті зрізу або смузі частот зі зменшеними обчислювальними витратами.

Таким чином, виконано друге завдання дисертаційного дослідження, розроблення нових математичних моделей ЧЗК першого і другого порядків, які відображають частотні характеристики компонент.

Можна сформулювати перший пункт наукової новизни:

Вперше побудовані математичні моделі частотно-залежних компонент, які, на відміну від існуючих, враховують особливості їх частотних характеристик, що дозволяє запропонувати методи перебудови зі зменшеними обчислювальними витратами на підставі знаходження коефіцієнтів передавальних функцій по заданих частотах зрізу.

У третьому розділі отримані розрахункові формули коефіцієнтів передавальних функцій, на основі нових математичних моделей. Це дозволяє вказати, що побудова каналів обробки і фільтрації сигналів в комп'ютерній системі доцільно будувати на основі поєднання ЧЗК низького порядку для кращої перебудови і керованості цих компонент. В цьому випадку можна різко зменшити обчислювальні витрати для перерахунку коефіцієнтів компонент та перебудовувати всі компоненти одночасно або по частинах.

Якщо порівняти розрахункові формули для ФНЧ і ФВЧ, то рекомендується СФ і РФ побудувати за рахунок послідовного з'єднання цих ФНЧ і ФВЧ. У цьому випадку деякі коефіцієнти підходять і до ФНЧ, і до ФВЧ, що дозволяє в умовах реального часу зменшити обчислювальні витрати для знаходження нових коефіцієнтів.

- Для ФНЧ

$$\begin{cases} b_2 = \frac{\sqrt{2} - \sin \bar{\omega}_c}{\sqrt{2} + \sin \bar{\omega}_c}, \\ b_1 = -(1 + b_2) \cos(\bar{\omega}_c), \\ a_0 = \frac{(1 + b_2)}{2} \sin^2 \frac{\bar{\omega}_c}{2}, \\ a_1 = 2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

- Для ФВЧ

$$\begin{cases} b_2 = \frac{\sqrt{2} - \sin \bar{\omega}_c}{\sqrt{2} + \sin \bar{\omega}_c}, \\ b_1 = -(1 + b_2) \cos\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right), \\ a_0 = \frac{(1 + b_2)}{2} \cos^2 \frac{\bar{\omega}_c}{2}, \\ a_1 = -2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

Проведено дослідження ФЧХ компонент, яке показало, що є залежність частоти зрізу від рівня коливальності c компоненти. Складність цих залежностей призвело до необхідності функціональної апроксимації з технічною похибкою, що задовольняє при реалізації

$$\varphi = -\pi thx = -\pi \left[\frac{x \left[(1 + 0.1666x^2) + 0.008x^4 (1 + 0.0241x^2) \right]}{(1 + 0.5x^2) + 0.0417x^4 (1 + 0.0335x^2)} \right]$$

В результаті проведених розрахунків ЧЗК низького порядку отримані формули розрахунку коефіцієнтів передавальних функцій зі зменшеними обчислювальними витратами за рахунок перетворення «констант» або додаткової величини.

Наприклад, рівняння для знаходження коефіцієнту займенника передавальної функції ФНЧ першого порядку має вигляд

$$b = - \left\{ 1 - \frac{2c^2 \sin^2 \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)}{c^2 - \cos^2 \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)} \left(1 - \frac{\cos \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)} \sqrt{\frac{1 - c^2}{c^2}} \right) \right\},$$

а після введення додаткової величини $\xi = 2 \arccos(c)$, $0 < c < 1$ можна записати

$$b = \frac{\sin \left(\frac{\bar{\omega}_c - \xi}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\bar{\omega}_c + \xi}{2} \right)}.$$

Рівняння для знаходження коефіцієнтів передавальної функції ФНЧ другого порядку типу Чебишева мають вигляд

$$\begin{cases} b_2 = \frac{2\sqrt{1+\phi^2} + (1 + \cos(\overline{\omega}_c)) - \phi \sin(\overline{\omega}_c)}{2\sqrt{1+\phi^2} + (1 + \cos(\overline{\omega}_c)) + \phi \sin(\overline{\omega}_c)}, \\ b_1 = -\left[(1 + b_2) \cos(\overline{\omega}_c) + \frac{(1 - b_2)}{\phi} \sin(\overline{\omega}_c) \right], \\ a_0 = \frac{cP}{4} \left[(1 + b_2) (1 - \cos(\overline{\omega}_c)) - \frac{(1 - b_2)}{\phi} \sin(\overline{\omega}_c) \right], \\ a_1 = 2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

Доцільно $\phi, \frac{1}{\phi}, 2\sqrt{1+\phi^2}$ та cP віднести до констант, їх заздалегідь (на етапі проектування і реалізації) розрахувати і записати в пам'ять. Якщо для цих величин ввести нові позначення

$$A = \phi, B = \frac{1}{\phi}, D = 2\sqrt{1+\phi^2}, E = \frac{cP}{4},$$

то ці рівняння приймуть вигляд

$$\begin{cases} b_2 = \frac{D + (1 + \cos(\overline{\omega}_c)) - A \sin(\overline{\omega}_c)}{D + (1 + \cos(\overline{\omega}_c)) + A \sin(\overline{\omega}_c)}, \\ b_1 = -\left[(1 + b_2) \cos(\overline{\omega}_c) + B(1 - b_2) \sin(\overline{\omega}_c) \right], \\ a_0 = E \left[(1 + b_2) (1 - \cos(\overline{\omega}_c)) - B(1 - b_2) \sin(\overline{\omega}_c) \right] = E \left[(1 + b_2) + b_1 \right], \\ a_1 = 2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

Таким чином, виконано третє завдання дисертаційного дослідження, розроблення методу перебудови зі зменшеними обчислювальними витратами.

Можна сформулювати другий пункт наукової новизни:

Розроблено метод перебудови зі зменшеними обчислювальними витратами за рахунок перетворення «констант» або додаткової величини, що дозволило

отримати аналітичні вирази для коефіцієнтів передавальних функцій компонент.

У четвертому розділі проведено аналіз стійкості, розрядності подання коефіцієнтів і перехідного процесу при перебудові ЧЗК. Дослідження показало, що при проектуванні подібних ЧЗК необхідно враховувати ці показники в залежності від діапазону перебудови і типу ЧЗК.

Дослідження стійкості для оцінки меж зміни коефіцієнтів ЧЗК вище другого порядку показало, що необхідно на основі формули

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

визначити граничні значення коефіцієнтів характеристичного рівняння і помножити їх на коригувальні коефіцієнти, які визначаються в дисертаційному дослідженні. Отримані значення - це межі стійкості компоненти при зміні коефіцієнтів знаменника. Це значно полегшує оцінку стійкості при перебудові коефіцієнтів передавальної функції компоненти.

Дослідження зміни розрядності подання коефіцієнтів знаменника ЧЗК другого порядку показало, що можливий вихід за межі стійкості, це обумовлює необхідність перевірки стійкості ЧЗК при заданій розрядності подання коефіцієнтів і заданому діапазоні перебудови коефіцієнтів.

При дослідженні перехідних процесів при перебудові ЧЗК отримані співвідношення, які дозволяють оцінити верхню межу перехідного процесу в залежності від відносної частоти зрізу і порядку ЧЗК.

$$N = \frac{a}{2} \cdot \frac{1 + \sqrt{b_2}}{1 - \sqrt{b_2}} + b,$$

де a і b - дійсні числа ($1 < a < 3$; $2 < b < 4$), β - модуль комплексного кореня або модуль дійсного кореня, $0 < \beta < 1$.

У результаті проведених досліджень на стійкість ЧЗК вище другого порядку отримані співвідношення, що дозволяють з мінімальними обчислювальними витратами оцінити стійкість ЧЗК при перебудові.

Таким чином, виконане четверте завдання дисертаційного дослідження, розроблення методу оцінки стійкості зі зменшеними обчислювальними витратами.

Можна сформулювати третій пункт наукової новизни:

Одержало подальший розвиток метод оцінки стійкості зі зменшеними обчислювальними витратами для ЧЗК вище другого порядку на підставі методу Джурі за рахунок складання рівнянь з парних і непарних ступенів характеристичного рівняння передавальної функції, а також коефіцієнтів, які коригують межі трикутника стійкості, що дозволило скоротити час оцінки стійкості.

В результаті проведених досліджень перехідного процесу при перебудові ЧЗК оцінена верхня межа перехідного процесу.

Таким чином, виконана п'ята задача дисертаційного дослідження, розроблення методу оцінки тривалості перехідного процесу при перебудові зі зменшеними обчислювальними витратами.

Можна сформулювати четвертий пункт наукової новизни:

Одержало подальший розвиток метод оцінки тривалості перехідного процесу зі зменшеними обчислювальними витратами для ЧЗК низького порядку за рахунок використання коефіцієнтів передавальної функції при перебудові, що дозволяє спростити процедуру оцінки тривалості перехідного процесу.

У п'ятому розділі проведена оцінка ОВ отриманих результатів. Порахована кількість операцій для реалізації перебудови компоненти, оцінки стійкості та тривалості перехідного процесу, отримані результати порівняні з існуючими методами. Для оцінки було обрано IntelQuark X1000 400 МГц, результати показані в табл.1.

Обчислювальні витрати оцінки стійкості удосконаленого методу на 43% менше ніж за методом Джурі, а удосконаленого методу оцінки тривалості перехідного процесу - на 28%.

Таблиця 1. Обчислювальні витрати (ОВ)

Метод	ЧЗК	Порядок	Тип	ОВ
Заміна змінної	ФНЧ/ФВЧ	перший		75
		другий		140
	СФ/РФ	перший		140
Удосконалений	ФНЧ/ФВЧ	перший		65
		другий	Баттерворта	69
			Чебишева	93
			Чебишева ін.	96
	еліптичний	96		
СФ/РФ	перший		114/125	

Отримані результати перевірені експериментально з використанням Intel NUC. Виходячи з отриманих результатів впливає, що вдосконалений метод на 27% ефективніший для ФНЧ і ФВЧ першого порядку, на 29% - для ФНЧ і ФВЧ другого порядку і на 13% - для СФ і РФ.

Таким чином, мета дисертаційного дослідження досягнута і виконано шосте завдання, проведення експериментального дослідження розроблених методів для оцінки обчислювальних витрат.

Ключові слова: перебудова частотно-залежного компонента, стійкість системи, коефіцієнти передавальної функції, частотні характеристики, частота зрізу, рівень пульсації, перехідний процес, обчислювальні витрати.

ABSTRACT

Ukhina H.V. Models and methods to increase the frequency-dependent components efficiency of computer systems. - Qualifying scientific work on the manuscript.

Thesis for the PhD degree in specialty 123 – Computer Engineering. – Odesa National Polytechnic University, Odesa, 2020.

The introduction considers systems in which there is a problem of using computer systems components that can comprehensively or separately restructure their

characteristics by software and hardware depending on the operating conditions to improve system efficiency. For example, unmanned aerial vehicles (UAVs) have systems for determining safe landing heights, and ground platforms have devices for determining the distance to an obstacle. Also in the internal combustion engines of modern cars, such components are used to determine the detonation in the engine.

However, in the considered computer systems, which operate in real time, the existing approaches have time constraints, which has an impact on system efficiency.

Therefore, the task of computer systems components building that can comprehensively or separately restructure their characteristics by software and hardware, depending on the operating conditions is relevant. Also, to increase the frequency-dependent components (FDC) efficiency, it is necessary to develop methods for tuning, assessing the stability and duration of the transition process with reduced computational costs.

The computer system components efficiency is defined as the reduction of computing costs in the restructuring due to the fact that such systems operate in real time with limited computing resources and limited power

The first section considers the existing FDC models, their restructuring methods, assessing the stability and duration of the transition process methods. The computational costs for their implementation are calculated. It was found that:

1. Methods, algorithms and direct methods procedures of tuning, frequency conversion are much more difficult to calculate in real time.

2. When applying signal frequency conversion, there is a need to eliminate unnecessary copy of the spectrum, as well as filtering the so-called mirror channel, and this is an additional hardware or software cost. To eliminate these frequencies, you can use a controlled LP or HP with an octave change in the cutoff frequency, which, however, requires additional computational costs.

3. The implementation of these methods requires a large number of operations, and therefore they have high computational costs, which complicates their use in real-time systems.

Based on this, there is a need to develop the restructuring the frequency-dependent components method with reduced computing costs, which makes it possible to increase the FDC efficiency.

In the second section the transfer functions and FDC frequency characteristics of the Butterworth, Chebyshev, Chebyshev inverse and elliptical first and second orders analysis is carried out. The analysis is showed that:

1. The amplitude-frequency and phase responses of different types first-order LP and HP have approximately the same characteristics. Significant changes in characteristics are manifested in the second order.

2. The amplitude-frequency and phase responses of different types first order BP and SP, which are described by the second order transfer functions, have approximately the same characteristics. Significant changes in the characteristics are manifested in the second order when describing the fourth order transfer function.

3. For the LP and HP first-order transfer functions, the numerator coefficients are equal $|a_0| = |a_1|$, but for LP is $a_0 = a_1$ and for HP is $a_0 = -a_1$.

4. For the LP and HP second-order transfer functions, the numerator coefficients are equal $a_0 = a_2$, and the coefficient a_1 can take different values.

5. The same picture is found for the BP and SP first order, when the numerator coefficients are equal $a_0 = a_2$, the coefficient a_1 for BP is zero $a_1 = 0$, and for SP has different values $a_1 \geq 0$.

As a result, the components specific mathematical models were obtained, which take into account the peculiarities of their frequency characteristics, which allows to structure their transfer functions.

Thus, the thesis research second task, the developing of new first- and second-order FDC mathematical models, which reflect the components frequency characteristics, is completed.

We can formulate the first point of scientific novelty:

For the first time the frequency-dependent components mathematical models are constructed, which, in contrast to the existing ones, take into account the

peculiarities of their frequency characteristics, which allows to offer tuning methods with reduced computational costs based on finding the transfer function coefficients at given cutoff frequencies.

In the third section, the transfer functions coefficients calculation formulas are obtained, based on new mathematical models. This allows us to indicate that the channels construction for processing and filtering signals in a computer system should be built on the combination of low-order FDC for better components adjustment and controllability. In this case, you can dramatically reduce the computational cost to recalculate the components coefficients and rebuild all the components simultaneously or in parts.

If we compare the calculation formulas for LP and HP, it is recommended to build BP and SP by sequential connection of these LP and HP. In this case, some coefficients are suitable for both LP and HP, which allows in real time to reduce the computational costs to find new coefficients.

- LP

$$\begin{cases} b_2 = \frac{\sqrt{2} - \sin \bar{\omega}_c}{\sqrt{2} + \sin \bar{\omega}_c}, \\ b_1 = -(1 + b_2) \cos(\bar{\omega}_c), \\ a_0 = \frac{(1 + b_2)}{2} \sin^2 \frac{\bar{\omega}_c}{2}, \\ a_1 = 2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

- HP

$$\begin{cases} b_2 = \frac{\sqrt{2} - \sin \bar{\omega}_c}{\sqrt{2} + \sin \bar{\omega}_c}, \\ b_1 = -(1 + b_2) \cos(\bar{\omega}_c), \\ a_0 = \frac{(1 + b_2)}{2} \cos^2 \frac{\bar{\omega}_c}{2}, \\ a_1 = -2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

The components phase response study showed that there is the cutoff frequency dependence on the level of component oscillation. The dependencies complexity has led to the need for functional approximation with a technical error that satisfies the implementation

$$\varphi = -\pi thx = -\pi \left[\frac{x \left[\left(1 + 0.1666x^2\right) + 0.008x^4 \left(1 + 0.0241x^2\right) \right]}{\left(1 + 0.5x^2\right) + 0.0417x^4 \left(1 + 0.0335x^2\right)} \right]$$

As a result, the formulas for calculating the transfer functions coefficients with reduced computational costs due to the "constants" conversion or an additional value are obtained.

For example, the equation for finding the coefficient of the LP first-order transfer function pronoun has the form

$$b = - \left\{ 1 - \frac{2c^2 \sin^2 \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)}{c^2 - \cos^2 \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)} \left(1 - \frac{\cos \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\bar{\omega}_c}{2} \right)} \sqrt{\frac{1-c^2}{c^2}} \right) \right\},$$

and after the additional value introduction $\xi = 2 \arccos(c)$, $0 < c < 1$ we can write

$$b = \frac{\sin \left(\frac{\bar{\omega}_c - \xi}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\bar{\omega}_c + \xi}{2} \right)}.$$

The equations for finding the Chebyshev type LP second-order transfer function coefficients have the form

$$\begin{cases} b_2 = \frac{2\sqrt{1+\phi^2} + (1 + \cos(\bar{\omega}_c)) - \phi \sin(\bar{\omega}_c)}{2\sqrt{1+\phi^2} + (1 + \cos(\bar{\omega}_c)) + \phi \sin(\bar{\omega}_c)}, \\ b_1 = - \left[(1 + b_2) \cos(\bar{\omega}_c) + \frac{(1 - b_2)}{\phi} \sin(\bar{\omega}_c) \right], \\ a_0 = \frac{c\phi}{4} \left[(1 + b_2) (1 - \cos(\bar{\omega}_c)) - \frac{(1 - b_2)}{\phi} \sin(\bar{\omega}_c) \right], \\ a_1 = 2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

It is advisable the values $\phi, \frac{1}{\phi}, 2\sqrt{1+\phi^2}$ and cp refer to constants, calculate them in advance (at the design and implementation stage) and write them down in memory. If you enter new notations for these values

$$A = \phi, B = \frac{1}{\phi}, D = 2\sqrt{1+\phi^2}, E = \frac{cp}{4},$$

then these equations will take the form

$$\begin{cases} b_2 = \frac{D + (1 + \cos(\overline{\omega_c})) - A \sin(\overline{\omega_c})}{D + (1 + \cos(\overline{\omega_c})) + A \sin(\overline{\omega_c})}, \\ b_1 = -\left[(1 + b_2) \cos(\overline{\omega_c}) + B(1 - b_2) \sin(\overline{\omega_c}) \right], \\ a_0 = E \left[(1 + b_2) (1 - \cos(\overline{\omega_c})) - B(1 - b_2) \sin(\overline{\omega_c}) \right] = E \left[(1 + b_2) + b_1 \right], \\ a_1 = 2a_0, \\ a_2 = a_0. \end{cases}$$

Thus, the thesis research third task, the development of the restructuring with reduced computational costs method is completed.

We can formulate the second point of scientific novelty:

The adjustment method with reduced computational costs due to the "constants" conversion or an additional value was developed, which allowed to obtain analytical expressions for the transfer functions coefficients.

The fourth section analyzes the stability, coefficients bit representation and the transition process during the FDC restructuring. The study showed that when designing such FDCs, it is necessary to take into account these indicators depending on the adjustment range and the FDC type.

The stability study to estimate the change limits in the FDC coefficients above the second order showed that it is necessary on the basis of

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

to determine the characteristic equation coefficients limit values and multiply them by the correction factors that are determined in the thesis research. The

obtained values are the limits of the components stability when the denominator coefficients change. This greatly facilitates the stability assessment when adjusting the transfer function coefficients.

The study of the second order denominator coefficients change in the bit representation showed that it is possible to go beyond stability, this necessitates checking the FDC stability at a given coefficients bit representation and a given coefficients range.

In the FDC transients during the restructuring study relations are obtained that allow us to estimate the transient process upper limit depending on the relative cutoff frequency and the FDC order.

$$N = \frac{a}{2} \cdot \frac{1 + \sqrt{b_2}}{1 - \sqrt{b_2}} + b,$$

where a and b are real numbers ($1 < a < 3; 2 < b < 4$), β is complex root module or real root module, $0 < \beta < 1$.

As a result, the conducted researches on above the second order FDC stability the relations allowing to estimate FDC stability at adjustment with the minimum computing expenses are received.

Thus, the thesis research performed fourth task, development of a method for assessing stability with reduced computational costs is completed.

We can formulate the third point of scientific novelty:

The stability estimation with reduced computational costs method for FDC above the second order was further developed on the Jury method basis by compiling equations from even and odd degrees of the transfer function characteristic equation, as well as coefficients that adjust the stability triangle, which reduced stability estimation time.

As a result, the transient process during the FDC restructuring research, the transient process upper limit was estimated.

Thus, the thesis research fifth task, the development of the transient process estimation method at reorganization with the reduced computing expenses is executed.

We can formulate the fourth point of scientific novelty:

The estimating the transition process duration with reduced computational costs method for low-order FDC due to the use of the transfer function coefficients during the restructuring has been further developed, which simplifies the procedure for estimating the transition process duration.

In the fifth section, the obtained results evaluation is evaluated. The operations number for the component restructuring implementation, the stability assessment and the transition process duration, the results are compared with existing methods. IntelQuark X1000 400 MHz was selected for evaluation; the results are shown in table 1.

The estimating stability improved method computational cost is 43% less than the Jury method, and the advanced method of estimating the transition process duration is 28% less.

The obtained results were tested experimentally using Intel NUC. Based on the obtained results, it follows that the improved method is 27% more effective for first-order LP and HP, 29% - for second –order LP and HP and 13% - for BP and SP.

Thus, the thesis research purpose is achieved and the sixth task is performed, conducting an experimental study of the developed methods for estimating computational costs.

Keywords: the frequency-dependent component restructuring, system stability, transmission function coefficients, frequency characteristics, cutoff frequency, ripple level, transient process, computational costs.

Table 1. Computational costs (CC)

Method	FDC	Order	Type	CC
Variable replacement	LP/HP	first		75
		second		140
	BP/SP	first		140
Improved method	LP/HP	first		65
		second	Butterworth	69
			Chebichev	93

			Chebyshev inv.	96
			elliptic	96
	BP/SP	first		114/125

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Ухина А.В., Ситников Т.В., Ситников В.С. Введение и применение динамической составляющей датчиков в специализированной компьютерной системе. *Журнал “Автоматизация технологических и бизнес - процессов” (АТБП), ОНАПТ.* Т. 7, Вып. 1. 2015. С. 52-54. Видання входить до міжнародних наукометричних баз Directory of Open Access Journals, Scilit, EBSCOhost, Ulrich's Periodicals Directory, ROAD, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, Бібліометрика української науки, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, CrossRef, Национальная библиотека Украины имени Вернадского, URAN.

2. Ухина А.В., Яценко Т.П., Ситников В.С. Аппроксимация в задаче управления характеристикой цифрового фильтра для специализированной компьютерной системы. *Журнал “Автоматизация технологических и бизнес - процессов” (АТБП), ОНАПТ.* Т. 8, Вып. 1. 2016. С. 42-50. Видання входить до міжнародних наукометричних баз Directory of Open Access Journals, Scilit, EBSCOhost, Ulrich's Periodicals Directory, ROAD, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, Бібліометрика української науки, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, CrossRef, Национальная библиотека Украины имени Вернадского, URAN.

3. Ухина А.В., Биленко А.А., Ситников В.С. Повышение эффективности программно-технических комплексов в АСУ ТП АЭС. *Журнал «Ядерная и радиационная безопасность».* Вып. 3. 2016. С. 70-76. Видання входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, **Scopus**, International Nuclear

Information System (INIS), Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського.

4. Ухина А.В., Яценко Т.П., Ситников В.С. Линеаризация в задаче управления характеристикой цифрового фильтра для специализированной компьютерной системы. Журнал «Автоматизация технологических и бизнес-процессов». Т.8, Вып. 4. 2016. С. 8-10. Видання входить до міжнародних наукометричних баз Directory of Open Access Journals, Scilit, EBSCOhost, Ulrich's Periodicals Directory, ROAD, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, Бібліометрика української науки, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, CrossRef, Національная библиотека Украины имени Вернадского, URAN.

5. Ukhina H., Sytnikov V. Express-analysis of stability of fourth order frequency-dependent rearrangeable components. *International Conference on Electronics and Information Technology, EIT 2016 - Conference Proceedings (Ukraine)*. 2016. P. 84-86. Видання входить до міжнародних наукометричних баз **Scopus, IEEE Xplore**.

6. Ухина А. Анализ передаточных функций цифровых частотно-зависимых компонент низкого порядка. Журнал “Автоматизация технологических и бизнес - процессов” (АТБП), ОНАПТ. Т. 9, Вып. 2. 2017. С. 12-20. Видання входить до міжнародних наукометричних баз Directory of Open Access Journals, Scilit, EBSCOhost, Ulrich's Periodicals Directory, ROAD, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, Бібліометрика української науки, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, CrossRef, Національная библиотека Украины имени Вернадского, URAN.

7. Ukhina H.V., Bilenko A.A., Sytnikov V.S. Adjustable components in automated control systems of NPP technological processes. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. №3. 2018. С. 8 -14. Видання входить до міжнародних наукометричних баз Academic Resource Index, ResearchBib, BASE, Crossref, Citefactor, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Наукова періодика України.

8. Ukhina H., Sytnikov V. Transient process at low-order frequency dependent digital components. *Журнал «Радиоэлектроника, информатика, управление», Запорожье*. Вып. 3. 2018. С. 40-47. Видання входить до міжнародних наукометричних баз **Web of Science (WoS)**.

9. H. Ukhina, V. Sytnikov., K. Puts. Stability evaluation based on the sustainability triangle application for transfer functions above 2nd order. *Журнал «Сучасні інформаційні системи», Харків*. Т.2, №4. 2018. С. 49-54. Видання входить до міжнародних наукометричних баз Google Scholar Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського.

10. Ухина А.В., Теплечук А.М., Кірьязов Ю.Ф., Ситников В.С. Управління смуговим частотно-залежним компонентом інформаційно-управляючою системою для усунення детонації двигуна внутришнього згорання. *Информационные управляющие системы и технологии. Проблемы и решения: монография / авт. кол.: В. Вамянин, Г. Востров, В. Вычужанин и др.; под науч. ред. проф. В. Вычужанина. Одесса: Экология. 2019. С. 137-142.*

Опубліковані праці апробаційного характеру

11. Ukhina H., Sytnikov V., Streltsov O., Stupen P., Yakovlev D. Transfer Function Coefficients Influence on the Processing Path Bandpass Frequency-Dependent Components' Amplitude-Frequency Characteristics Properties at the NPP TP ACS. *Conference Proceedings of 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2019 (United Kingdom)*. 2019. С. 293-196. Видання входить до міжнародних наукометричних баз **Scopus, IEEE Xplore**.

12. Ukhina H., Sytnikov V., Streltsov O., Stupen P., Yakovlev D. Specialized computer systems digital bandpass frequency-dependent components rearrangement. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2019 (France)*. 2019. P. 168-171. Видання входить до міжнародних наукометричних баз **Scopus, DBLP**.

13. Ukhina H., Sytnikov V., Streltsov O., Stupen P., Yakovlev D. Stability evaluation based on the sustainability triangle application for transfer functions above 2nd order. *ACM International Conference Proceeding Series (China)*. 2019. P.113-117. *Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Ei Compendex.*

14. Ukhina H., Sytnikov V., Stupen P., Strelcov O., Yakovleva I. Signal Processing in the Restructuring of a Computer System Bandpass Frequency-Dependent Component to Eliminate the Internal Combustion Engine Detonation. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2019 – Proceedings. No.6*. 2019. P. 1-5. *Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore.*

15. Ukhina H., Sytnikov V., Streltsov O., Stupen P., Yakovlev D. Improving the data processing efficiency based on tunable hard- and software components. *Part of the Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies book series. LNDECT, v. 48*. P. 91-106. *Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus.*

16. Hanna Ukhina, Ludmila Zhyvtsova, Valerii Sytnikov, Volodymyr Kudria, Pavel Stupen. Improving the efficiency of information control system for the drilling objects' spatial orientation parameters control. *The 4 World Conference on Smart Trends in Systems, Security & Sustainability (WorldS4 2020)*. London 2020. P. 86-91. *Видання входить до міжнародних наукометричних баз IEEE Xplore.*

17. Ukhina H., Ivan Afanasyev, Sytnikov V., Streltsov O., Stupen P. Features of Mobile Platforms' Equipment Second Order Digital Frequency-Dependent Components Phase-Frequency Response at Tuning. 8. *European conference on renewable energy systems*. Istanbul – Turkey. 2020. P. 256-263 *Видання входить до міжнародних наукометричних баз Science Citation (SCI), E-SCI, Scopus, EBSCO.*