

ЭСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Голощанов С. С., к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: goloschapov46@gmail.com

При разработке сложной измерительной системы часто бывает необходимым оценить ее динамические параметры с целью определения быстродействия, что является особо актуальным при создании автоматических средств измерения. При этом подобные структуры часто имеют в своем составе усилители или аттенюаторы, управляемые напряжением, которые фактически осуществляют операцию умножения сигналов. С целью применения структур, используемых в теории автоматического управления (ТАУ), такие элементы заменяются на сумматоры логарифмов с последующим потенцированием. Для линеаризации операций логарифмирования и потенцирования их приближенно представляют как операции вычитания и сложения линейных функций. Аналогичным способом выражаются и другие нелинейные операции измерительных звеньев. Полученные структуры представляются как схемы ТАУ с последующим составлением их передаточных функций, на основе которых определяется переходная характеристика системы в целом. В качестве примера применения приведенного метода рассматривается схема измерителя емкости варикапов на основе емкостного делителя с пространственным разделением каналов измерения, содержащая генератор высокой частоты, емкостной делитель, в состав которого включен измеряемый варикап, управляемый усилитель, два канала измерения, каждый из которых содержит усилитель высокой частоты и детектор, вычитающее устройство, устройство сравнения, источник опорного напряжения. Один из каналов измерения охвачен отрицательной обратной связью, второй содержит вычитающее устройство, благодаря которому на его выходе формируется сигнал, пропорциональный измеряемой емкости. Показано, как можно рассчитать быстродействие приведенной схемы при скачкообразном изменении напряжения смещения, подаваемого на измеряемый варикап через элемент развязки. Предложенный метод приближенного вычисления быстродействия измерительных систем достаточно прост и эффективен и позволяет значительно упростить определение динамических параметров не только измерительных, но и систем управления, содержащих звенья, которые осуществляют операции умножения или деления сигналов.

Ключевые слова: измерительная система, управляемый усилитель, передаточная функция, переходная характеристика.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.075-082

Вступление. При разработке и проектировании сложной измерительной системы часто бывает необходимым оценить ее динамические параметры с целью определения быстродействия, что является особо актуальным при создании автоматических средств измерения. Примером такой системы может служить схема измерителя емкости на основе емкостного делителя с пространственным разделением каналов измерения [1, 2], содержащая в себе интегрирующие цепи, обладающие запаздыванием, и каскад, охваченный отрицательной обратной связью.

Поскольку к настоящему времени не существует единой методики определения динамических параметров подобных систем, на вооружение приходится брать методы, используемые в других смежных отраслях науки и техники.

Наиболее применимой для изучения динамики процессов следует считать теорию автоматического управления (ТАУ) [3, 4]. Однако методы классической теории ТАУ в своих структурных схемах оперируют, в основном, сумматорами и двухполосниками с различными статическими и динамическими характеристиками [5, 6]. При этом отсутствуют перемножающие элементы – такие, как часто встречающиеся в измерительной технике, усилители с управляемым коэффициентом усиления [7, 8, 9] или управляемые делители сигналов [10, 11]. Последние тоже можно рассматривать как управляемые усилители с коэффициентом передачи $k_n < 1$. В таких усилителях операцию умножения сигналов можно заменить операцией сложения логарифмов этих сигналов с последующим потенцированием.

Однако указанные операции являются нелинейными, что значительно усложняет расчет быстродействия, поэтому с целью преобразования рассматриваемой системы в линейную, операции умножения и деления можно заменить приближенными линейными функциями:

$$e^x \approx x+1; \quad \ln x \approx x-1. \quad (1)$$

Действительно, разложение показательной и логарифмической функции в степенной ряд дает [12]:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots; \quad \ln x = -1 + x - \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \dots,$$

откуда, ограничиваясь первыми двумя членами приведенных рядов, получаем выражения (1).

Аналогичным способом можно представить и другие нелинейные операции измерительных звеньев.

Целью статьи является разработка оперативного метода приближенной оценки быстродействия сложных измерительных систем на основе преобразования измерительных структур с множительными элементами для получения типов звеньев, используемых в ТАУ.

Основная часть. В случае, если все звенья схемы удастся линеаризовать (с некоторыми допущениями), руководствуясь принципом суперпозиции, единицу в выражениях (1) можно опустить и тогда операцию умножения можно приближенно представить как операцию сложения, а операцию деления – как операцию вычитания.

Далее, используя приемы и методы преобразования схем в ТАУ и зная передаточные функции отдельных элементов и звеньев схемы, определяют передаточную функцию системы в целом, по которой можно найти ее переходную характеристику.

Как пример реализации рассмотрим уже упомянутую схему (рис. 1) измерения емкости на основе емкостного делителя с пространственным разделением каналов [1, 2]. При этом в качестве измеряемой емкости C_x используется полупроводниковая емкость (варикап), управляемая от источника напряжения смещения (на схеме не показан).

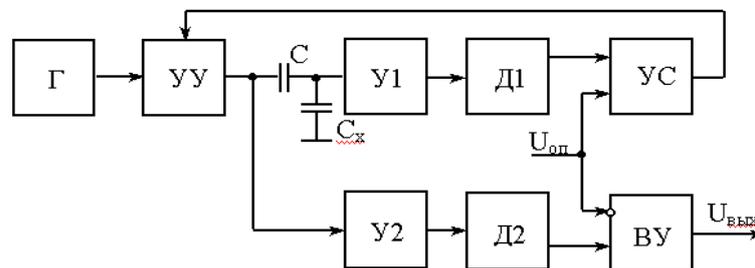


Рисунок 1 – Измеритель емкости с емкостным делителем и пространственным разделением каналов:

Г – генератор высокой частоты; УУ – управляемый усилитель; У1, У2 – усилители высокой частоты; Д1, Д2 – детекторы; ВУ – вычитающее устройство; УС – устройство сравнения, $U_{оп}$ – опорное напряжение

В этой схеме между генератором высокой частоты и делителем включен управляемый усилитель, коэффициент усиления которого пропорционален управляющему напряжению. Поскольку схема охвачена обратной связью, будет справедливо равенство

$$U_z k_y \frac{C}{C + C_x} k_{y1} = U_{on}, \quad (2)$$

где U_g – напряжение генератора Г, k_y – коэффициент усиления управляемого усилителя УУ, C – величина емкости делителя С, C_x – емкость испытуемого варикапа, k_{y1} – коэффициент передачи усилителя У1 и детектора Д1.

Поскольку вход второго усилителя У2 подключен к выходу УУ, на выходе детектора Д2 получим:

$$U_{Д2} = U_g k_y k_{y2},$$

где k_{y2} – коэффициент передачи усилителя У2 и детектора Д2.

С учетом (2):

$$U_{Д2} = U_{on} \frac{C + C_x}{C} \cdot \frac{k_{y2}}{k_{y1}}.$$

Примем $k_{y1} = k_{y2}$.

Тогда на выходе вычитающего блока ВУ получим:

$$U_{вых} = U_{Д2} - U_{on} = U_{on} \frac{C_x}{C},$$

сигнал, пропорциональный измеряемой емкости, поскольку все остальные величины, входящие в полученное выражение – постоянные.

Рассмотрим, как изменяется выходной сигнал во времени при скачкообразном изменении управляющего напряжения смещения. При этом все остальные параметры схемы (напряжение высокочастотного генератора, опорное напряжение) будем считать постоянными. Также считаем, что все звенья схемы можно линеаризировать. Тогда с учетом сказанного и цепи напряжения смещения с измеряемым варикапом схема примет вид (рис.2).

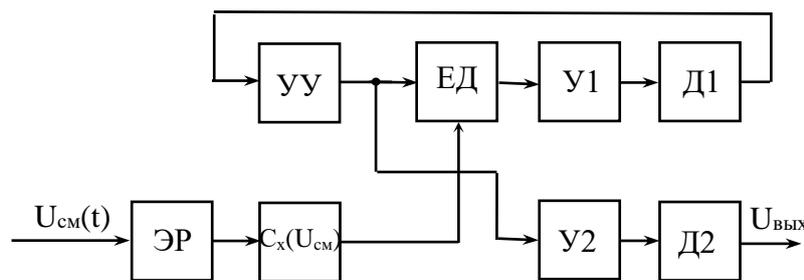


Рисунок 2 – Схема анализа переходного процесса при входном воздействии напряжением смещения:

УУ – управляемый усилитель, ЕД – емкостной делитель; У1, У2 – усилители; Д1, Д2 – детекторы; ЭР – элементы развязки по цепи смещения; $C_x(U_{см})$ – функциональная зависимость емкости варикапа от напряжения смещения (вольтфарадная характеристика)

Учитывая, что коэффициент передачи емкостного делителя $k_{ЕД} = \frac{1}{1 + \frac{C_x}{C}}$,

представим полученное выражение в виде $\frac{1}{1+x}$, разлагая которое в степенной ряд [12] и

ограничиваясь первыми двумя членами ряда, получаем $k_{ЕД} \approx 1 - \frac{C_x}{C}$.

Функциональную зависимость $C_x = f(U_{см})$ приближенно выразим в виде зависимости $C_x \approx \frac{A}{U_{см}}$, где A – постоянная величина.

С учетом этого схема примет вид (рис. 3):

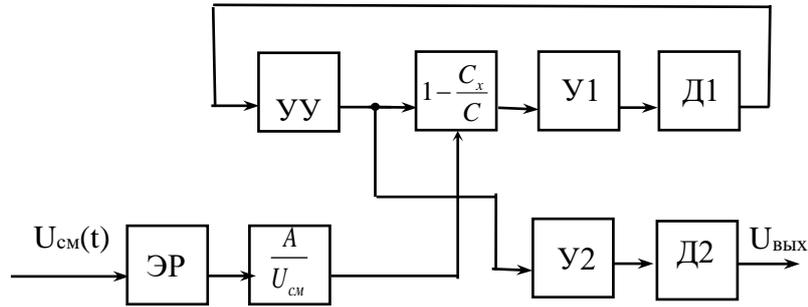


Рисунок 3 – Структурная схема с учетом коэффициента передачи емкостного делителя и зависимости емкости варикапа от напряжения смещения

Адаптируя приведенную схему под структуры ТАУ, получим (рис. 4):

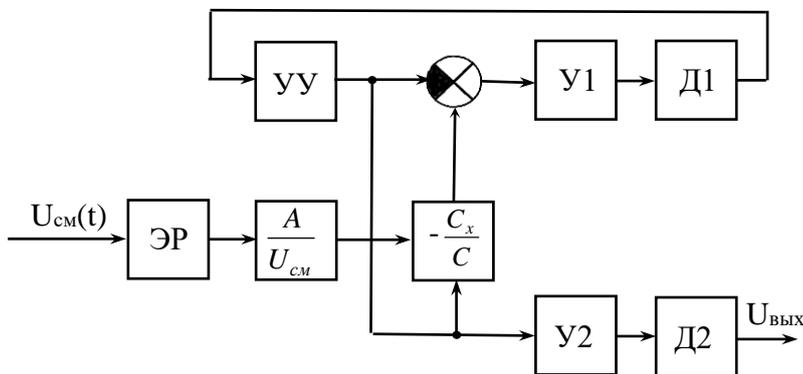


Рисунок 4 – Схема, адаптированная под структуры ТАУ

Заменяя операции умножения (деления) на сложение (вычитание) логарифмов с последующим потенцированием, получаем.

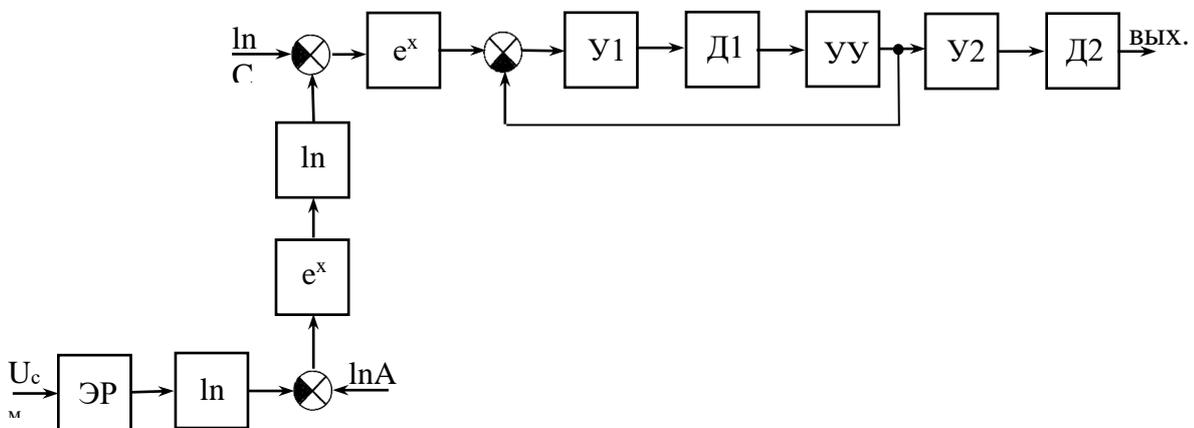


Рисунок 5 – Замена операций умножения (деления) на сложение (вычитание) логарифмов

Заменим логарифмирование и потенцирование их приближенными функциями.

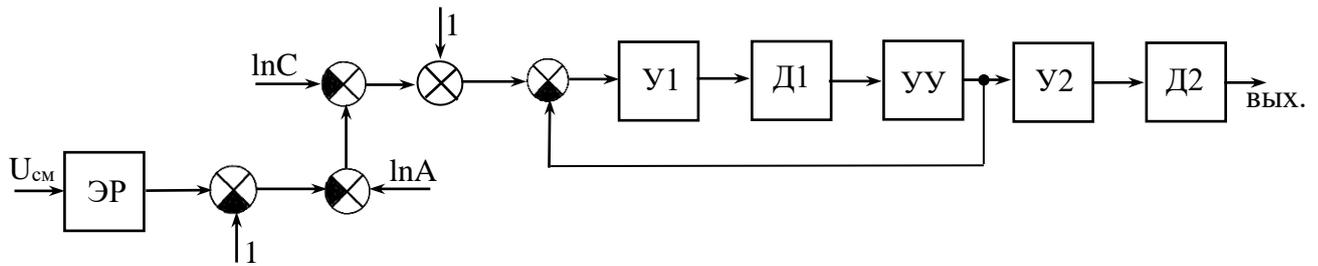


Рисунок 6 – Замена операций логарифмирования (потенцирования) их приближенными функциями

Поскольку все звенья, входящие в схему, представляют собой линейные функции, входящие постоянные величины можно опустить. С учетом этого имеем:

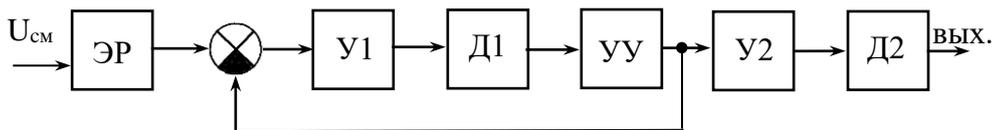


Рисунок 7 – Результирующая схема замещения

Пусть $W_1(p)$ – передаточная функция канала У1-Д1; $W_2(p)$ – передаточная функция канала У2-Д2; $W_p(p)$ – передаточная функция цепи развязки, k_y и k_{oc} – соответственно передаточные коэффициенты управляемого усилителя УУ и канала обратной связи – безинерционных звеньев. Тогда общая передаточная функция схемы равна

$$W(p) \approx W_p(p) \frac{W_1(p)k_y}{1 + W_1(p)k_y k_{oc}} W_2(p). \quad (3)$$

Цепь развязки (RC-цепь), детекторы Д1 и Д2 представим в виде аperiodических звеньев с передаточными функциями

$$W_p(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1}, \quad W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \quad W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (4)$$

где k_p, k_1, k_2 – коэффициенты передачи цепи развязки, первого и второго детекторов соответственно; T_p, T_1, T_2 – постоянные времени этих же звеньев.

В случае измерения на частоте 1 МГц постоянные времени T_1 и T_2 детекторов Д1 и Д2 измеряются долями миллисекунд. Поэтому подставив (4) в (3), пренебрегая членами высшего порядка малости и полагая для простоты $k_y = k_{oc} = 1$, где k_{oc} – коэффициент обратной связи, получим:

$$W(p) \approx \frac{k_p}{T_p p + 1} \cdot \frac{0,5k_1}{0,5T_1 p + 1} \cdot \frac{k_2}{T_2 p + 1}. \quad (4)$$

Анализ полученного выражения приводит к выводу, что рассматриваемая измерительная система ведет себя как реальное интегрирующее звено с постоянной времени:

$$T \approx T_p + 0,5T_1 + T_2. \quad (4)$$

Выводы. Рассмотренный метод приближенного вычисления быстродействия измерительной системы достаточно прост и эффективен и может использоваться для оперативной оценки быстродействия на стадии проектирования и оптимизации параметров системы в целом. Приведенная методика использования приемов ТАУ в случае применения в схемах усилителей с управляемым коэффициентом усиления или аттенюаторов позволяет значительно упростить вычисление быстродействия не только измерительных, но и любых других систем, содержащих звенья, которые осуществляют операции умножения и (или) деления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голощапов С. С. Измерение емкости методом емкостного делителя. *Электрический журнал*. Запоріжжя : Науково-виробниче підприємство «Альфа-Омега», 2000. №2(12). С.23–26.
2. Патент 10410 Україна. МПК G01R 27/26 (2006/01) / Пристрій для контролю параметрів варикапів: заявник і власник патенту Херсонський національний технічний університет. № u200503868; заявл. 22.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. №11.
3. Исаев Е. А., Чернецкая И. Е. *Основы теории автоматического управления* : учебное пособие для практической подготовке на судах кадетов-электромехаников. Херсон : ХГМА, 2013. 252 с.
4. Ротач В. Я. *Теория автоматического управления* : учебник для вузов. Москва : Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
5. Роцин А. В. *Основы теории автоматического управления* : учебное пособие. М.: МГУПИ, 2007. 100 с.
6. Коновалов, Б. И., Лебедев Ю. М. *Теория автоматического управления* : учебное пособие. Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010. 163 с. URL : <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208587>.
7. Ефимов И. П. *Операционные усилители*. Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2000. 72 с.
8. Веселов В. А. и др. *Аналоговые микросхемы преобразователей электрических сигналов и особенности их применения* : учебное пособие. СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2009. 161 с.
9. Усилители с электронным управлением. URL : http://radiomaster.ru/stati/radio/su_1.php.
10. Джонс М. Х. *Электроника* : практический курс. М. : Постмаркет, 1999. 528 с.
11. Управляемый напряжением аттенюатор. URL : <https://russianelectronics.ru/upravlyaemuj-napryazheniem-attenuator/>.
12. Выгодский М. Я. *Справочник по высшей математике*. М. : АСТ: Астрель, 2006. 991 с.

REFERENCES

1. Goloshchapov S. S. Capacitance measurement by the capacitive divider method / S.S. Goloshchapov //: Electric magazine. – Zaporizhzhya: Scientific-virobniche enterprise "Alpha-Omega" 2000. – No. 2 (12). S. 23–26.
2. Patent 10410 Ukraine. IPC G01R 27/26 (2006/01) / Adjustment for control of varicap parameters: applicant and owner of the patent Kherson National Technical University. – № u200503868; declared 04/22/2005; publ. 15.11.2005, bull. No. 11.
3. Isaev E. A. Fundamentals of the theory of automatic control: a textbook for practical training on ships of cadets-electromechanics.- 2nd ed. revised and add. / E. A. Isaev, I. E. Chernetskaya - Kherson, KSMA, 2013 . – 252 p.

4. Rotach V. Ya. Automatic control theory: textbook for universities – 5th ed., Revised. and add. - M.: Publishing house MEI, 2008. – 396 p.
5. Roshchin A. V. Foundations of the theory of automatic control. Textbook / A. V. Roshchin. – M.: MGUPI, 2007. – 100 p.
6. Konovalov, BI Theory of automatic control: textbook / BI Konovalov, Yu. M. Lebedev - Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2010. - 163 p. : ill., table., schemes. – Access mode: by subscription. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208587> – Text: electronic.
7. Efimov I. P. Operational amplifiers / I. P. Efimov - Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2000. – 72 p.
8. Veselov V. A. and other Analog microcircuits of electrical signal converters and features of their application: a tutorial. / V. A. Veselov – Balt. state tech. un-t – SPb, 2009 – 161 p.
9. Amplifiers with electronic control. – Access mode: http://radiomaster.ru/stati/radio/su_1.php.
10. Jones M. H. Electronics - a practical course. / M. H. Jones – M., Postmarket, 1999. – 528 p.
11. Voltage controlled attenuator. Access mode: <https://russianelectronics.ru/upravlyaemyj-napryazheniem-attenyuator/>.
12. Vygodsky M. Ya. Handbook of Higher Mathematics / M. Ya. Vygodsky – M.: AST: Astrel, 2006. – 991 p.

Голощاپов С. С. ЕКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНКИ ШВИДКОДІЇ СКЛАДНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

При розробці складної вимірювальної системи часто буває необхідним оцінити її динамічні параметри з метою визначення швидкодії, що є особливо актуальним при створенні автоматичних засобів вимірювання. При цьому подібні структури часто мають у своєму складі підсилювачі або атенюатори, керовані напругою, які здійснюють операцію множення сигналів. З метою застосування структур, що використовуються в теорії автоматичного управління (ТАУ), такі елементи замінюються на суматори логарифмів з подальшим потенціюванням. Для лінеаризації операцій логарифмування та потенціювання їх наближено представляють як операції віднімання та складання лінійних функцій. Аналогічним способом виражаються інші нелінійні операції вимірювальних ланок. Отримані структури представляються як схеми ТАУ з наступним складанням їх передавальних функцій, на основі яких визначається перехідна характеристика системи в цілому. Як приклад застосування наведеного методу розглядається схема вимірювача ємності варикапів на основі ємнісного дільника з просторовим поділом каналів вимірювання, що містить генератор високої частоти, ємнісний дільник, до складу якого включений вимірюваний варикап, керований підсилювач, два канали вимірювання, кожний з яких містить підсилювач високої частоти, пристрій, що віднімає, пристрій порівняння, джерело опорної напруги. Один з каналів вимірювання охоплений негативним зворотним зв'язком, другий містить пристрій, що віднімає, завдяки якому на його виході формується сигнал, пропорційний вимірюваній ємності. Показано, як можна розрахувати швидкодію наведеної схеми при стрибкоподібній зміні напруги зсуву, що подається на вимірюваний варикап через елемент розв'язки. Запропонований метод наближеного обчислення швидкодії вимірювальних систем досить простий і ефективний і дозволяє значно спростити визначення динамічних параметрів не тільки вимірювальних, а й систем управління, що містять ланки, які здійснюють операції множення або поділу сигналів.

Ключові слова: вимірювальна система, керований підсилювач, передатна функція, перехідна характеристика.

Goloschapov S. S. EXPRESS METHOD OF EVALUATION OF SPEED OF COMPLEX MEASURING SYSTEMS

When developing a complex measuring system, it is often necessary to evaluate its dynamic parameters in order to determine the speed of response, which is especially important when creating automatic measuring instruments. Moreover, such structures often include voltage-controlled amplifiers, which actually carry out the operation of signal multiplication. In order to apply the structures used in the theory of automatic control (TAU), such elements are replaced by adders of logarithms with subsequent potentiation. To linearize the operations of logarithm and potentiation, they are approximately represented

as operations of subtraction and addition of linear functions. Other non-linear operations of the measuring units are expressed in a similar way. The resulting structures are presented as TAU circuits with the subsequent compilation of their transfer functions, on the basis of which the transient response of the system as a whole is determined. As an example of the application of the above method, a circuit for measuring the capacitance of varicaps based on a capacitive divider with spatial separation of measurement channels is considered, containing a high-frequency generator, a capacitive divider, which includes a measured varicap, a controlled amplifier, two measurement channels containing high-frequency amplifiers and detectors, subtractor, comparison device, reference voltage source. One of the measurement channels is covered by negative feedback, the second contains a subtractor, due to which a signal proportional to the measured capacitance is generated at its output. It is shown how the speed of the given circuit can be calculated with an abrupt change in the bias voltage supplied to the measured varicap through the decoupling element. The proposed method for the approximate calculation of the speed of the measuring systems is quite simple and effective and makes it possible to significantly simplify the determination of the dynamic parameters of not only measuring, but also control systems containing links that carry out the operations of multiplying or dividing signals.

Keywords: *measuring system, controlled amplifier, transfer function, transient characteristic.*

© Голощанов С. С.

Статтю прийнято
до редакції 11.11.21