

Для цитирования: Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкин Д.А. Устройство кусочно-линейной аппроксимации переходной характеристики контролируемых электрорадиоизделий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):55-67. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-55-67

For citation: Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Chelushkin D.A. Device of piecewise-linear approximation of transient response of controlled electronic components. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):55-67. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-55-67

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.2.083

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-55-67

УСТРОЙСТВО КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

Исмаилов Т.А.¹, Гаджиев Х.М.², Челушкин Д.А.³

Дагестанский государственный технический университет
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, д.70, Россия,

¹e-mail:dstu@dstu.ru, ²e-mail:gadjiev.xad@mail.ru,

³e-mail: cheluschkindima1975@yandex.ru

Резюме. Цель. Разработка устройства кусочно-линейной аппроксимации переходной характеристики для контроля на автоматизированной системе производственного диагностирования параметров электрорадиоизделий на функциональных ячейках. **Методы.** Для контроля дефектных электрорадиоизделий на функциональных ячейках разработана новая измерительная входная цепь для получения интегральных переходных характеристик, причем параметры цепи могут быть программно изменены. При этом нет необходимости в исключении шунтирующего влияния соседних элементов на функциональных ячейках, т.к. будут учтены параметры всех электрорадиоизделий, подключенных к контролируемым точкам и все они будут оказывать влияние на формирование переходного процесса. **Результат.** Входная измерительная интегрирующая цепь способна контролировать переходные характеристики как отдельных электрорадиоизделий, так и групп, состоящих из разнотипных активных и пассивных электрорадиоизделий. Установлена зависимость между систематической погрешностью при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик электрорадиоизделий на функциональных ячейках и постоянной времени T входной цепи блока измерения. Минимальная величина систематической погрешности будет получена при постоянной времени входной цепи равной 0,001сек. **Вывод.** Преобразователь формы информации в автоматизированной системе производственного диагностирования для контроля переходных характеристик, снимаемых с диагностируемых электрорадиоизделий после подачи стимулирующего перепада напряжения, позволит значительно снизить время на контроль каждой функциональной ячейки за счет более быстрого процесса преобразования и более простого процесса сравнения с эталоном.

Ключевые слова: преобразователь формы информации, диагностирование, электрорадиоизделие, кусочно-линейная аппроксимация, переходные характеристики, функциональная ячейка

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
DEVICE OF PIECEWISE-LINEAR APPROXIMATION OF TRANSIENT RESPONSE
OF CONTROLLED ELECTRONIC COMPONENTS

Tagir A. Ismailov¹, Khadzhimurat M. Gadjiyev², Dmitriy A. Chelushkin³

¹⁻³ Daghestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: dstu@dstu.ru, ²e-mail: gadjiyev.xad@mail.ru,

³e-mail: cheluschkindima1975@yandex.ru

Abstract Objective The development of a device for the piecewise-linear approximation of a transient response for controlling an automated system of the production diagnosis of electronic component parameters on functional cells. **Methods** A new measuring input circuit was developed for the control of defective electronic components on functional cells in order to obtain the integral transient response, provided that circuit parameters can be programmatically altered. In this case, there is no need to exclude the shunting influence of neighbouring elements on functional cells, since all parameters of all electronic equipment connected to the controlled points are taken into account and will influence the formation of the transient process. **Results** The input measuring integrated circuit is capable of controlling the transient responses of both individual electronic components and their groups, consisting of various types of active and passive electronic components. The dependency between the systematic error in the piecewise-linear approximation of the transient response of the electronic components on functional cells and the time constant (T) of the input circuit of the measurement unit is established. The minimum value of the systematic error will be obtained with a time constant of the input circuit equal to 0.001 sec. **Conclusion.** The information form converter in the automated production diagnostic system for monitoring transient response from the diagnosed electronic components after the stimulating voltage drop has been applied will significantly reduce the time for monitoring each functional cell due to a faster conversion process and a simpler process for comparison with reference.

Keywords: information form converter, diagnostics, electronic component, piecewise-linear approximation, transient response, functional cell

Введение. При контроле на автоматизированной системе производственного диагностирования параметров электрорадиоизделий (ЭРИ) на функциональных ячейках и выходных сигналов ЭРИ возникает задача по вводу в ЭВМ аналоговой информации. На современном этапе широкого внедрения во все области жизни ЭВМ, задача по преобразованию аналоговой информации в цифровую форму является одной из важнейших [1- 3, 10].

Постановка задачи. Перед блоком измерения, применяемом в автоматизированной системе производственного диагностирования, стоят две задачи:

- преобразование в цифровую форму и передача в ЭВМ переходных характеристик, получаемых при контроле реакций ЭРИ на функциональных ячейках после подачи стимулирующего перепада;
- преобразование аналоговых сигналов синусоидальной формы с контролем величины амплитуды частоты несущего и модулирующего колебания.

Методы исследования. Блок измерения состоит из входной цепи для подключения контролируемых ЭРИ к измерительным устройствам и преобразователю формы информации для измерения, преобразования и передачи информации в ЭВМ [8- 9, 13].

В качестве входных измерительных цепей широко используют балансные мосты, цепи типа «треугольник» или непосредственно подключают контролируемое ЭРИ на вход измерителя [2, 4, 5, 14]. Однако, все эти варианты входных цепей имеют тот недостаток, что погреш-

ность измерения зависит от величины шунтирующего влияния соседних ЭРИ и от типа, контролируемого ЭРИ. При этом величина диапазона изменений номинальных значений проверяемых ЭРИ прямо влияет на диапазон изменений выходных значений входной измерительной цепи [18- 20].

Для контроля дефектных ЭРИ на функциональных ячейках была разработана новая измерительная входная цепь для получения интегральных переходных характеристик, причем параметры цепи могут быть программно изменены (рис. 1). При этом нет необходимости в исключении шунтирующего влияния соседних элементов на функциональных ячейках, наоборот, будут учтены параметры всех ЭРИ, подключенных к контролируемым точкам, так как все они будут оказывать влияние на формирование переходного процесса [15-17].

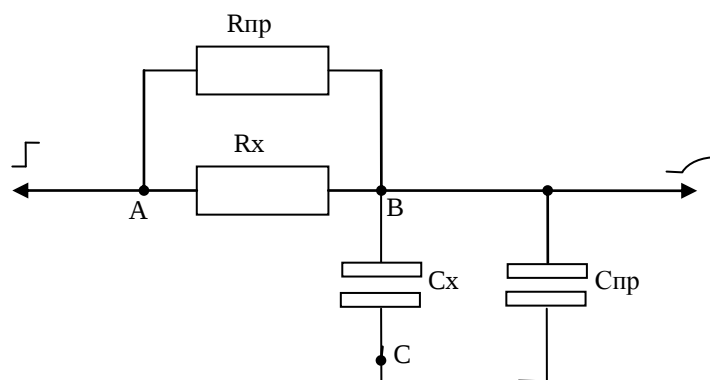


Рис.1. Входная интегрирующая измерительная цепь

Fig.1. Input integrating measuring circuit

Предлагаемая входная измерительная интегрирующая цепь способна контролировать переходные характеристики как отдельных ЭРИ, так и групп, состоящих из разнотипных активных и пассивных ЭРИ [6, 11- 12].

Применение программно-изменяемых резистора и емкости в интегрирующей цепи позволяет сузить динамический диапазон переходных характеристик за счет изменения постоянной времени цепи [7- 8].

Это осуществляется следующим образом:

- если комплексная нагрузка между контролируемыми точками носит резистивный характер, то она подключается последовательно в интегрирующую цепь (между точками А и В, рис. 1);
- если же комплексная нагрузка имеет емкостной характер, то она подключается в интегрирующую цепь параллельно (между точками В и С, рис. 1).

Тип нагрузки может быть определен в результате двукратного подключения.

При подаче положительного перепада уровней сигнала напряжение на выходе будет меняться по формуле:

$$U_c = U_e + (U_a - U_e) \exp(-t/T) \quad (1)$$

где, U_c - напряжение на выходе интегрирующей цепи; U_a - начальное напряжение на емкостях (равно нулю); t - время; T - постоянная времени, которая будет определяться следующим выражением:

$$T = 2\pi(R_{пр} + R_x)(C_{пр} + C_x) \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что для уменьшения значения диапазона возможных значений T необходимо изменять параметры таким образом, чтобы скомпенсировать значение R_x или C_x . Для требуемого диапазона изменений резисторов от 100 Ом до 200 кОм и конденсаторов от 200 пФ до 2000 мкФ (параметры пассивных ЭРИ на функциональных ячейках генератора Г4-176) потребуются аналогичные диапазоны для $C_{пр}$.

В этом случае возможна нормализация значений комплексного сопротивления между контролируемыми точками.

Возможность по расширению диапазона контролируемых параметров ЭРИ при сохранении выходных параметров (переходных характеристик) контролирующей цепи в узком диапазоне является преимуществом разработанной входной цепи блока измерения по сравнению с существующими. Контролируемые сигналы поступают с функциональных ячеек в виде переходных характеристик, контролируемых ЭРИ.

На рис. 2 изображена дискретизация по времени и квантование по уровню переходной характеристики ЭРИ по традиционной методике.

Для контроля этих переходных характеристик был разработан преобразователь формы информации, использующий метод кусочно-линейной аппроксимации аналоговых сигналов, позволяющий получить выигрыш во времени и количестве преобразуемой информации при контроле, как переходных характеристик, так и других аналоговых сигналов.

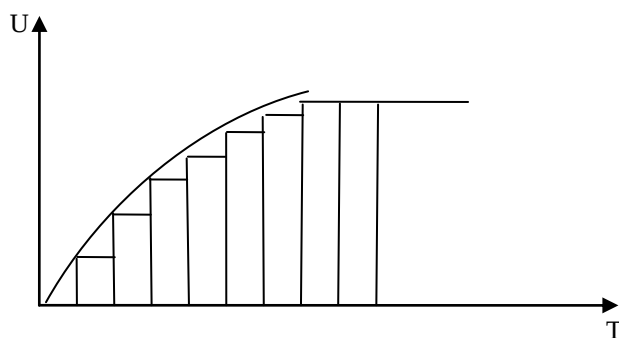


Рис.2. Дискретизация во времени и квантование по уровню переходной характеристики
Fig.2. Time-sampling and quantization by the level of the transient response

Несмотря на погрешности, возникающие при кусочно-линейной аппроксимации, такой подход допустим, так как разработанная автоматизированная система производственного диагностирования контролирует не сам аналоговый сигнал, поступающий с проверяемого ЭРИ в виде переходной характеристики или с выхода генератора, а проводит сравнение результата преобразования аналоговых сигналов, снятых с эталонного ЭРИ на эталонной функциональной ячейке, или эталонного сигнала, поступившего с образцового генератора.

Поэтому систематическая погрешность преобразования при кусочно-линейной аппроксимации не будет влиять на точность контроля, так как систематические погрешности при контроле эталонной и проверяемой функциональной ячейке равны и будут скомпенсированы.

Проведение аппроксимации возможно различными способами.

Наиболее приемлемым является косвенный анализ аппроксимируемой функции, при котором аналоговый сигнал разбивается на ряд линейных отрезков, с определенной погрешностью повторяющих форму аналогового сигнала.

Информацию об отрезке можно представить в различной форме, однако, наиболее целесообразной формой для передачи и хранения в ЭВМ является задание отрезка в виде наклона к оси абсцисс и протяженности по оси абсцисс.

Алгебраически это выглядит в виде задания первой производной и длины проекции отрезка. Физический смысл аппроксимации аналогового сигнала можно отобразить в виде скорости нарастания напряжения и времени, в течение которого величина этой скорости не претерпела значительного изменения.

Значение погрешности аппроксимации в этом случае определяется величиной второй производной от функции изменения аналоговых сигналов.

Способ преобразования будет заключаться в определении величин первой и второй производных от функции изменения аналоговых сигналов с запоминанием величины первой производной и интервала времени, в течение которого вторая производная не изменяла своего значения свыше величины, определяющей погрешность кусочно-линейной аппроксимации.

При этом момент совпадения величин второй производной с заданной погрешностью служит для фиксации уровня первой производной (наклона отрезка аппроксимации) и времени, в течение которого производная не превышала заданной погрешности (рис. 3).

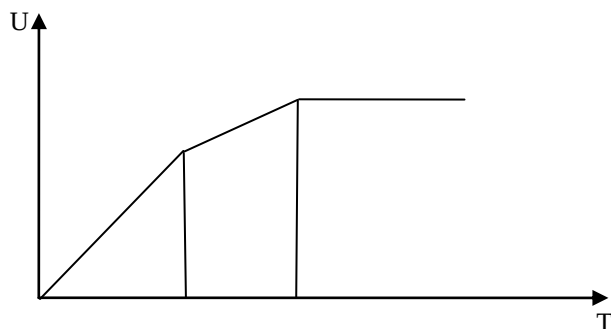


Рис.3. Аппроксимация переходной характеристики при помощи первой и второй производной

Fig.3. Approximation of the transition characteristic by means of the first and second derivatives

Для проведения кусочно-линейной аппроксимации с заданной погрешностью необходимо определить такие характеристики функции, как первую и вторую производные, для этой цели могут служить стандартные схемы дифференцирования на базе операционных усилителей.

Идеальный дифференциатор представлен на рисунке 4.

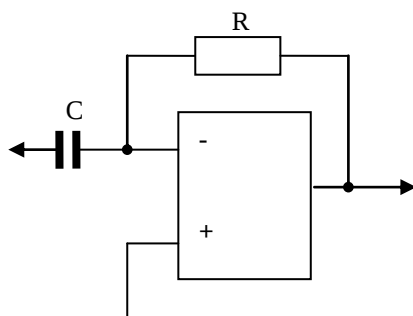


Рис.4. Идеальное дифференцирующее устройство

Fig. 4. The ideal differentiating device

Дифференцирующее устройство выполняет математическую операцию дифференцирования над входным сигналом. Для проведения двойного дифференцирования понадобятся два дифференцирующих устройства, включенных последовательно, для получения первой и второй производных.

Однако их применение для проведения кусочно-линейной аппроксимации неэффективно, так как для преобразования в цифровую форму с последующим вводом в ЭВМ потребуется двойное измерение на АЦП первой и второй производных с последующим запоминанием и анализом большого количества информации. Не меньшее количество информации потребуется и при предварительном аналого-цифровом преобразовании с последующим анализом в ЭВМ значений производных.

С целью уменьшения количества преобразуемой информации, а, соответственно, и повышения быстродействия системы в целом можно для фиксации значений производных контролируемой функции применять преобразователь напряжение - код, однако измерения прово-

дить не непрерывно, а только в те моменты времени, когда вторая производная меняет свое значение, свыше заданного уровня.

Структурная схема разработанного преобразователя формы информации изображена на рис. 5 и работает следующим образом.

По командам устройства управления 7 устройство выборки хранения 1, 4 поочередно дискретизируют преобразуемый сигнал с минимальным шагом дискретизации. Дифференциальный усилитель 2 выделяет текущую разность между двумя выборками, то есть определяет первую производную, которая запоминается устройством выборки-хранения 5 и подается на компаратор 3. Устройство выборки-хранения 5 запоминает начальное значение первой производной и сравнивает его на компараторе 3 со всеми последующими значениями.

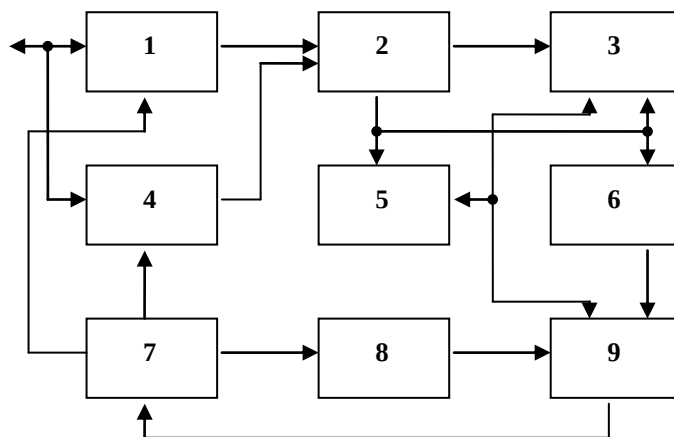


Рис.5. Структурная схема аппроксимирующего преобразователя формы информации:

1, 4, 5 – устройство выборки - хранения; 2 - разностный усилитель; 3 – компаратор; 6 - преобразователь напряжение – код; 7 - устройство управления; 8 – счетчик; 9 - интерфейс

Fig.5. Structural diagram of the approximating converter of the information form:

1, 4, 5 - sampling-storage device; 2 - difference amplifier; 3 - comparator; 6 - pre-stresser - code; 7 - control device; 8 - counter; 9 – interface

До тех пор, пока значение первой производной не будет меняться, на выходе компаратора 3 будет присутствовать ноль, что соответствует нулевому значению второй производной. Если же значение первой производной изменится, то на выходе компаратора появится единица, которая будет сигналом для записи в устройство выборки - хранения 5 нового значения первой производной и записи в интерфейс 9 информации со счетчика 8 и преобразователь напряжение - код 6. Счетчик 8 хранит информацию о количестве шагов дискретизации, в течение которого первая производная не меняла своего значения. Преобразователь напряжение - код 6 содержит информацию о величине первой производной в устройство выборки - хранения 5.

Следовательно, в ЭВМ будет записываться информация об угле наклона функции (первая производная) и времени сохранения этого угла (количество шагов дискретизации). В конце преобразования в ЭВМ будет храниться результат аппроксимации преобразуемой функции в виде прямых отрезков.

Такое представление преобразуемой функции имеет преимущество по сравнению с традиционными формами преобразования.

Во-первых, максимальное быстродействие ограничивается не преобразователем напряжение - код, а устройством выборки - хранения, что значительно более легко достижимо, так как устройство выборки – хранения - это обычная ключевая схема (транзисторный ключ и запоминающая емкость); во-вторых, к преобразователю напряжение - код предъявляются меньшие требования, так как он работает в преобразователе формы информации в щадящем режиме, который обусловлен большим временем, отводимым на преобразование, меньшим динамическим диапазоном преобразуемых сигналов. Так, например, при частоте дискретизации 1мкс традиционный преобразователь формы информации должен содержать преобразователь напряжение

- код способный за 1мкс преобразовать максимально возможный сигнал динамического диапазона.

Разработанный преобразователь формы информации должен преобразовать значение первой производной, то есть разницу между двумя соседними выборками, которая значительно меньше всего динамического диапазона преобразуемого сигнала, причем, за время равное не одной выборке, а нескольким (время, за которое первая производная не меняла своего значения). Систематическая погрешность при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик может быть определена по графику, изображенному на рис. 6.

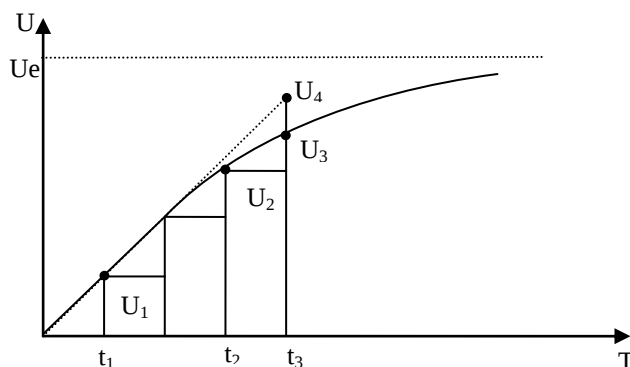


Рис.6. Определение систематической погрешности при кусочно-линейной аппроксимации переходной характеристики

Fig.6. Definition of a systematic error in the case of a piecewise linear approximation of the transient characteristic

Напряжение переходного процесса изменяется по закону:

$$U(i) = U_e \left[1 - \exp \left[-\frac{t(i)}{T} \right] \right], \quad (3)$$

где $U(i)$ - напряжение выборки; U_e - напряжение стимулирующего воздействия, подаваемого на ЭРИ; $t(i)$ - время выборки; T - постоянная времени входной измерительной цепи и контролируемой группы ЭРИ.

Время t_1 равно шагу дискретизации. Величина первой производной определяется как U_1/t_1 . В момент времени t_3 значение первой производной будет равно разности напряжений двух соседних выборок, деленных на шаг дискретизации:

$$Y' = \frac{U_3 - U_2}{t_3 - t_2} = \frac{U_3 - U_2}{t_1}. \quad (4)$$

Величина отлчия начального значения первой производной U_1/t_1 и первой производной в момент времени t_3 равна величине U_k (напряжение срабатывания компаратора 3, являющееся допустимым уровнем второй производной). Из графика на рис. 6 видно, что расчетное значение напряжения функции U_4 в момент выборки t_3 отличается от реального значения функции U_3 . Напряжение U_4 можно найти по графику, изображенному на рисунке 6. Из подобия треугольников следует, что $U_4 > U_1$ во столько раз, во сколько $t_3 > t_1$. Отсюда:

$$U_4 = (U_1 \cdot t_3) / t_1. \quad (5)$$

Для определения величины систематической погрешности при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик необходимо предварительно рассчитать значения напряжений U_1, U_2, U_3 в соответствии с формулой (3), для чего функцию экспоненты разложим в степенной ряд:

$$\exp \left[-\frac{t(i)}{T} \right] = 1 - \frac{t(i)}{T} + \frac{1}{2!} \left[\frac{t(i)}{T} \right]^2 - \frac{1}{3!} \left[\frac{t(i)}{T} \right]^3 + \dots \quad (6)$$

Отбросим члены со степенями больше двух как стремящиеся к нулю при условии, что $t(i) \ll T$ (величина T задается изменением параметров входной цепи по формуле (2)):

$$\exp\left[-\frac{t(i)}{T}\right] = 1 - \frac{t(i)}{T} + \frac{1}{2}\left[\frac{t(i)}{T}\right]^2 \quad (7)$$

Подставив в (3) получим:

$$U(i) = U_e \left[1 - 1 + \frac{t(i)}{T} - \frac{1}{2}\left[\frac{t(i)}{T}\right]^2 \right]. \quad (8)$$

Раскрывая скобки и проводя приведение подобных, можно получить:

$$U(i) = \frac{U_e \cdot t(i)}{T} \left[1 - \frac{t(i)}{2T} \right]. \quad (9)$$

Пользуясь формулой (9), найдем U_1 , U_2 , U_3 :

$$U_1 = \frac{U_e \cdot t_1}{T} \left[1 - \frac{t_1}{2T} \right], \quad (10)$$

$$U_2 = \frac{U_e \cdot t_2}{T} \left[1 - \frac{t_2}{2T} \right], \quad (11)$$

$$U_3 = \frac{U_e \cdot t_3}{T} \left[1 - \frac{t_3}{2T} \right]. \quad (12)$$

Относительную погрешность кусочно-линейной аппроксимации можно определить из графика на рис. 6 по формуле:

$$dU = \frac{U_4 - U_3}{U_3} 100\%, \quad (13)$$

где, dU - относительная погрешность в процентах.

Разделив на U_3 , получим:

$$dU = \left[\frac{U_4}{U_3} - 1 \right] 100\%. \quad (14)$$

Подставляя значения U_4 из формулы (5), получим:

$$dU = \frac{U_1 \cdot t_3}{U_3 \cdot t_1} 100\%. \quad (15)$$

Продолжая подстановку U_1 и U_3 из формул (10) и (12) и, проводя приведение подобных, придем к виду:

$$dU = \left[\frac{2T - t_1}{2T - t_3} - 1 \right] 100\%. \quad (16)$$

Приведа к общему знаменателю, получим:

$$dU = \left[\frac{2T - t_1}{2T - t_3} - \frac{2T - t_3}{2T - t_3} \right] 100\%. \quad (17)$$

Сокращая, найдем значение относительной погрешности:

$$dU = \left[\frac{t_3 - t_1}{2T - t_3} \right] 100\%. \quad (18)$$

Для нахождения времени t_3 , необходимо определить величину порогового напряжения компаратора, влияющего на величину t_3 .

Оно равняется:

$$U_k = U_1 - (U_3 - U_2) = U_1 + U_2 - U_3. \quad (19)$$

После подстановки значений U_1 , U_2 , U_3 из формул (10) – (12) получим:

$$U(i) = \frac{U_e}{T} \left[t_1 \left[1 - \frac{t_1}{2T} \right] + t_2 \left[1 - \frac{t_2}{2T} \right] - t_3 \left[1 - \frac{t_3}{2T} \right] \right]. \quad (20)$$

Из графика на рис. 6 следует, что:

$$t_2 = t_3 - t_1. \quad (21)$$

Поэтому, после подстановки t_2 в уравнение (20), придем к следующему виду:

$$U(i) = \frac{U_e}{T} \left[t_1 \left[1 - \frac{t_1}{2T} \right] + (t_3 - t_1) \left[1 - \frac{t_3 - t_1}{2T} \right] - t_3 \left[1 - \frac{t_3}{2T} \right] \right]. \quad (22)$$

Раскрывая скобки и, проводя приведение подобных, членов получим:

$$U_k = U_e \cdot t_1(t_3 - t_1)/T^2. \quad (23)$$

Преобразовав, найдем t_3 :

$$t_3 = \frac{U_k \cdot T^2}{U_e \cdot t_1} + t_1. \quad (24)$$

Подставляя t_3 в формулу (18), получим:

$$dU = \frac{(U_k \cdot T^2 / U_e \cdot t_1) + t_1 - t_1}{2T - (U_k \cdot T^2 / U_e \cdot t_1) - t_1}. \quad (25)$$

Упростив выражение, найдем значение относительной погрешности:

$$dU = \frac{U_k \cdot T^2}{2U_e \cdot T \cdot t_1 - U_k \cdot T^2 - U_e \cdot t_1^2}. \quad (26)$$

Из формулы (26) следует, что погрешность при кусочно-линейной аппроксимации тем меньше, чем меньше постоянная времени входной цепи T и напряжение срабатывания компаратора U_k . Увеличение стимулирующего перепада напряжения U_e , подаваемого на проверяемые ЭРИ, также уменьшает погрешность кусочно-линейной аппроксимации, но значительное увеличение (свыше 1В) приходит в противоречие с принципом неповреждения компонентов при проверке. Поэтому для повышения точности операций контроля необходимо выбрать компаратор с минимально возможным пороговым напряжением срабатывания и задавать минимальную величину постоянной времени входной цепи при помощи изменяемых программно конденсатора и резистора во входной цепи.

Обсуждение результатов. Количество преобразуемой информации при кусочно-линейной аппроксимации значительно меньше и представлено в доступной для сравнения и хранения форме. Например, при преобразовании интегральной переходной характеристики (рис. 2) существующие преобразователи формы информации выдадут значение функции в дискретные моменты времени, в виде набора напряжений и моментов времени, соответствующих этим напряжениям. Разработанный преобразователь формы информации выдаст только значения наклона интегральной характеристики и времени (рис. 3), в течение которого он держался, поэтому процедура хранения и сравнения с ожидаемыми значениями существенно проще.

Было проведено исследование по установлению зависимости между систематической погрешностью при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик ЭРИ на функциональных ячейках и постоянной времени T входной цепи блока измерения. Изменением величин параметров входной цепи ($R_{пр}$ и $C_{пр}$) были заданы всевозможные значения постоянной времени T .

Для каждого значения T проводился расчет значения систематической погрешности по формуле (26), при этом уровень стимулирующего напряжения, подаваемого в качестве входного воздействия, равнялся $U_e=1В$. Напряжение срабатывания компаратора принималось равным 5мВ.

Результаты проведенного исследования приведены на графике на рисунке 7. Расхождение между теоретическими и практическими значениями вызваны тем, что при уменьшении значения постоянной времени T до величины шага дискретизации t_1 , возрастает величина погрешности, вносимая отброшенными членами уравнения (6) (члены уравнения со степенями больше двух принимались незначимыми при условии, что $t_1 \ll T$).

Из графика на рис. 7 можно сделать вывод, что минимальная величина систематической погрешности будет получена при постоянной времени входной цепи равной 0,001сек. Поэтому необходимо при контроле параметров ЭРИ на функциональных ячейках задавать параметры входной цепи таким образом, чтобы результирующее значение постоянной времени входной цепи равнялось 0,001 сек.

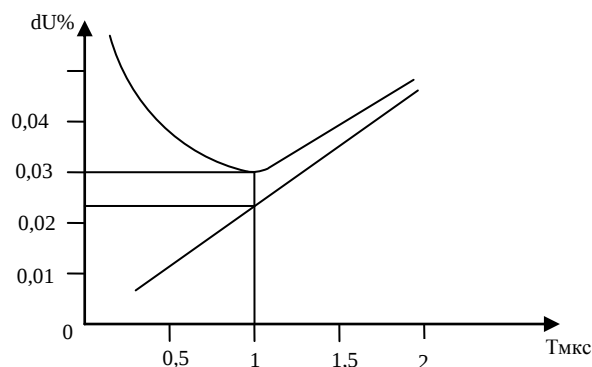


Рис.7. Зависимость систематической погрешности при кусочно-линейной аппроксимации
Fig.7. Dependence of the systematic error for piecewise-linear approximation

Вывод. Следовательно, применение преобразователя формы информации в автоматизированной системе производственного диагностирования для контроля переходных характеристик, снимаемых с диагностируемых ЭРИ после подачи стимулирующего перепада напряжения, позволит значительно снизить время на контроль каждой функциональной ячейки за счет более быстрого процесса преобразования и более простого процесса сравнения с эталоном.

Разработанный преобразователь формы информации пригоден для контроля аналоговых сигналов как постоянных, так и меняющихся во времени. Постоянные напряжения преобразуются на преобразователе формы информации с максимальным быстродействием за один шаг дискретизации.

Библиографический список:

1. Granichin O.N., Amelina N.O. Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances. IEEE Transactions on Automatic Control. 2015, vol.60, no.6, pp.1653-1658, DOI: 10.1109/TAC.2014.2359711.
2. Klyatchenko Ya. Determination of hardware on fpga operational probabilities under conditions with distortion of logical signals. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2015, no.3(34), pp. 9-12.
3. Rybin Y.K. The nonlinear distortions in the oscillatory system of generator on CFOA. Active and Passive Electronic Components. 2012, vol. 2012, pp. 908716, DOI: 10.1155/2012/908716.
4. Scibilia F., Hovd M., Olaru S. Explicit model predictive control VIA Delaunay tessellations. Journal europeen des Systemes Automatises. 2012, vol.46, no.2-3, pp. 267-290, DOI: 10.3166/JESA.46.267-290.
5. Sobchuk N., Slobodianiuk O. Determination of optimal value of testing voltage for efficient control of the insulation. Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. 2016, no.2, pp. 65-69.

6. Wang L., Sun L., Hong J. Modified equations for weakly convergent stochastic symplectic schemes via their generating functions. *BIT Numerical Mathematics*. 2016, vol.56, no.3, pp.1131-1162, DOI: 10.1007/s10543-015-0583-8.
7. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надежности. – С.-Пб.: «Абрис», 2012. – 392 с.
8. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Схиртладзе А.Г. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – Ст. Оскол: «ТНТ», 2013. – 352 с.
9. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. – М.: «Ленанд», 2016. – 256 с.
10. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. – М.: «Либроком», 2013. – 584 с.
11. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. – С.-Пб.: «Лань», 2011. – 352 с.
12. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Применение многокаскадных термоэлектрических модулей для охлаждения процессора компьютера // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2004. - №7. – С. 25-29.
13. Каштанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем. – М.: «Физматлит», 2010. – 608 с.
14. Оуэн Бишоп Электронные схемы и системы (ElectronicsCircuitsandSystems). – М.: «ДМК-Пресс», 2016. – 576 с.
15. Патент RU №2360380, МПК: H05K 7/20, G06F 1/20. Устройство для термостатирования компьютерного процессора / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Оpubл. 27.06.2009. Бюл. №18.
16. Патент RU №2256946, МПК: G05D23/20, F25B21/02. Термоэлектрическое устройство терморегулирования компьютерного процессора с применением плавящегося вещества / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Гафуров К.А.// Оpubл. 20.07.2005. Бюл. №20.
17. Патент RU №2369894, МПК: G05D23/22, H01L35/28. Термоэлектрическое устройство термостабилизации компонентов вычислительных систем с высокими тепловыделениями / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Оpubл. 27.03.2009. Бюл. №28.
18. Петров В.П. Регулировка, диагностика и мониторинг работоспособности смонтированных узлов, блоков и приборов радиоэлектронной аппаратуры, аппаратуры проводной связи, элементов узлов импульсной и вычислительной техники. Учебник. – М.: «Академия», 2016. – 224 с.
19. Шишмарев В.Ю. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Учебник. – Р.н/Д.: «Феникс», 2017. – 448 с.
20. Шишмарев В.Ю. Диагностика и надежность автоматизированных систем. - М.: «Академия», 2013. – 352 с.

References:

1. Granichin O.N., Amelina N.O. Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2015;60(6):1653-1658. DOI: 10.1109/TAC.2014.2359711.
2. Klyatchenko Ya. Determination of hardware on fpga operational probabilities under conditions with distortion of logical signals. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2015;3(34):9-12.
3. Rybin Y.K. The nonlinear distortions in the oscillatory system of generator on CFOA. *Active and Passive Electronic Components*. 2012;2012:908716. DOI: 10.1155/2012/908716.
4. Scibilia F., Hovd M., Olaru S. Explicit model predictive control VIA Delaunay tessellations. *Journal europeen des Systemes Automatises*. 2012;46(2-3):267-290. DOI: 10.3166/JESA.46.267-290.
5. Sobchuk N., Slobodianiuk O. Determination of optimal value of testing voltage for efficient control of the insulation. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. 2016;2:65-69.

6. Wang L., Sun L., Hong J. Modified equations for weakly convergent stochastic symplectic schemes via their generating functions. *BIT Numerical Mathematics*. 2016;56(3):1131-1162. DOI: 10.1007/s10543-015-0583-8.
7. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti*. S.-Pb.: "Abris"; 2012. 392 s. [Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statistical models in reliability theory*. Saint-Petersburg: "Abris"; 2012. 392 p. (in Russ.)]
8. Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Skhirtladze A.G. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem*. St. Oskol: "TNT"; 2013. 352 s. [Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Skhirtladze A.G. *Diagnostics and reliability of automated systems*. St. Oskol: "TNT"; 2013. 352 p. (in Russ.)]
9. Viktorova V.S., Stepanyants A.S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem*. M.: "Lenand"; 2016. 256 s. [Viktorova V.S., Stepanyants A.S. *Models and methods of reliability calculation of technical systems*. Moscow: "Lenand"; 2016. 256 p. (in Russ.)]
10. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti*. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz. M.: "Librokom"; 2013. 584 s. [Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Mathematical methods in the reliability theory*. Major features of reliability and their statistical analysis. Moscow: "Librokom"; 2013. 584 p. (in Russ.)]
11. Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem*. S.-Pb.: "Lan"; 2011. 352 s. [Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Providing reliability of complex technical systems*. Saint-Petersburg: "Lan"; 2011. 352 p. (in Russ.)]
12. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. *Primenenie mnogokaskadnykh termoelektricheskikh moduley dlya okhlazhdeniya protsessora komp'yutera*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2004;7:25-29. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. *Application of multi-cascade thermoelectric units for computer CPU cooling*. *Journal of Instrument Engineering*. 2004;7:25-29. (in Russ.)]
13. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem*. M.: "Fizmatlit"; 2010. 608 s. [Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Reliability theory of complex systems*. Moscow: "Fizmatlit"; 2010. 608 p. (in Russ.)]
14. Owen Bishop. *Elektronnye skhemy i sistemy (Electronics Circuits and Systems)*. M.: "DMK-Press"; 2016. 576 s. [Owen Bishop. *Electronics Circuits and Systems*. Moscow: "DMK-Press"; 2016. 576 p. (in Russ.)]
15. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Ustroystvo dlya termostatirovaniya komp'yuternogo protsessora*. Patent RU №2360380, MPK: H05K 7/20, G06F 1/20. Byul. №18. Opubl. 27.06.2009. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Device for thermal stabilisation of computer CPU*. Patent RU №2360380, MPK: H05K 7/20, G06F 1/20. Bull. №18. Publ. 27.06.2009. (in Russ.)]
16. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A. *Termoelektricheskoe ustroystvo termoregulirovaniya komp'yuternogo protsessora s primeneniem plavyashchegosya veshchestva*. Patent RU №2256946, MPK: G05D23/20, F25B21/02. Byul. №20. Opubl. 20.07.2005. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A. *Thermo-electric device of thermal regulation of computer's CPU with the application of melting substance*. Patent RU №2256946, MPK: G05D23/20, F25B21/02. Bull. №20. Publ. 20.07.2005. (in Russ.)]
17. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Termoelektricheskoe ustroystvo termotabilizatsii komponentov vychislitel'nykh sistem s vysokimi teplovydeleniyami*. Patent RU №2369894, MPK: G05D23/22, H01L35/28. Byul. №28. Opubl. 27.03.2009. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Thermo-electric device of thermal stabilisation of computation engineering components with high heat emissions*. Patent RU №2369894, MPK: G05D23/22, H01L35/28. Bull. №28. Publ. 27.03.2009. (in Russ.)]
18. Petrov V.P. *Regulirovka, diagnostika i monitoring rabotosposobnosti smontirovannykh uzlov, blokov i priborov radioelektronnoy apparatury, apparatury provodnoy svyazi, elementov uzlov impul'snoy i vychislitel'noy tekhniki*. Uchebnik. M.: "Akademiya"; 2016. 224 s. [Petrov V.P. *Regulation, diagnostics and monitoring of working capacity of mounted units, blocks and de-*

vices of radio-electronic apparatus, wire connection apparatus, and units of impulse and computation engineering. A tutorial. Moscow: "Akademiya"; 2016. 224 p. (in Russ.)]

19. Shishmarev V.Yu. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii. Ucheb-nik. Rostov-on-Don: "Feniks"; 2017. 448 s. [Shishmarev V.Yu. Automation of industrial processes in machine-building. A Tutorial. Rostov-on-Don: "Feniks"; 2017. 448 p. (in Russ.)]

20. Shishmarev V.Yu. Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem. M.: "Akademiya"; 2013. 352 s. [Shishmarev V.Yu. Diagnostics and reliability of automated systems. Moscow: "Akademiya"; 2013. 352 s. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Исмаилов Тагир Абдурашидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники. Ректор Дагестанского государственного технического университета, Заслуженный деятель науки РФ.

Гаджиев Хаджимурат Магомедович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций.

Челушкин Дмитрий Алексеевич – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors:

Tagir A. Ismailov – Dr. Sci.(Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering. The rector Daghestan State Technical University. Honored worker of science of the Russian Federation.

Khadzhimurat M. Gajiyev – Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering.

Dmitriy A. Chelushkin – Graduate student, Department of theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 11.06.2017.

Received 11.06.2017.

Принята в печать 26.06.2017.

Accepted for publication 26.06.2017.