

ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Е. И. Алгазин

*Кафедра «Электроника и электротехника», evgeniialgazin@gmail.com;
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск, Россия*

Ключевые слова: коэффициент передачи линейной системы; система автоматике; собственное время электрической цепи; электрическая цепь.

Аннотация: Предложен способ описания линейных систем автоматике в области времени на основе классического аналитического выражения коэффициента передачи. Рассмотрено формирование выражения коэффициента передачи в рамках временно-энергетической модели колебательного процесса на входе и выходе рассматриваемых систем. Предложены аналитические способы описания коэффициентов передачи по энергии, по скорости изменения энергии, а также нормированного времени. Рассмотрена динамика данных коэффициентов передачи.

Введение

Существующие классические способы описания функционирования линейных систем применяются при представлении таких систем в области времени.

Поскольку исследуемые в данной работе системы представляют собой обычные четырехполюсники, то для их описания в области времени вполне подходят известные способы, основанные на использовании коэффициента передачи линейной системы. Все особенности используемых способов, такие как, например, наличие нулей и полюсов, также присутствуют при использовании выбранного способа.

Отметим, что данный способ анализа линейных систем представляет собой инженерный инструмент и позволяет качественно и количественно описать процессы, происходящие в области времени.

В работе предложен анализ поведения линейной системы, как в области времени, так и в области энергии.

Постановка задачи

Представим линейную систему в виде четырехполюсника, обладающего определенным коэффициентом передачи [1, 2]. Пусть на его входе действует колебательный затухающий процесс, описываемый в виде экспоненциально затухающей синусоиды в цепи R–L–C. Примем в этой цепи сопротивление $R = 2$ Ом, индуктивность $L = 6$ Гн, емкость $C = 1$ Ф, предварительно заряжена до $U_0 = 100$ В. Очевидно, что на выходе четырехполюсника будет действовать колебательный затухающий процесс, описываемый в виде экспоненциально затухающей синусоиды в цепи R–L–C с теми же значениями R , L и C , а $U_0 = 120$ В.

Необходимо получить аналитические выражения для коэффициентов передачи по энергии, скорости изменения энергии, а также для нормированного времени такого четырехполюсника при колебательном режиме на его входе и выходе.

Пути решения

На рисунке 1 предложена следующая геометрическая интерпретация временно-энергетической модели, по сути отображающая реакцию цепи R–L–C без источника питания с предварительно заряженным конденсатором [3].

Описание ее заключается в следующем: для каждого текущего значения энергии емкостного и индуктивного элемента вычисляются времена диссипации этих значений энергий. Окончательный массив времен диссипаций исследуемой электрической цепи формируется выбором максимального из вычисленных значений времен диссипаций энергии емкости или индуктивности. Это значение присваивается рассматриваемому элементу окончательного массива времен диссипаций, и так для всех элементов. Полученному таким образом окончательному массиву значений времен диссипаций соответствует массив значений энергий, каждый элемент которого поставлен в соответствие по номеру элемента окончательного массива времен диссипаций.

Отметим, что уменьшение энергии в рассматриваемой цепи соответствует уменьшению времени ее диссипации.

Рассмотрим колебательный разряд конденсатора в цепи R–L–C как наиболее сложный. В этом режиме функционирования исследуемой цепи напряжение на емкости представлено выражением [1, 2]

$$U_C(t) = \frac{U_0}{\omega_{CB} \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin \left(\omega_{CB} t + \arctg \left(\frac{\omega_{CB}}{\alpha} \right) \right), \quad (1)$$

где U_0 – начальное значение напряжения на емкости; $\alpha = \frac{R}{2L}$ – декремент затухания; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота цепи R–L–C; $\omega_{CB} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ – частота затухающих колебаний цепи R–L–C.

Энергия конденсатора равна

$$E_C(t) = \frac{CU_C^2(t)}{2}. \quad (2)$$

Ток в индуктивности описывается следующим образом

$$i_L(t) = \frac{U_0}{\omega_{CB} L} e^{-\alpha t} \sin (\omega_{CB} t + \pi). \quad (3)$$

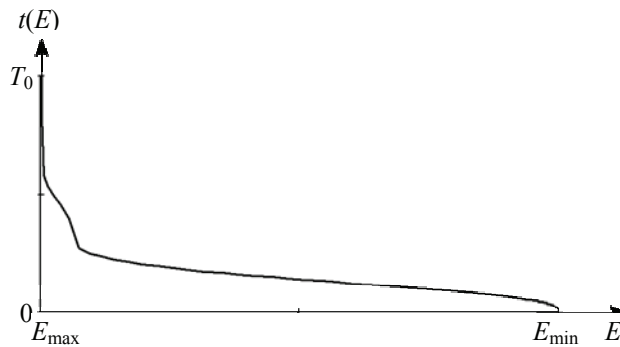


Рис. 1. Геометрическая интерпретация временно-энергетической модели R–L–C цепи без источника питания:

T_0 – собственное время цепи (максимальное время диссипации);

E_{\max} , E_{\min} – максимальная и минимальная энергия в цепи соответственно

Энергия индуктивного элемента равна

$$E_L(t) = \frac{Li_L^2(t)}{2}. \quad (4)$$

Потери на диссипацию оцениваются по формуле

$$E = \int_0^T Ri^2(t)dt, \quad (5)$$

где $i(t)$ – ток в цепи; T – длительность интервала времени, на котором присутствует диссипация.

Предложен следующий способ оценки коэффициентов передачи исследуемого четырехполюсника по энергии, скорости изменения энергии, а также оценка нормированного времени.

Введем нормированное время, коэффициент которого представлен выражением его мгновенного отсчета

$$t_{t_k} = \frac{t_{\text{ВЫХ}_k}(E)}{t_{\text{ВХ}_k}(E) + 0,001}, \quad (6)$$

где $t_{\text{ВЫХ}_k}(E)$, $t_{\text{ВХ}_k}(E)$ – значения мгновенного отсчета по времени диссипации на выходе и входе четырехполюсника соответственно; 0,001 – константа, предотвращающая деление на ноль.

Коэффициент передачи по скорости изменения энергии представим как

$$t_{v_k} = \frac{v_{\text{ВЫХ}_k}}{v_{\text{ВХ}_k}}, \quad (7)$$

где $v_{\text{ВЫХ}_k}$, $v_{\text{ВХ}_k}$ – мгновенные отсчеты скорости изменения энергии на выходе и входе четырехполюсника соответственно.

Коэффициент передачи по энергии равен

$$t_{E_k} = \frac{E_{\text{ВЫХ}_k}}{E_{\text{ВХ}_k}}, \quad (8)$$

где $E_{\text{ВЫХ}_k}$, $E_{\text{ВХ}_k}$ – мгновенные значения энергии на выходе и входе четырехполюсника соответственно.

Кроме коэффициентов передачи по энергии и скорости изменения энергии, а также нормированного времени, для анализа динамики состояния линейной системы использовались значения скоростей изменения энергии на входе и выходе четырехполюсника, аналитические выражения которых имеют следующий вид:

$$v_{\text{ВЫХ}_k} = \frac{E_{\text{ВЫХ}_k} - E_{\text{ВЫХ}_{k-1}}}{t_{\text{ВЫХ}_k} - t_{\text{ВЫХ}_{k-1}} + 0,1}; \quad v_{\text{ВХ}_k} = \frac{E_{\text{ВХ}_k} - E_{\text{ВХ}_{k-1}}}{t_{\text{ВХ}_k} - t_{\text{ВХ}_{k-1}} + 0,1}, \quad (9)$$

где $t_{\text{ВЫХ}_k}$, $t_{\text{ВХ}_k}$ – мгновенные значения k -го отсчета времени на выходе и входе четырехполюсника соответственно; 0,1 – константа, предотвращающая деление на ноль.

Средние скорости изменения энергии имеют следующие аналитические выражения:

$$v_{\text{ср.вых}} = \frac{E_{\text{ВЫХ max}} - E_{\text{ВЫХ min}}}{t_{\text{ВЫХ}_0} - t_{\text{ВЫХ}_N}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{ВЫХ}_0}$, $t_{\text{ВЫХ}_N}$ – мгновенные значения нулевого и N -го отсчетов времени на выходе четырехполосника соответственно; $v_{\text{ср.ВЫХ}}$ – средняя скорость изменения энергии на выходе четырехполосника;

$$v_{\text{ср.ВЫХ}} = \frac{E_{\text{ВХ max}} - E_{\text{ВХ min}}}{t_{\text{ВХ}_0} - t_{\text{ВХ}_N}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{ВХ}_0}$, $t_{\text{ВХ}_N}$ – мгновенные значения нулевого и N -го отсчетов времени на входе четырехполосника соответственно; $v_{\text{ср.ВХ}}$ – средняя скорость изменения энергии на входе четырехполосника.

Средние скорости изменения энергии дополнительно вычисляются как среднее значение алгебраических сумм $v_{\text{ВЫХ}_k}$ и $v_{\text{ВХ}_k}$:

$$v_{\text{ср.ВЫХ}} = \frac{\sum_{k=1}^N v_{\text{ВЫХ}_k}}{N}; \quad v_{\text{ср.ВХ}} = \frac{\sum_{k=1}^N v_{\text{ВХ}_k}}{N}. \quad (12)$$

Результаты

Анализ поведения линейной системы автоматике приведен в области предложенных в данной работе параметров, описывающих данную систему. Результаты исследования приведены на рис. 2, а также в виде численных значений отдельных параметров.

Из рисунка 2 видно, что коэффициенты передачи четырехполосника по энергии и скорости изменения энергии постоянны. Им соответствуют прямые линии. Это не противоречит основному подходу: значения мгновенных отсчетов энергии и скорости изменения энергии на выходе линейной системы представляют собой умноженные на коэффициенты передачи по энергии и скорости изменения энергии значения мгновенных отсчетов данных параметров на входе линейной системы.

Нормированное время остается постоянным до появления полюса, а затем уменьшается с ростом счетчика шагов до нуля. Это объясняется тем, что с ростом числа шагов уменьшается энергия вследствие диссипации, а затем и время диссипации. Это уменьшение в знаменателе выражения нормированного времени приводит к появлению полюса. После чего в числителе присутствует малая величина и общее значение нормированного времени близко к нулю.

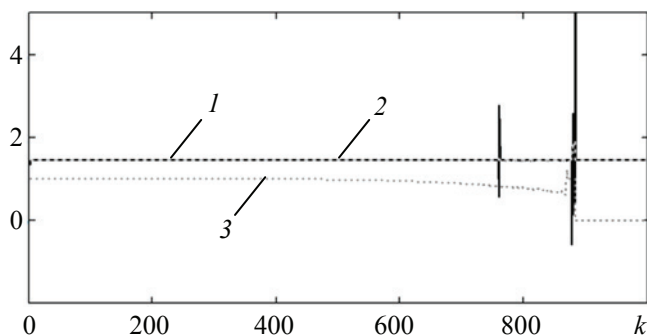


Рис. 2. Графики коэффициентов передачи по энергии (1), скорости изменения энергии (2) и нормированного времени (3); k – счетчик шагов

Энергия и скорость изменения энергии убывают в числителе и знаменателе неодинаково, что происходит вследствие диссипации энергии и приводит к появлению полюсов коэффициентов передачи по энергии и скорости изменения энергии. Появление полюса говорит о переходе системы в нестабильное состояние.

Значения средних скоростей изменения энергии, вычисленные первым способом:

$$v_{\text{ср.вых}} = 103,3; \quad v_{\text{ср.вх}} = 75,758 .$$

Действительно, энергия на выходе четырехполюсника больше, чем на входе, что обуславливает превышение средней скорости изменения энергии на выходе.

Значения средних скоростей изменения энергии, вычисленные вторым способом:

$$v_{\text{ср.вых}} = 132,531; \quad v_{\text{ср.вх}} = 92,035 .$$

Заключение

Предложен универсальный способ описания линейных систем автоматики в области времени и энергии, который пригоден для нахождения коэффициентов передачи по энергии и по скорости изменения энергии, а также нормированного времени. Представленная в работе временно-энергетическая модель позволяет использовать универсальные способы описания линейных систем автоматики.

Такой подход более информативно описывает рассматриваемые процессы, что обогащает методы анализа состояния линейных систем автоматики и позволяет проследить их динамику.

Список литературы

1. Зернов, Н. В. Теория радиотехнических цепей / Н. В. Зернов, В. Г. Карпов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1972. – 816 с.
2. Веселовский, О. Н. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / О. Н. Веселовский, Л. М. Браславский. – М. : Высш. школа, 1977. – 312 с.
3. Алгазин, Е. И. Энергетический критерий устойчивости линейных систем автоматики / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 210 – 215. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215

Dynamics of Parameters for Assessing the State of Linear Automation Systems

E. I. Algazin

*Department of Electronics and Electrical Engineering, evgeniialgazin@gmail.com;
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Keywords: transmission coefficient of a linear system; automation system; electric circuit time; electrical circuit.

Abstract: A method for describing linear automation systems is proposed in the time domain based on the classical analytical expression of the transmission coefficient. The formation of the expression of the transmission coefficient in the framework of the time-energy model of the oscillatory process at the input and

the output of the systems in question is considered. Analytical methods for describing the energy transfer coefficients, the rate of change of energy, and also normalized time are proposed. The dynamics of these transmission coefficients is considered.

References

1. Zernov N.V., Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey* [Theory of radio engineering circuits], Leningrad: Energiya, 1972, 816 p. (In Russ.)
2. Veselovskiy O.N., Braslavskiy L.M. *Osnovy elektrotehniki i elektrotekhnicheskiye ustroystva radioelektronnoy apparatury: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of electrical engineering and electrical devices of electronic equipment: a textbook for high schools], Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 312 p. (In Russ.)
3. Algazin Ye.I. [The energy criterion for the stability of linear automation systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 210-215, doi:10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215 (In Russ., abstract in Eng.)

Die Dynamik der Parameter der Bewertung des Zustandes der linearen Automatisierungssysteme

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Beschreibung linearer Automatisierungssysteme im Zeitbereich auf der Grundlage des klassischen analytischen Ausdrucks des Transmissionskoeffizienten vorgeschlagen. Es ist die Bildung des Ausdrucks des Transmissionskoeffizienten im Rahmen des Zeit-Energie-Modells des Schwingungsprozesses am Eingang und Ausgang der betrachteten Systeme untersucht. Vorgeschlagen sind analytische Methoden der Beschreibung der Energieübertragungskoeffizienten, der Koeffizienten der Geschwindigkeitsänderung der Energie, sowie auch der Koeffizienten der normalisierten Zeit. Es ist die Dynamik der Angaben der Übertragungskoeffizienten betrachtet.

Dynamique des paramètres d'évaluation de l'état des systèmes d'automatisation linéaires

Résumé: Est proposé un moyen de la description les systèmes d'automatisation linéaires dans le domaine du temps à la base de l'expression analytique classique du coefficient de la transmission. Est examinée la formation de l'expression du coefficient de la transmission dans le modèle temporo-énergétique du processus oscillatoire à l'entrée et la sortie des systèmes en question. Sont proposées des méthodes analytiques de la description des coefficients du transfert de l'énergie selon la vitesse du changement de l'énergie et du temps normalisé. Est examinée l'évolution de ces coefficients de la transmission

Автор: *Алгазин Евгений Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и электротехника», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

Рецензент: *Разинкин Владимир Павлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы радиотехники», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.