

УДК 621.373.13

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Ю.К. Рыбин

Томский политехнический университет

E-mail: rybin@camsam.tpu.ru

Предложен метод анализа колебательных систем генераторов электрических синусоидальных сигналов. Получены ограничения на передаточные функции линейных частотозависимых цепей и активных элементов, при которых в колебательной системе возможны колебания синусоидальной формы. Метод позволяет упростить синтез колебательных систем.

Ключевые слова:

Колебательная система, активный элемент, условия баланса амплитуд и баланса фаз, операционный усилитель, условия инвариантности.

Key words:

Oscillation system, active element, condition of balance amplitude and balance phase, operation amplifier, condition of invariance.

Введение

Колебательная система (КС) является основой любого генератора электрических сигналов. В ней зарождаются и устанавливаются периодические колебания. Она определяет их форму и основные параметры. Поэтому анализу и синтезу колебательных систем генераторов электрических сигналов посвящено много работ, например, [1–3]. В них рассматриваются методы анализа и синтеза КС на активных элементах: усилителях, конверторах отрицательного сопротивления, гираторах и т. д. В частности, в [1] предлагается методика синтеза КС на основе матричного метода расчёта электрических цепей. По этой методике процесс синтеза КС максимально формализован. Неудобством её применения является использование для описания элементов одной и той же КС разных матриц A , Z , Y и H . В [2] для цели синтеза используется метод графов. Причём часто методики синтеза, пригодные для КС на одних активных элементах сложно применить к КС на других элементах. В данной работе предпринята попытка создания универсальной методики анализа и синтеза КС генераторов синусоидальных сигналов.

**Постановка задачи анализа
колебательных систем методом инвариантов**

КС любого генератора должна содержать линейную частотозависимую цепь (ЛЧЗЦ) и активный элемент (АЭ), например, усилитель. На рис. 1 представлена обобщённая блок-схема колебательных систем генераторов с ЛЧЗЦ и одним АЭ.

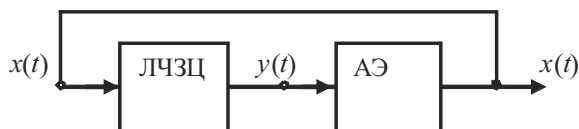


Рис. 1. Обобщённая блок-схема колебательной системы генератора

Буквами x и y на схеме обозначены электрические величины. В зависимости от типа используемого АЭ эти величины могут быть представлены либо напряжениями, либо токами¹.

На практике наиболее часто применяются трёхполюсные ЛЧЗЦ. АЭ также лучше представить в виде трёхполюсника. На рис. 2 показаны трёхполюсная ЛЧЗЦ, активный трёхполюсный элемент и их «базовое»² соединение.

Причём трёхполюсные ЛЧЗЦ и АЭ можно включить по-разному в зависимости от выбора общего, входного и выходного выводов, т. е. к базовому соединению можно применить разные топологические преобразования для получения новых схем. На рис. 2, в, показан вариант КС, в которой с точкой нулевого потенциала (общим выводом «0») соединён вывод «3» ЛЧЗЦ и вывод «с» АЭ. Соединяя с общим выводом другие выводы ЛЧЗЦ или, меняя вход и выход цепи, т. е. выполняя ротацию ЛЧЗЦ, можно получить ещё пять схем КС.

Структуры с аналогичными свойствами могут быть получены и при ротации активного элемента. Причём ротация выводов ЛЧЗЦ и АЭ даёт одинаковые структуры КС, если не учитывать способ подачи напряжения питания на АЭ. Естественно, ожидать у них и одинаковых параметров колебаний, поэтому поворот АЭ никаких преимуществ в линейную КС не привносит, а лишь затрудняет его практическую реализацию, поэтому далее не рассматривается.

Представляя конкретную ЛЧЗЦ, например, цепь Вина и усилитель, можно увидеть [4] как меняется конфигурация принципиальной схемы КС при смене внешних выводов. Естественно, что при этих преобразованиях меняются передаточные функции цепей и характеристические уравнения КС. Могут нарушаться и условия балансов амплитуд и фаз.

¹ Здесь и далее предполагается, что АЭ является идеализированным управляемым источником с частотно независимым коэффициентом передачи.

² Базовым здесь называется любое известное соединение ЛЧЗЦ и АЭ, в котором возможно выполнение условий балансов амплитуд и фаз.

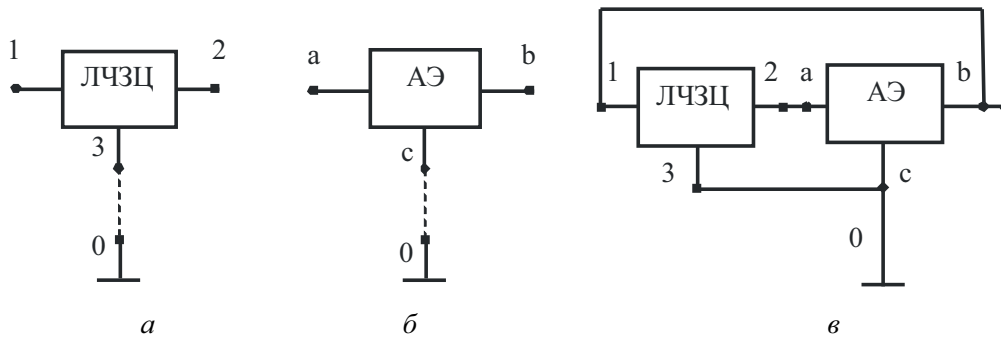


Рис. 2. Схемы: а) трёхполюсной ЛЧЗЦ; б) АЭ; в) их «базового» включения

В качестве активного элемента с однонаправленной передачей энергии можно применить источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН), источник тока, управляемый током (ИТУТ), источник тока, управляемый напряжением (ИТУН) или источник напряжения, управляемый током (ИНУН). Таким образом, с одной ЛЧЗЦ, применяя различные АЭ и, изменяя включение выводов ЛЧЗЦ, можно создать 24 структуры, среди которых могут быть и новые структуры. В каких из них можно выполнить условия балансов амплитуд и фаз и получить периодические колебания и надлежит определить дальше. Естественно, без знания внутренней схемы ЛЧЗЦ и АЭ это сделать невозможно.

Схема любой ЛЧЗЦ содержит R , L и C -элементы, соединённые определённым образом, но, каким бы сложным не было их соединение, между внешними выводами в них всегда образуются взаимные проводимости. Поэтому на рис. 3, а, ЛЧЗЦ представлена тремя проводимостями.

Для определения проводимостей G_1 , G_2 и G_3 к любой цепи можно применить матричный метод [2] с последующим понижением порядка матрицы.

На рис. 3, а, показана структура цепи, в которой между выводами цепи существуют все взаимные проводимости: G_1 , G_2 , G_3 . Примером такой структуры является структура LC -цепи в ёмкостной или индуктивной трёхточке. На рис. 3, б, показана другая структура цепи, в которой отсутствует проводимость G_1 . Примером здесь может быть структура RC -цепи Вина. Причём топологически

последняя изоморфна структурам, в которых отсутствовали бы проводимости G_2 или G_3 . Отсюда следует, что для структуры на рис. 3, б, имеются ещё две изоморфные структуры.

На рис. 3, в, отсутствуют две проводимости: G_1 и G_3 . Этой структуре тоже можно указать две изоморфные структуры. Но все структуры с одной проводимостью превращают трёхполюсную цепь в двухполюсную.

Итак, для определения передаточной функции цепи на рис. 3, а, запишем её особенную матрицу проводимостей

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{G}_1 + \dot{G}_2 & -\dot{G}_2 & -\dot{G}_1 \\ -\dot{G}_2 & \dot{G}_2 + \dot{G}_3 & -\dot{G}_3 \\ -\dot{G}_1 & -\dot{G}_3 & \dot{G}_1 + \dot{G}_3 \end{bmatrix},$$

При соединении одного из выводов цепи с общим узлом получим три неособенных матрицы, которые и будем использовать далее

$$\dot{Y}_1 = \begin{bmatrix} \dot{G}_2 + \dot{G}_3 & -\dot{G}_3 \\ -\dot{G}_3 & \dot{G}_1 + \dot{G}_3 \end{bmatrix}, \quad \dot{Y}_2 = \begin{bmatrix} \dot{G}_1 + \dot{G}_2 & -\dot{G}_1 \\ -\dot{G}_1 & \dot{G}_1 + \dot{G}_3 \end{bmatrix},$$

$$\dot{Y}_3 = \begin{bmatrix} \dot{G}_1 + \dot{G}_2 & -\dot{G}_2 \\ -\dot{G}_2 & \dot{G}_2 + \dot{G}_3 \end{bmatrix},$$

где $\dot{Y}_1$, $\dot{Y}_2$ и $\dot{Y}_3$, соответственно, матрицы цепи, полученные при соединении 1, 2 или 3 узлов ЛЧЗЦ с общим выводом «0».

С учётом матрицы проводимости цепи и матрицы активного элемента можно определить вторичные параметры ЛЧЗЦ и АЭ виде отношения опре-

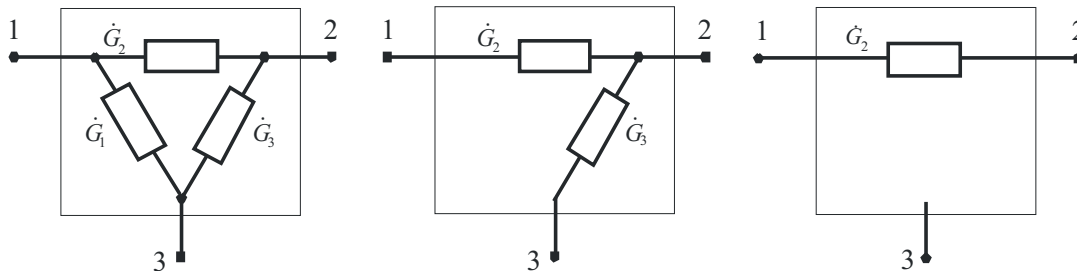


Рис. 3. Структуры трёхполюсной ЛЧЗЦ с: а) тремя; б) двумя и в) одной проводимостью

делителей матриц [2]. В этом случае характеристические уравнения несложно выписать через алгебраические дополнения матриц. Например, при соединении вывода 3 ЛЧЗЦ с общим проводом, получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta_{11}^{\gamma} - \Delta_{12}^{\gamma} K_u &= 0, & \Delta_{11}^{\gamma} \Delta_{aa}^{K_u} - \Delta_{12}^{\gamma} \Delta_{ab}^{K_u} &= 0, \\ \Delta_{22}^{\eta} - \Delta_{12}^{\eta} K_i &= 0, & \Delta_{22}^{\eta} \Delta_{bb}^{K_i} - \Delta_{12}^{\eta} \Delta_{ab}^{K_i} &= 0, \\ \Delta^{\nu} - \Delta_{12}^{\nu} K_g &= 0, & \Delta^{\nu} \Delta_{aa,bb}^{K_g} - \Delta_{12}^{\nu} \Delta_{ab}^{K_g} &= 0, \\ \Delta_{11,22}^{\xi} - \Delta_{12}^{\xi} K_z &= 0, & \Delta_{11,22}^{\xi} \Delta^{K_z} - \Delta_{12}^{\xi} \Delta_{ab}^{K_z} &= 0, \end{aligned}$$

где Δ_{11}^{γ} , Δ_{12}^{γ} , Δ_{22}^{η} , Δ_{12}^{η} , Δ^{ν} , Δ_{12}^{ν} , $\Delta_{11,22}^{\xi}$, Δ_{12}^{ξ} — алгебраические дополнения и определитель матриц коэффициентов передачи ЛЧЗЦ по напряжению, току, передаточного сопротивления и передаточной проводимости цепи, соответственно, с индексами γ , η , ν и ξ ; $\Delta_{aa}^{K_u}$, $\Delta_{bb}^{K_i}$, $\Delta_{ab}^{K_i}$, $\Delta_{aa,bb}^{K_g}$, $\Delta_{ab}^{K_g}$, Δ^{K_z} , $\Delta_{ab}^{K_z}$ — алгебраические дополнения и определитель матриц коэффициентов передачи АЭ.

Полученные уравнения служат матричными характеристическими уравнениями КС. Например, определяя алгебраические дополнения канонической матрицы Y_3 , соответствующей соединению вывода 3 с общим проводом, можно записать характеристические уравнения КС с учётом проводимостей $\dot{G}_1$, $\dot{G}_2$, $\dot{G}_3$ и АЭ типа, соответственно, ИНУН, ИТУТ, ИТУН и ИНУТ

$$\begin{aligned} (1 - K_u) \dot{G}_2 + \dot{G}_3 &= 0, \\ (1 - K_i) \dot{G}_2 + \dot{G}_1 &= 0, \\ (\dot{G}_1 + \dot{G}_3 - K_g) \dot{G}_2 + \dot{G}_1 \dot{G}_3 &= 0, \\ 1 - K_z \dot{G}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (*)$$

Полученные равенства позволяют определить возможные стратегии формирования требований к ЛЧЗЦ и АЭ при синтезе конкретной схемы. Прежде всего, из приведённых равенств (*) следует, что при использовании ИНУН характеристическое уравнение не содержит проводимость $\dot{G}_1$. Следовательно, она не влияет на условия выполнения равенства, и может отсутствовать в ЛЧЗЦ. То же самое можно сказать о проводимости $\dot{G}_3$ в схеме КС с ИТУТ, отсутствующей во втором равенстве. Колебательная система с АЭ типа ИТУН может выполняться при наличии всех трёх проводимостей в ЛЧЗЦ. Однако, КС может выполняться и при $\dot{G}_1=0$, либо $\dot{G}_3=0$. В этом случае третье равенство упрощается и превращается либо в $(\dot{G}_3 - K_g) \dot{G}_2 = 0$, либо в $(\dot{G}_1 - K_g) \dot{G}_2 = 0$. Более того, проводимость $\dot{G}_2$ в них формально может быть выбрана любой, не равной нулю. Тогда они принимают вид $\dot{G}_3 - K_g = 0$ и $\dot{G}_1 - K_g = 0$. В этом случае реализация КС может быть выполнена на двухполюсной цепи. Анализируя последнее равенство в (*), видим, что в КС с АЭ типа ИНУТ в ЛЧЗЦ одновременно также могут отсутствовать две проводимости $\dot{G}_1$ и $\dot{G}_3$, и тогда трёхполюсная цепь превращается в двухполюсную. Известно, что условия балансов амплитуд и фаз в КС с безынерционным АЭ могут выполняться только с ЛЧЗЦ не менее второго порядка.

Поэтому, двухполюсник с одной проводимостью, может быть только индуктивно ёмкостным.

Результаты анализа

Проведённый анализ позволяет дать следующие рекомендации для синтеза КС:

- проводимость $\dot{G}_2$ в ЛЧЗЦ с однонаправленным АЭ должна присутствовать для образования контура обратной связи;
- при отсутствии проводимости $\dot{G}_2$ в ЛЧЗЦ колебательную систему нужно создавать на АЭ с двунаправленной передачей сигнала;
- КС с индуктивно — ёмкостными ЛЧЗЦ можно реализовать на всех типах однонаправленных АЭ;
- КС с резистивно-ёмкостными ЛЧЗЦ можно выполнять только с ИНУН, ИТУТ и ИТУН (при наличии всех проводимостей $\dot{G}_1$, $\dot{G}_2$ и $\dot{G}_3$);

Соединяя выводы 2 или 1 ЛЧЗЦ с общим проводом, можно выписать аналогичные характеристические уравнения других КС. Все они приведены в табл. 1, где названы буквами и цифрами, обозначающими по порядку выводы цепи: вход, выход и общий провод.

Анализируя приведённые в табл. 1 передаточные функции частотозависимых цепей, несложно заметить, что они связаны следующими уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_u^a + \dot{\gamma}_u^b = 1, & \quad \dot{\eta}_i^a + \dot{\eta}_i^e = 1, & \left\{ \begin{array}{l} \dot{\gamma}_u^a = \dot{\eta}_i^b, \\ \dot{\gamma}_u^b + \dot{\gamma}_u^r = 1, \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} \dot{\eta}_i^b + \dot{\eta}_i^r = 1, \\ \dot{\gamma}_u^e + \dot{\gamma}_u^r = 1; \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} \dot{\gamma}_u^a = \dot{\eta}_i^b, \\ \dot{\gamma}_u^b = \dot{\eta}_i^r, \\ \dot{\gamma}_u^e = \dot{\eta}_i^r; \end{array} \right. \\ \dot{\gamma}_u^b = \dot{\eta}_i^a, & \quad \dot{\nu}_z^a = \dot{\nu}_z^b, & \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_g^a = \dot{\xi}_g^b, \\ \dot{\gamma}_u^r = \dot{\eta}_i^b, \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} \dot{\nu}_z^b = \dot{\nu}_z^r, \\ \dot{\gamma}_u^e = \dot{\eta}_i^r; \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_g^b = \dot{\xi}_g^r, \\ \dot{\nu}_z^r = \dot{\nu}_z^e; \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_g^r = \dot{\xi}_g^e, \\ \dot{\nu}_z^e = \dot{\nu}_z^e. \end{array} \right. \end{aligned}$$

Приведённые соотношения передаточных функций не зависят от схемы соединений элементов в электрической цепи и инвариантны к ней, поэтому могут быть названы системой инвариантов преобразования цепи. Нужно помнить, что передаточные функции $\dot{\gamma}_u$, $\dot{\eta}_i$, $\dot{\nu}_z$ и $\dot{\xi}_g$ имеют разную размерность: $\dot{\gamma}_u$ и $\dot{\eta}_i$ — безразмерные, а $\dot{\nu}_z$ и $\dot{\xi}_g$ — размерные функции, имеющие размерности сопротивления и проводимости.

Первые две системы инвариантов показывают, что если определена передаточная функция по напряжению или току одной из цепей (назовём её базовой), то для этой цепи существует другое включение этой же цепи, передаточная функция, которой находится как дополнение до единицы к передаточной функции базовой цепи. Единице равны суммы передаточных функций тех цепей, которые в качестве выходного узла имеют узел с одним и тем же номером (в первой строке таблицы это вывод 2), а входной и общий узлы меняются местами. Эти цепи в [3] названы дополняющимися друг друга, именно потому, что, сумма их передаточных функций равна единице. Можно подметить и дру-

Таблица 1. Основные функции колебательных систем с разными АЭ и разным включением ЛЧЗЦ

Тип соединения ЛЧЗЦ	Тип АЭ	ИНУН	ИПУТ	ИПУН	ИНУТ
	Коэффициент передачи АЭ	K_u	K_i	K_g	K_z
«А» (213)	Выражение передаточной функции ЛЧЗЦ и характеристическое уравнение КС				
«Б» (213)		$\dot{\gamma}_u^a = \frac{\dot{G}_2}{\dot{G}_2 + \dot{G}_3}$	$\dot{\eta}_i^a = \frac{\dot{G}_2}{\dot{G}_1 + \dot{G}_2}$	$\dot{\nu}_z^a = \frac{\dot{G}_2}{ \dot{Y} }$	$\dot{\xi}_g^a = \dot{G}_2$
		$(1 - K_u^a)\dot{G}_2 + \dot{G}_3 = 0$	$(1 - K_i^a)\dot{G}_2 + \dot{G}_1 = 0$	$(\dot{G}_1 + \dot{G}_3 - K_g^a)\dot{G}_2 + \dot{G}_1\dot{G}_3 = 0$	$1 - K_z^a\dot{G}_2 = 0$
		$\dot{\gamma}_u^6 = \frac{\dot{G}_2}{\dot{G}_1 + \dot{G}_2}$	$\dot{\eta}_i^6 = \frac{\dot{G}_2}{\dot{G}_2 + \dot{G}_3}$	$\dot{\nu}_z^6 = \frac{\dot{G}_2}{ \dot{Y} }$	$\dot{\xi}_g^6 = \dot{G}_2$
«В» (321)		$(1 - K_u^6)\dot{G}_2 + \dot{G}_1 = 0$	$(1 - K_i^6)\dot{G}_2 + \dot{G}_3 = 0$	$(\dot{G}_1 + \dot{G}_3 - K_g^6)\dot{G}_2 + \dot{G}_1\dot{G}_3 = 0$	$1 - K_z^6\dot{G}_2 = 0$
		$\dot{\gamma}_u^8 = \frac{\dot{G}_3}{\dot{G}_2 + \dot{G}_3}$	$\dot{\eta}_i^8 = \frac{\dot{G}_3}{\dot{G}_1 + \dot{G}_3}$	$\dot{\nu}_z^8 = \frac{\dot{G}_3}{ \dot{Y} }$	$\dot{\xi}_g^8 = \dot{G}_3$
		$(1 - K_u^8)\dot{G}_3 + \dot{G}_2 = 0$	$(1 - K_i^8)\dot{G}_3 + \dot{G}_1 = 0$	$(\dot{G}_1 + \dot{G}_2 - K_g^8)\dot{G}_3 + \dot{G}_1\dot{G}_2 = 0$	$1 - K_z^8\dot{G}_1 = 0$
«Г» (231)		$\dot{\gamma}_u^r = \frac{\dot{G}_3}{\dot{G}_1 + \dot{G}_3}$	$\dot{\eta}_i^r = \frac{\dot{G}_3}{\dot{G}_2 + \dot{G}_3}$	$\dot{\nu}_z^r = \frac{\dot{G}_3}{ \dot{Y} }$	$\dot{\xi}_g^r = \dot{G}_3$
		$(1 - K_u^r)\dot{G}_3 + \dot{G}_1 = 0$	$(1 - K_i^r)\dot{G}_3 + \dot{G}_2 = 0$	$(\dot{G}_1 + \dot{G}_2 - K_g^r)\dot{G}_3 + \dot{G}_1\dot{G}_2 = 0$	$1 - K_z^r\dot{G}_3 = 0$
		$\dot{\gamma}_u^n = \frac{\dot{G}_1}{\dot{G}_1 + \dot{G}_2}$	$\dot{\eta}_i^n = \frac{\dot{G}_1}{\dot{G}_1 + \dot{G}_3}$	$\dot{\nu}_z^n = \frac{\dot{G}_1}{ \dot{Y} }$	$\dot{\xi}_g^n = \dot{G}_1$
«Д» (312)		$(1 - K_u^n)\dot{G}_1 + \dot{G}_2 = 0$	$(1 - K_i^n)\dot{G}_1 + \dot{G}_3 = 0$	$(\dot{G}_2 + \dot{G}_3 - K_g^n)\dot{G}_1 + \dot{G}_2\dot{G}_3 = 0$	$1 - K_z^n\dot{G}_1 = 0$
		$\dot{\gamma}_u^e = \frac{\dot{G}_1}{\dot{G}_1 + \dot{G}_3}$	$\dot{\eta}_i^e = \frac{\dot{G}_1}{\dot{G}_1 + \dot{G}_2}$	$\dot{\nu}_z^e = \frac{\dot{G}_1}{ \dot{Y} }$	$\dot{\xi}_g^e = \dot{G}_1$
		$(1 - K_u^e)\dot{G}_1 + \dot{G}_3 = 0$	$(1 - K_i^e)\dot{G}_1 + \dot{G}_2 = 0$	$(\dot{G}_2 + \dot{G}_3 - K_g^e)\dot{G}_1 + \dot{G}_2\dot{G}_3 = 0$	$1 - K_z^e\dot{G}_1 = 0$

гие особенности передаточных функций цепей. Например, то, что сумма всех передаточных функций одной и той же ЛЧЗЦ при всех возможных соединениях выводов постоянна, не зависит от частоты и равна трём.

Третья система инвариантов показывает связь передаточных функций цепей $\dot{\gamma}_u$ и $\dot{\eta}_i$ по напряжению и току. На основании этой системы можно утверждать, что если известна передаточная функция цепи по напряжению, то для этой цепи есть такая же передаточная функция по току. Отсюда следует, что если существует базовая ЛЧЗЦ, которая образует с АЭ типа ИНУН КС, то для неё существует ЛЧЗЦ с другим включением выводов, которая образует с АЭ типа ИТУТ такую же КС³.

Четвёртая и пятая системы инвариантов устанавливают связь между передаточными сопротивлениями и передаточными проводимостями цепи $\dot{\gamma}_i$ и $\dot{\xi}_g$ при разных включениях.

Выясним, как отражаются свойства инвариантов ЛЧЗЦ на коэффициенте передачи АЭ (усилителя) при реализации в колебательной системе генератора. Запишем уравнение для колебательной системы генератора с ЛЧЗЦ со структурой типа «а» (123) $K_u^a \dot{U}_{23} = \dot{U}_{13}$, поделив левую и правую части уравнения на $\dot{U}_{13}$ получим $K_u^a \dot{\gamma}_u^a = 1$. Аналогично для колебательной системы со структурой типа «в», имеем, $K_u^b \dot{U}_{21} = \dot{U}_{31}$, поделив левую и правую части на $\dot{U}_{31}$ получим выражение $K_u^b \dot{\gamma}_u^b = K_u^b (1 - \gamma_u^a) = 1$. Откуда, находим соотношение коэффициентов усиления усилителей в колебательных системах с основной и дополняющей цепями $K_u^b = -K_u^a / (1 - K_u^a)$. Усилитель с таким коэффициентом усиления для КС с дополняющей цепью называют комплементарным усилителем.

На основании табл. 1 установим связь и между коэффициентами передачи АЭ:

$$\left. \begin{aligned} K_u^a &= -K_u^b / (1 - K_u^b), \\ K_u^b &= -K_u^a / (1 - K_u^a), \\ K_u^c &= -K_u^r / (1 - K_u^r), \\ K_u^r &= -K_u^c / (1 - K_u^c); \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} K_u^a &= K_i^b, \quad K_u^b = K_i^a; \\ K_u^b &= K_i^r, \quad K_u^r = K_i^b; \\ K_u^c &= K_i^e, \quad K_u^e = K_i^c. \end{aligned} \right\}.$$

Небольшое пояснение надо сделать относительно коэффициента усиления необходимое для понимания условий выполнения баланса амплитуд и баланса фаз в КС. Для выполнения баланса амплитуд обычно не требуется большого коэффициента передачи. Поэтому, заданное значение K_u^a по-

лучают, используя операционный усилитель (ОУ) с большим коэффициентом усиления K_{oy} с резистивной обратной связью β для его понижения. В зависимости от значения фазового сдвига ЛЧЗЦ коэффициент усиления K_u^a может быть как положительным, так и отрицательным. В таблице 2 приведены соотношения для выбора коэффициентов усиления усилителей при разных параметрах ЛЧЗЦ.

Таблица 2. Связь коэффициентов усиления усилителей

КС на основе ЛЧЗЦ			
базовой		дополняющей	
Фазовый сдвиг цепи при частоте ω_0	Коэффициент усиления АЭ	Фазовый сдвиг цепи при частоте ω_0	Коэффициент усиления АЭ
$\varphi_\gamma^a = 0$	$K_u^a = \frac{K_{oy}}{1 + K_{oy}\beta}$	$\varphi_\gamma^b = 0$	$K_u^b = \frac{-K_{oy}}{1 - K_{oy}(1 - \beta)}$
$\varphi_\gamma^a = \pi$	$K_u^a = \frac{-K_{oy}}{1 + K_{oy}\beta}$	$\varphi_\gamma^b = 0$	$K_u^b = \frac{K_{oy}}{1 + K_{oy}(1 + \beta)}$

Характеристическими уравнениями, табл. 1, описываются практически все известные схемы КС LC- и RC-генераторов с одним АЭ. Например, уравнением ЛЧЗЦ цепи с включением «а» и АЭ ИТУН описывается КС индуктивной или ёмкостной трёхточек. Уравнением ЛЧЗЦ цепи «а» и АЭ типа ИНУН описывается КС генератора с цепью Вина, уравнением ЛЧЗЦ цепи «в» и АЭ типа ИНУН описывается КС типа повернутой ёмкостной трёхточки и т. д.

Выводы

На основе матриц проводимости предложен метод анализа колебательных систем генераторов электрических сигналов, который описывает практически все известные структуры колебательных систем с одной частото задающей цепью и одним активным однонаправленным элементом.

Получены системы уравнений, определяющие свойства инвариантности передаточных функций частото задающих цепей колебательных систем.

Установлены свойства комплементарности коэффициентов передачи активных элементов, позволяющие проектировать колебательные системы на основе взаимно дополняющих цепей.

На основе уравнений инвариантности частото задающей цепи и комплементарности коэффициентов передачи активных элементов (усилителей) предложен метод синтеза колебательных систем.

³ С точки зрения линейной теории такие колебательные системы действительно одинаковы, но при практической реализации режимов активных элементов они могут отличаться уровнем нелинейных искажений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.Г. RC-генераторы синусоидальных колебаний. — М.: Связь, 1976. — 208 с.
2. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. — М.: Советское радио, 1976. — 608 с.
3. Волгин Л.И. Методы топологического преобразования электрических цепей. — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1982. — 108 с.
4. Рыбин Ю.К. Электронные устройства. — Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2003. — 264 с.

Поступила 12.09.2010 г.

УДК 621.373.4/5:681.8

СОГЛАСОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АППАРАТОВ

В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко

Бийский технологический институт

E-mail: vnh@bti.sechna.ru

Статья посвящена решению проблемы согласования пьезоэлектрической колебательной системы с электронным генератором для поддержания оптимального режима передачи энергии от электронного генератора к пьезоэлектрической колебательной системе. Представлены результаты, подтверждающие эффективность предложенного способа согласования.

Ключевые слова:

Ультразвук, пьезоэлектрическая колебательная система, согласование, компенсация, резонансная частота.

Key words:

Ultrasonic, piezoelectric oscillation system, matching, compensation, resonance frequency.

Для ультразвуковой (УЗ) обработки технологических сред и материалов используются аппараты, обеспечивающие преобразование электрической энергии промышленной сети в УЗ колебания и ввод их в обрабатываемую среду. Независимо от назначения, УЗ аппараты состоят из электронного генератора и УЗ колебательной системы (УЗКС). Электронный генератор осуществляет преобразование энергии электрической сети переменного тока в электрические колебания УЗ частоты для питания преобразователя УЗКС. Преобразователь обеспечивает преобразование электрических колебаний в механические колебания излучающей (рабочей) поверхности и ввод их в обрабатываемую среду или материал.

Для реализации процесса преобразования в ультразвуковых аппаратах используется магнитострикционные или пьезоэлектрические преобразователи.

В настоящее время, благодаря простоте изготовления и повышенному КПД наибольшее распространение получили УЗКС с пьезопреобразователями.

В ультразвуковом аппарате УЗКС является комплексной электрической нагрузкой на генератор и её непосредственное подключение к нему не обеспечивает максимальной эффективности передачи энергии из-за отсутствия системы согласования. Для выявления причин неоптимального согласования пьезоэлектрического преобразователя и электронного генератора рассмотрим, представ-

ленную на рис. 1 физическую (электрическую) эквивалентную схему замещения колебательной системы с пьезоэлектрическим преобразователем, работающей в нерезонансном режиме (вблизи резонанса) [1].

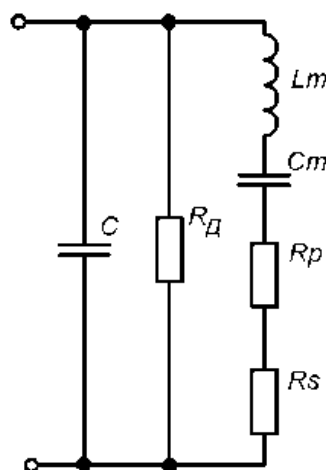


Рис. 1. Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы вблизи резонансной частоты

В представленной схеме [1] индуктивность L_m эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_m — гибкости, активное сопротивление R_p — сопротивлению механических потерь, R_s — сопротивлению излучения колебательной системы, C —