УДК 621.317.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ РЕЖИМОВ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

В.А. Иваненко*
E-mail: zlata_ne@bk.ru

А.Н. Зеленин
Кандидат технических наук, профессор, преподаватель*
*Кафедра «Сети связи»
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166
Контактный тел.: (057) 345-00-83

У статті на основі аналізу лінійних моделей виявлені типові режими роботи автогенераторних перетворювачів інформаційних сигналів (АГП ІС) певного класу, отримані умови реалізації і характеристики цих режимів. Отримані аналітичні співвідношення, які можуть служити основою для аналітичного розрахунку АГП

Ключові слова: автогенераторний перетворювач інформаційних сигналів (АГП ІС), область стійкості, двохпороговий автогенераторний датчик, додатковий реактивний елемент

В статье на основе анализа линейных моделей выявлены типовые режимы работы автогенераторных преобразователей информационных сигналов (АГП ИС) определенного класса, получены условия реализации и характеристики этих режимов. Получены аналитические соотношения, которые могут служить основой для аналитического расчета АГП

Ключевые слова: Автогенераторный преобразователь информационных сигналов (АГП ИС), область устойчивости, двухпороговый автогенераторный датчик, добавочный реактивный элемент

In the article, typical modes of informative signals' autogenerative transformers (AGT IS) of certain class, based on the linear models analysis, have been revealed; realization conditions and modes description have been gotten. Analytical correlations that can serve as analytical calculation of AGT basis have been obtained

Key words: informative signals' autogenerative transformers (AGT IS), stability area, two-threshold autogenerative sensor, additional jet element

1. Введение

Развитие инфокоммуникационной структуры государства (региона, города и т.п.) приводит к конвергенции (взаимопроникновению и объединению) различных сетей (систем), что отражает тенденцию развития сложных инфокоммуникационных структур. Наиболее четко эта тенденция проявилась в области телекоммуникационных сетей, где различные по назначению и принципам организации сети операторов объединяются в сеть нового поколения (NGN) с целью расширения спектра и качества предоставляемых услуг. Однако телекоммуникационная сеть, как транспортная среда, начинает играть роль базового системного элемента и в других сетях и системах, ранее развивавшихся как самостоятельные (обособленные) объекты человеческой деятельности. Наглядными примерами этого являются информационно-измерительные системы и автоматизированные системы управления, сети контроля медицинских параметров человека (дистанционная диагностика) в которых измерительная информация от контролируемого объекта (в данном случае – человека) передается в специализированный медицинский центр средствами проводной или радиосвязи и т.п. В странах Западной Европы по аналогичным принципам собирается информация со счетчиков расхода газа, воды, теплоносителей и т.п. от индивидуальных потребителей. Показательным примером «интеграционной» составляющей является единая информационно-измерительная и телекоммуникационная сеть современного автомобиля, обеспечивающая водителю широкий перечень – от информации от сотен датчиков по техническому состоянию агрегатов и узлов автомобиля до информации о местоположении автомобиля и предоставления типовых телекоммуникационных услуг (передача аудио, видео и т.п.). В этом же ряду и использование телекоммуникационной сети в здании для объединения элементов (датчиков) как систем охранной сигнализации, так и систем сбора измерительной информации по линии ЖКХ («умный дом»). Понятно, что подобных примеров можно привести очень много, но уже из того, что было сказано, можно уверенно говорить о том, что идея объединения инфокоммуникационных структур в единую сеть на основе и по принципам телекоммуникаций – отражает современные тенденции развития сложных инженерных систем.

До недавнего времени каждая из отдельных сетей развивалась по своим законам и за счет «внутренних ресурсов». Конвергенция сетей приводит к тому, что особенности каждой из сетей должны будут найти свое «отражение» в этой новой объединенной сети. Если использовать телекоммуникационную сетевую терминологию, то расширение услуг, предоставляемых сетью, требует пересмотра всей сетевой идеологии, т.к. «конвергенция» – это не просто «аддитивное» объединение сетей в одну, а реализация такой сети, которая будет обеспечивать требуемый перечень услуг за счет технологических ресурсов этой новой сети.

Такое положение поставило на повестку дня и новые практические вопросы: от согласования терминологии до формирования концептуальных подходов к проектированию как средств сетевой периферии, так и принципов взаимодействия элементов сети. Для иллюстрации такого положения укажем на то, что, например, применительно к автогенераторным датчикам специалисты систем контроля и управления используют термин «чувствительный элемент» (изменение параметра которого отражается в изменении одного или нескольких параметров генерируемых колебаний однозначно связанного с изменением контролируемого параметра), а в радиотехнике и телекоммуникациях это «отражение» называют термином «модуляция». Но если то и другое устройство (автогенераторный датчик и частотный модулятор) выполняют функции своеобразного преобразователя информационных сигналов, то может быть так его и называть (по крайней мере, в дальнейшем будущем мы будем использовать именно этот термин – автогенераторный преобразователь (АГП) информационных сигналов (ИС)). Это не терминологические нюансы, а предпосылка к поиску таких технологических подходов и таких схемотехнических решений, которые в принципе способны выполнить функции сетевого интерфейса в различных технических приложениях. Это предполагает «модульную идеологию» в построении таких преобразователей (применительно к АГП – базовый модуль, который системно «специализируется» внешними по отношении к нему техническими или программными средствами).

Отсюда следует вывод об актуальности исследований в части поиска методов и технических средств системно универсальных преобразователей информационных сигналов, которые принципиально могут решать разноплановые задачи как вторичных измерительных преобразователей, так и преобразователей информационных сигналов в телекоммуникационных системах (модуляторы, расширители спектра и т.п.).

Один из возможных подходов к решению этой проблемы заложен в [2], где для формирования дискретных частотных сигналов использован способ изменения параметров колебательного контура путем включения в контур LC добавочных емкостей или индуктивностей. В зависимости от способа включения добавочной емкости C_4 или индуктивности L_4 возможны 4 варианта эквивалентных схем контуров LC (см. табл. 1). Однако, если в [2] сопротивление ключей (подключающих элементов R-типа), стремились обеспечивать либо равным нулю, либо бесконечности, т.е. исключить влияние этих элементов на свойства контуров, то в нашем случае интерес представляют как раз режимы с конечными значениями сопротивлений подключающих элементов R-типа.

В данном сообщении рассмотрены лишь аспекты по выявлению особенностей АГП ИС на базе подобных LC контуров для реализации условий двухпороговых автогенераторных датчиков информационно-измерительных систем и АСУ ТП.

2. Исследование условий реализации типовых режимов

При разработке математических моделей, характеризующих АГП ИС, алгоритм формирования измерительного сигнала в которых может быть представлен следующим образом

$$R \Rightarrow (C, L) \Rightarrow \omega, \qquad (1)$$

приняты следующие общие ограничения:

- элементы подключаемой цепи и цепь в целом не изменяют режима активного элемента по постоянному току;

- частотный диапазон АГП ИС достаточно низок, что делает правомерным исключение реактивных параметров активного элемента базового модуля АГП из моделей.

Дополнительные ограничения для каждой из моделей будут оговариваться в тексте.

Рассмотрим условия реализации алгоритма (1) на модели АГП ИС с параллельным подключением добавочного конденсатора $C_д$ к основной емкости контура (схема АГП-$C_{пар}$, рис. 1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $R^{(-)}$ – эквивалент представленного двухполюсником отрицательного сопротивления активного элемента базового модуля АГ; C – емкость контура базового модуля АГ; L и R_L – индуктивность и малое сопротивление (потери) катушки индуктивности базового модуля АГ; $C_д$ – добавочная емкость и $R_д$ – чувствительный элемент R-типа подключаемой цепи.

Поскольку алгоритм (1) предполагает наличие колебаний в системе, то условиями его реализации будут условия возникновения колебаний.

В момент возникновения колебаний АГП ИС можно рассматривать как линейную автоколебательную систему, поэтому исследования начального этапа установления автоколебаний можно провести с помощью теории, использующей линейные дифференциальные уравнения.

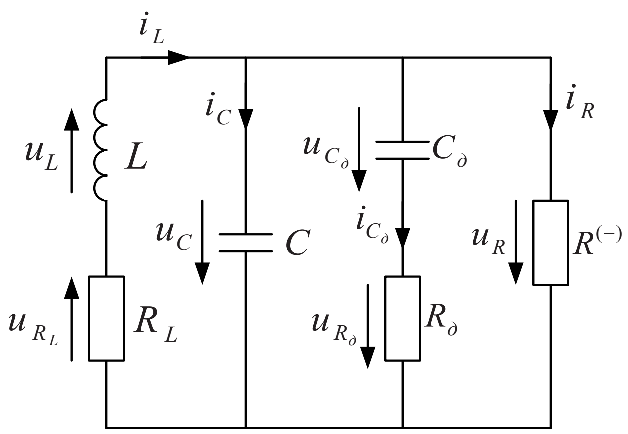


Рис. 1. Эквивалентная схема АГП-

Для выбранных в схеме (рис. 1) направлений токов и напряжений можно написать следующие соотношения:

$$\begin{cases} i_R = \dfrac{u_{R^{(-)}}}{R^{(-)}} = \dfrac{-u_{R^{(-)}}}{|R_0|}; \\ i_L = i_{C_д} + i_{R_д} + i_C; \\ i_{C_д} = C_д \dfrac{du_{C_д}}{dt}; \\ i_C = C\dfrac{du_C}{dt}; \\ u_L = L\dfrac{di_L}{dt}; \\ u_{C_д} + i_{C_д}R_д = u_{R_д}; \\ i_L R_L + u_L = u_{R_L}; \\ i_L R_L + u_L = -u_C, \end{cases} \quad (2)$$

где $|R_0|$ – модуль отрицательного сопротивления активного элемента в рабочей точке.

В качестве искомой функции выберем ток i_L, протекающий в индуктивной ветви контура.

После несложных преобразований и приведения членов при производных одного порядка получаем линейное однородное дифференциальное уравнение третьего порядка, описывающее работу АГП-С$_{пар}$ в момент возникновения колебаний:

$$CL\frac{d^3i_L}{dt^3} + \left[\frac{L}{R_д}\left(1+\frac{C}{C_д}\right) + R_L C - \frac{L}{|R_0|}\right]\frac{d^2i_L}{dt^2} + \left[1+\frac{R_L}{R_д}\left(1+\frac{C}{C_д}\right) - \frac{L}{C_д R_д|R_0|} - \frac{R_L}{|R_0|}\right]\frac{di_L}{dt} + \frac{1}{C_д R_д}\left(1-\frac{R_L}{|R_0|}\right)i_L = 0 \quad . \quad (3)$$

Это уравнение можно записать в общем виде, как

$$a_0\frac{d^3i_L}{dt^3} + a_1\frac{d^2i_L}{dt^2} + a_2\frac{di_L}{dt} + a_3 i_L = 0\,, \quad (4)$$

где

$$a_0 = CL\,,$$

$$a_1 = \frac{L}{R_д}\left(1+\frac{C}{C_д}\right) + R_L C - \frac{L}{|R_0|}\,,$$

$$a_2 = 1+\frac{R_L}{R_д}\left(1+\frac{C}{C_д}\right) - \frac{L}{C_д R_д|R_0|} - \frac{R_L}{|R_0|}\,,$$

$$a_3 = \frac{1}{C_4 R_4}\left(1-\frac{R_L}{|R_0|}\right).$$

Решение уравнения (4), как известно [3], имеет вид:

$$i_L = \sum_{i=1}^{3} A_i e^{p_i t}\,, \quad (5)$$

где A_i – постоянные, а p_i – корни характеристического уравнения

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0\,, \quad (6)$$

полученного из (3) или (4) заменой $i_L = e^{pt}$.

По критерию Гурвица необходимыми и достаточными условиями устойчивости (покоя) системы, описываемой линейным дифференциальным уравнением третьего порядка, являются неравенства [1]:

$$a_0 > 0\,,\ a_1 > 0\,,\ a_2 > 0\,,\ a_3 > 0\,,\ a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0\,. \quad (7)$$

Условия устойчивости (7) удобно рассматривать в некотором пространстве параметров схемы. Для этого перейдем к безразмерным относительным единицам.

Применив в (4) замену

$$\frac{R_L}{|R_0|} = r_L\,;\ \frac{R_4}{|R_0|} = r\,;\ \frac{L}{C|R_0|^2} = \rho'\,;\ pC|R_0| = p'\,;\ \frac{C}{C_д} = \alpha\,, \quad (8)$$

где $p = \dfrac{di_L}{dt}$, а $p' = \dfrac{di_L}{d\tau}$ - производная по новому относительному времени τ, связанному со временем t соотношением $\tau = \dfrac{t}{C|R_0|}$, и, вычислив значения производных p' следующим образом:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{di_L}{d\tau}\cdot\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{C|R_0|}\cdot\frac{di_L}{d\tau}\,;$$

$$\frac{d^2i_L}{dt^2} = \frac{d\left(\dfrac{di_L}{dt}\right)}{dt} = \frac{d}{d\tau}\left(\frac{1}{C|R_0|}\cdot\frac{di_L}{d\tau}\right)\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{C^2|R_0|^2}\cdot\frac{d^2i_L}{d\tau^2}\,;$$

$$\frac{d^3i_L}{dt^3} = \frac{1}{C^3|R_0|^3}\cdot\frac{d^3i_L}{d\tau^3}\,, \quad (9)$$

получим характеристическое уравнение схемы АГП-С$_{пар}$ в относительных единицах:

$$\rho' p'^3 + p'^2\left[\frac{\rho'(1+\alpha)}{r} + r_L - \rho'\right] + \left[1 + \frac{r_L(1+\alpha)}{r} - \frac{\rho'\alpha}{r} - r_L\right] + \frac{\alpha}{r}(1 - r_L) = 0 \tag{10}$$

или в общем виде:

$$a'_0\, p'^3 + a'_1\, p'^2 + a'_2\, p' + a'_3 = 0\,, \tag{11}$$

где $a'_0 = \rho'$;

$$a'_1 = \frac{\rho'(1+\alpha)}{r} + r_L - \rho\,;$$

$$a'_2 = 1 + \frac{r_L(1+\alpha)}{r} - \frac{\rho'\alpha}{r} - r_L\,;$$

$$a'_3 = \frac{\alpha}{r}(1 - r_L)\,.$$

В общем случае для схемы АГП-$С_{пар}$ можно построить трехмерное пространство параметров, в котором параметры схемы являются декартовыми координатами (рис. 2). Условия (7) ставят в соответствие параметрам схемы координаты изображающей точки в пространстве параметров (r, ρ', r_L), находящейся внутри объема, ограниченного поверхностями, определяемыми условиями: $a'_3 = 0$ и

$$a'_1 a'_2 - a'_3 a'_0 = 0\,. \tag{12}$$

На рис. 2 эти поверхности заштрихованы.

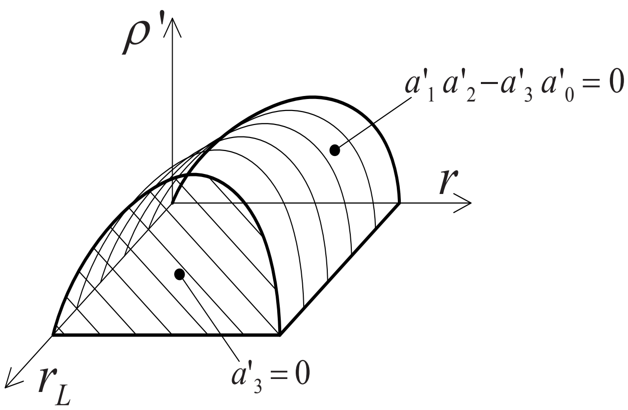
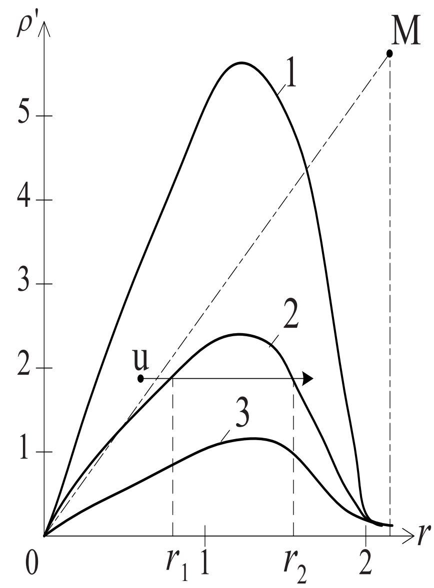


Рис. 2. Трехмерное пространство параметров

Если параметры схемы таковы, что всегда выполняется условие (условие отсутствия апериодической неустойчивости), a'_0 положительно из физических соображений, то без потер общности можно поставить в соответствие параметрам схемы изображающую точку в плоскости параметров (r, ρ'), как показано на рис. 3. При этом в схеме может возникнуть колебательная неустойчивость [3].

Штрихпунктирными линиями обозначены асимптоты, построенные по уравнениям $a'_1 = 0$ и $a'_2 = 0$ (для $\alpha = 0{,}2$), к которым при соответствующих значениях параметров схемы стремится граница области устойчивости (12). Координаты точки М пересечения асимптот определяются из соотношения $a'_1 = a'_2$ и при малых потерях r_L катушки индуктивности равны

$$M\left[1+\alpha; \frac{1+\alpha}{\alpha}\right]. \tag{13}$$



1 - $\alpha = 0{,}1$; 2 - $\alpha = 0{,}2$; 3 - $\alpha = 0{,}3$

Рис. 3. Области устойчивости схемы АГП-$С_{пар}$

Как видно из рис. 3 при фиксированных значениях $\rho' < \rho'_1$ (ρ'_1 – максимальное значение характеристического сопротивления LC-контура в зоне устойчивости) и изменении r от нуля до значений $r >> 1+\alpha$, изображающая точка М дважды при различных значениях r_1 и r_2 пересекает границу области устойчивости. Причем, первый раз, когда АГП-$С_{пар}$ работает на срыв колебаний (r_1), и второй – на возникновение (r_2). Генерация возможна при условии $r_1 > r > r_2$.

Если соотношение (12) представить как $F(r, \rho') = 0$, то значение ρ'_1 можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} F(r,\rho') = 0; \\ \dfrac{\partial F(r,\rho')}{\partial r} = 0. \end{cases} \tag{14}$$

После подстановки коэффициентов $a'_i\,(i = 0, 1, \ldots, 3)$ из (11) в (12) первое уравнение системы (14) преобразуется к виду:

$$\rho'^2 \alpha\left[(1+\alpha) - r\right] - \rho'\left\{\left[(1+\alpha) - r\right]\left[r(1-r_L) + r_L(1+\alpha)\right] - \alpha r\right\} - r_L r\left[r(1-r_L) + r_L(1+\alpha)\right] = 0\,. \tag{15}$$

а второе – к виду:

$$r = \frac{1}{2}\left[\frac{\rho'}{\rho' - r_L} + \frac{\rho'\alpha - r_L(1+\alpha)}{1 - r_L}\right]. \tag{16}$$

Совместное решение системы уравнений (15) и (16) определяет значение ρ'_1. Аналитическая зависимость для ρ'_1 довольно громоздка, поэтому для инженерных оценок можно воспользоваться значением ρ'_1, полученным из совместного решения (15) и (16) при $r_L = 0$:

$$\rho'_{1,2} = \frac{1+2\alpha}{\alpha} \pm \frac{2}{\alpha}\sqrt{\alpha + \alpha^2}\ . \tag{17}$$

В пределах рассматриваемой области устойчивости, где значение ρ'_1 меньше ординаты точки М пересечения асимптот (рис. 3 и (13)), для определения значения ρ'_1 необходимо пользоваться соотношением

$$\rho'_1 = \frac{1+2\alpha}{\alpha} - \frac{2}{\alpha}\sqrt{\alpha + \alpha^2}\ . \tag{18}$$

Для анализа поведения границы области устойчивости получим упрощенное уравнение границы, предположив в (15) $r_L = 0$ и решив его относительно ρ':

$$\rho' = \frac{r(1-r)}{\alpha\left[(1+\alpha) - r\right]}. \tag{19}$$

Из (19) следует, что с ростом величины α значения ρ' уменьшаются. Это подтверждается графиками (рис. 3), построенными для различных значений α. Полагая в (15) $r = 0$, получим выражение для ρ'_2:

$$\rho'_2 = \frac{r_L}{\alpha}(1+\alpha). \tag{20}$$

При $\rho' < \rho'_2$ зона устойчивости распространяется вплоть до значений $r = 0$. Условия реализации двухпорогового режима в схеме АГП-$C_{пар}$ можно записать в виде:

$$\rho'_2 < \rho' < \rho'_1. \tag{21}$$

При значениях $\alpha >> r_L$, $\rho'_2 \approx 0$.

Определим «ширину» области устойчивости, т.е. величину $\Delta r = r_2 - r_1$ ($r_2 > r_1$).

Для этого запишем уравнение границы (15) относительно r:

$$r^2(1-r_L)(\rho' - r_L) - r\left\{\rho'(1-r_L) + (\rho' - r_L)\left[\rho'\alpha - r_L(1+\alpha)\right]\right\} +$$
$$+\rho'(1+\alpha)\left[\rho'\alpha - r_L(1+\alpha)\right] = 0. \tag{22}$$

Решение этого уравнения при малых потерях $r_L \approx 0$

$$r_{1,2} = \frac{1}{2}(1+\rho'\alpha) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(1+\rho'\alpha)^2 - \rho'\alpha(1+\alpha)}\ . \tag{23}$$

Отсюда

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \sqrt{(1+\rho'\alpha)^2 - 4\rho'\alpha^2}\ . \tag{24}$$

Из полученных соотношений видно, что «ширину» области устойчивости в параметрах r можно изменять, варьируя значения ρ' и α. При этом должно выполняться соотношение (21).

Полученные основные соотношения для коэффициентов дифференциального уравнения (3) в размерных (4) и относительных (11) единицах, соотношения для ρ'_1 (18) и ρ'_2 (20), для ширины зоны «молчания» (24), упрощенное уравнение границы области устойчивости (19) и значения r срыва и возникновения колебаний (23) внесены в табл. 1 и являются составной частью аналитической совокупности, определяемой как математическая модель рассматриваемой схемы.

Аналогичные зависимости для АГП ИС на основе трех остальных включений добавочных реактивностей получены теми же методами и внесены в табл. 1.

По коэффициентам характеристического уравнения (6) можно определить частоту колебаний, соответствующую положению изображающей точки на границе области устойчивости. Согласно [1], частота определяется из соотношения

$$\omega = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} = \sqrt{\frac{a_3}{a_1}}\ . \tag{25}$$

При малых значениях $\alpha = \dfrac{C}{C_д}$, как видно из рис. 3, граница области устойчивости стремится к своим асимптотам, определяемым соотношениями $a_1 = 0$ и $a_2 = 0$.

Поэтому, чтобы значение частоты не обращалось в ноль и не стремилось к бесконечности, частота на левой границе по рис. 3 определяется соотношением $\omega_1 = \sqrt{\dfrac{a_3}{a_1}}$ или в относительных единицах с учетом (8)

$$\omega'_1 = \sqrt{\frac{\alpha}{1+\alpha-r}}\ , \tag{26}$$

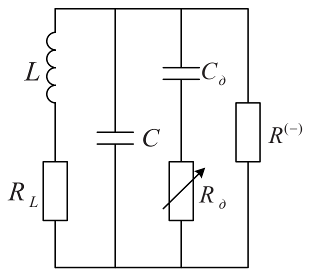
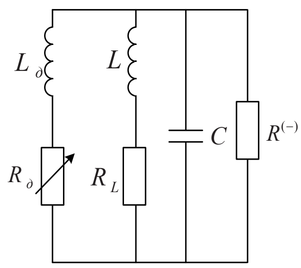
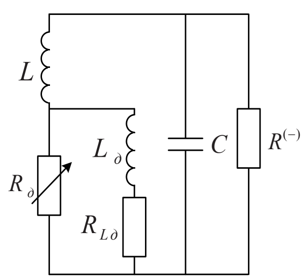
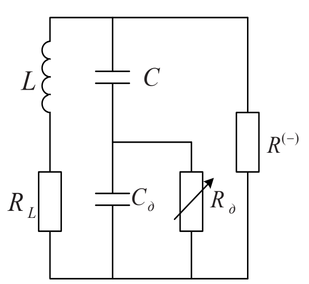
где $\omega'_1 = \omega_1\sqrt{LC}$, а частота на правой границе – из соотношения $\omega_2 = \sqrt{\dfrac{a_2}{a_0}}$ или в относительных единицах

$$\omega'_2 = \sqrt{\frac{r - \alpha\rho'}{r}}\ , \tag{27}$$

где $\omega'_2 = \omega_2\sqrt{LC}$. Соотношения (26) и (27) получены при пренебрежимо малых потерях катушки индуктивности $R_L \approx 0$. Для количественного определения частот ω'_1 и ω'_2 при выбранных α и ρ' необходимо в соотношения (26) и (27) подставить выражения для $r_{1,2}$ срыва колебаний из табл. 1.

Выражения для частоты, аналогичные (26) и (27) определены для трех оставшихся схем преобразователей ИС и занесены в табл. 1.

Таблица 1

Эквивалентная схема и ее обозначение	Коэффициенты дифференциального уравнения $a_0\frac{d^3x}{dt^3}+a_1\frac{d^2x}{dt^2}+a_2\frac{dx}{dt}+a_3=0$, где x – ток или напряжение
АГП-$C_{пар}$ 	$a_0=CL$; $a_1=\frac{L}{R_4}\left(1+\frac{C}{C_4}\right)+R_LC-\frac{L}{\lvert R_0\rvert}$; $a_2=1+\frac{R_L}{R_4}\left(1+\frac{C}{C_4}\right)-\frac{L}{C_4R_4\lvert R_0\rvert}-\frac{R_L}{\lvert R_0\rvert}$; $a_3=\frac{1}{C_4R_4}\left(1-\frac{R_L}{\lvert R_0\rvert}\right)$
АГП-$L_{пар}$ 	$a_0=CL$; $a_1=\frac{L}{L_4}\left(RC-\frac{L_4}{\lvert R_0\rvert}+R_LC\right)$; $a_2=1+\frac{L}{L_4}\left(1-\frac{R}{\lvert R_0\rvert}\right)+\frac{CR_LR}{L_4}-\frac{R_L}{\lvert R_0\rvert}$; $a_3=\frac{1}{L_4}\left(R+R_L-\frac{R_LR}{\lvert R_0\rvert}\right)$
АГП-$L_{пос}$ 	$a_0=LC$; $a_1=CR+\frac{LCR}{L_4}\left(1+\frac{R_{L_4}}{R}\right)-\frac{L}{\lvert R_0\rvert}$; $a_2=\frac{CRR_{L_4}}{L_4}+1-\frac{R}{\lvert R_0\rvert}-\frac{L\left(R+R_{L_4}\right)}{L_4\lvert R_0\rvert}$; $a_3=\frac{R}{L_4}\left[1+R_{L_4}\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{\lvert R_0\rvert}\right)\right]$
АГП-$C_{пос}$ 	$a_0=LC$; $a_1=L\left[\frac{C}{RC_4}-\frac{1}{\lvert R_0\rvert}\left(1+\frac{C}{C_4}\right)\right]+R_LC$; $a_2=\left(1+\frac{C}{C_4}\right)\left(1-\frac{R_L}{\lvert R_0\rvert}\right)+\frac{R_LC}{RC_4}-\frac{L}{RC_4\lvert R_0\rvert}$; $a_3=\frac{1}{RC_4}\left(1-\frac{R_L}{\lvert R_0\rvert}\right)$

Коэффициенты дифференциального уравнения в относительных единицах $r_L = \frac{R_L}{\lvert R_0 \rvert}$; $r = \frac{R}{\lvert R_0 \rvert}$; $\rho' = \frac{L}{C\lvert R_0 \rvert^2}$	Уравнение границы области устойчивости. Величина Δr зоны «молчания» (при $r_L = 0$)
$\alpha = \frac{C}{C_4}$; $a'_0 = \rho'$; $a'_1 = \frac{\rho'(1+\alpha)}{\alpha} + r_L - \rho'$; $a'_2 = 1 + \frac{r_L(1+\alpha)}{r} - \frac{\rho'\alpha}{r} - r_L$; $a'_3 = \frac{\alpha(1-r_L)}{r}$	$\rho' = \frac{r(1-r)}{\alpha(1+\alpha-r)}$; $\Delta r = \sqrt{(1-\rho'\alpha)^2 - 4\rho'\alpha^2}$
$l = \frac{L_4}{L}$; $a'_0 = \rho'$; $a'_1 = \frac{r}{l} - \rho' + r_L$; $a'_2 = 1 - r_L + \frac{1-r}{l} - \frac{r_L r}{\rho' l}$; $a'_3 = \frac{(r + r_L - r r_L)}{\rho' l}$	$\rho' = \frac{r(1-r)}{l(1+l-r)}$; $\Delta r = \sqrt{(1-\rho' l)^2 - 4\rho' l^2}$
$l = \frac{L}{L_4}$; $a'_0 = \rho'$; $a'_1 = r(1+l) + l r_{L_4} - \rho'$; $a'_2 = 1 - r(1+l) - l r_{L_4}\left(1 - \frac{r}{\rho'}\right)$; $a'_3 = \frac{l(r + r_{L_4} - r r_{L_4})}{\rho'}$	$r' = \frac{r^2(1+l)^2 - r}{r(1+l) - 1}$; $\Delta r = \frac{\sqrt{[\rho'(1+l)+1]^2 - 4\rho'(1+l)^2}}{(1+l)^2}$
$\alpha = \frac{C_4}{!}$; $a'_0 = \rho'$; $a'_1 = r_L - \rho'\left(1 + \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha r}\right)$; $a'_2 = \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)(1 - r_L) + \frac{r_L - \rho'}{\alpha r}$; $a'_3 = \frac{1 - r_L}{\alpha r}$	$\rho' = \frac{r^2(1+\alpha)^2 - r}{r(1+\alpha) - 1}$; $\Delta r = \frac{\sqrt{[\rho'(1+\alpha)+1]^2 - 4\rho'(1+\alpha)^2}}{(1+\alpha)^2}$

Значения r срыва и возникновения колебаний. Значения ρ'_1 и ρ'_2	Частота колебаний на границах 1 и 2 ($\omega' = \omega\sqrt{LC}$)
$r_{2,1} = \frac{1}{2}(1+\rho'\alpha) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(1+\rho'\alpha)^2 - \rho'\alpha(1+\alpha)}$; $\rho'_1 = \frac{1}{\alpha} + 2 - \frac{2\sqrt{\alpha+\alpha^2}}{\alpha}$; $\rho'_2 = \frac{r_L(1+\alpha)}{\alpha}$	$\omega'_1 = \sqrt{\frac{\alpha}{1+\alpha-r}}$; $\omega'_2 = \sqrt{\frac{r-\rho'\alpha}{r}}$
$r_{2,1} = \frac{1}{2}(1+\rho' l) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(1+\rho' l)^2 - \rho' l(1+l)}$; $\rho'_1 = \frac{1}{l} + 2 - \frac{2\sqrt{l+l^2}}{l}$; $\rho'_2 = \frac{l r_L}{(1+l)}$	$\omega'_1 = \sqrt{\frac{1+l-r}{l}}$; $\omega'_2 = \sqrt{\frac{r}{r-\rho' l}}$
$r_{2,1} = \frac{1+\rho'(1+l)}{2(1+l)^2} \pm \sqrt{\frac{[1+\rho'(1+l)]^2}{4(1+l)^4} - \frac{\rho'}{(1+l)^2}}$; $\rho'_1 = \frac{1+2l}{1+l} - \frac{2\sqrt{l+l^2}}{1+l}$; $\rho'_2 \approx 0$	$\omega'_1 = \sqrt{1-r(1+l)}$; $\omega'_2 = \sqrt{\frac{lr}{r(1+l)-\rho'}}$
$r_{2,1} = \frac{1+\rho'(1+\alpha)}{2(1+\alpha)^2} \pm \sqrt{\frac{[1+\rho'(1+\alpha)]^2}{4(1+\alpha)^4} - \frac{\rho'}{(1+\alpha)^2}}$; $\rho'_1 = \frac{1+2\alpha}{1+\alpha} - \frac{2\sqrt{\alpha+\alpha^2}}{1+\alpha}$; $\rho'_2 \approx r_L$	$\omega'_1 = \sqrt{\frac{1}{1-r(1+\alpha)}}$; $\omega'_2 = \sqrt{\frac{r(1+\alpha)-\rho'}{r\alpha}}$

3 Выводы

Анализ математических соотношений табл. 1 и графиков областей устойчивости позволяет сделать следующие выводы:

- различные частоты срыва и возникновения автоколебаний, между которыми есть определенной ширины зона «молчания» (отсутствия автоколебаний), делает обоснованной «привязку» этих состояний АГП ИС с системными параметрами «ниже нормы» – «норма» – «больше нормы» и сопротивлением чувствительного элемента R-типа;

- зона «молчания» по величине (в координатах значений резистивности чувствительного элемента R-типа), а также значения частот срыва (возникновения) колебаний могут варьироваться как изменением относительного характеристического сопротивления контура базового АГ, так и изменением соотношений подключаемой и одноименной с нею реактивности контура базового АГ.

Литература

1. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]: Учебник для ВУЗов / И.С. Гоноровский. – 4-е изд. перераб. и доп. – М: Радио и связь, 1986. – 273 с.
2. Лучук А.М. Устройства передачи дискретной информации [Текст] / А.М. Лучук. – К.: Техніка, 1978. – 260 с.
3. Дискретные средства преобразования и сбора измерительной информации [Текст] / А.А. Абдуллаев, И.А. Набиев, М.Ш. Гусейнов, Д.Г. Исаев. – М.: Машиностроение, 1982. – 144 с.