

УДК 621.317.1

*А. Н. ЗЕЛЕНИН, канд. техн. наук, Д. В. БОНДАРЬ, А. Г. ЗЕЛЕНИНА,
С. Б. ПРОСКУРИН*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ИНФОРМАЦИИ

Автогенераторные преобразователи (АГП) являются распространенными средствами формирования измерительной информации в измерительных (или управляющих) информационных системах [3]. Рассмотрим АГП с частотным информационным параметром в случае, когда изменение выходной частоты происходит в результате подключения (отключения) частично или полностью добавочной емкости C_d в контур LC-автогенератора с помощью чувствительного элемента R -типа, например, терморезистора, фоторезистора, тензорезистора и т. д. В радиотехнике этот способ широко используется при манипуляции частоты автогенератора и в синтезаторах частот при формировании дискретного множества выходных рабочих частот [1]. Для исключения влияния параметров ключа (эквивалента элемента R -типа) в качестве рабочих используются толь-

ко два его состояния: «открыто» — $R \rightarrow 0$ и «закрыто» — $R \rightarrow \infty$.

В АГП подключающий элемент R -типа фактически является чувствительным элементом и обычно располагается в зоне действия влияющих (контролируемых) факторов объекта. В этом случае диапазон рабочих состояний чувствительного эле-

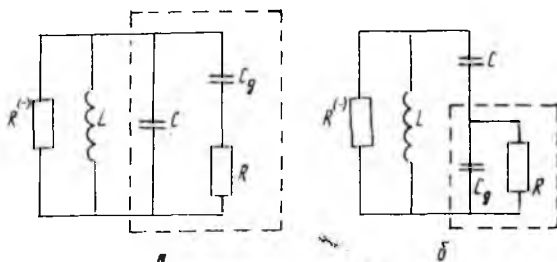


Рис. 1

мента определяется параметрами объекта, и его сопротивление, в принципе, может находиться в пределах $0 \leq R \leq \infty$. Это обстоятельство, в основном, и определяет специфику рассматриваемых АГП.

Для всех значений R при определенных значениях индуктивности L , основной C и добавочной C_d емкости контура можно определить выходную частоту ω и тем самым конкретизировать вид характеристики преобразования (ХП) АГП:

$$\omega = f(R, C, L, C_d).$$

Возможны два варианта подключения добавочной емкости к контуру LC -генератора: с параллельным $C_{\text{пар}}$ -АГП и последовательным $C_{\text{пос}}$ -АГП включением добавочной емкости C_d к основной емкости контура C (рис. 1, а, б). На эквивалентных схемах (рис. 1) активный АГП представлен двухполюсником с отрицательным дифференциальным сопротивлением, модуль которого в рабочей точке $|R(-)|$.

Исследуемые структуры АГП имеют следующие особенности.

1. Изменение параметров R и C_d не приводит к изменению режима активного элемента АГП по постоянному току, поэтому аналитические соотношения для ХП целесообразно представлять в области параметров $\omega|_{R=0} \omega_0, \omega|_{R=\infty} \omega_\infty, \alpha \Delta \frac{C}{C_d} \left(\frac{C_d}{C} \right), R$, т. е. $\omega = f^*(\omega_0, \omega_\infty, \alpha, R)$. Здесь параметры ω_0 и ω_∞ соответствуют базовому модулю АГП, а α, R характеризуют параметры подключаемой цепи. Такой вид представления характеристик преобразования в наибольшей мере отвечает принципу модульности, которому удовлетворяют и рассматриваемые структуры АГП. Действительно, схемотехнические решения $C_{\text{пар}}$ -АГП и $C_{\text{пос}}$ -АГП получаются путем подключения к базовому модулю

АГ дополнительных цепей C_d , R , а сам модуль базового АГ остается без изменений. Поэтому и в характеристиках преобразования целесообразно область параметров аналитического представления ограничить параметрами базового модуля ω_0 , ω_∞ и подключаемой цепи C_d , α , R .

Взяв резонансную частоту контура ω_p в качестве первого приближения ХП для рассматриваемых вариантов АГП, согласно [1] можно записать

$$\omega_p = \sqrt{\frac{\omega_\infty^2 - b^2/R^2}{2}} + \sqrt{\frac{(\omega_\infty^2 - b^2/R^2)^2}{4} + \frac{b^2\omega_0^2}{R}}, \quad (1)$$

где, для схемы $C_{\text{пар}}$ -АГП

$$\omega_\infty = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C + C_d)}}; \quad b = \frac{\sqrt{1 + \alpha}}{C_d}, \quad (2)$$

для схемы $C_{\text{пос}}$ -АГП

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \omega_\infty = \sqrt{\frac{C_d + C}{CC_d L}}; \quad b = \frac{1}{\sqrt{C_d C (1 + \alpha)}}. \quad (3)$$

2. Рассматриваемые структуры АГП ориентированы на разнообразные области практического применения. В частности, в схеме $C_{\text{пар}}$ -АГП параллельная цепь, состоящая из элементов C , C_d и R (пунктир на рис. 1, позиция a), является двухполюсной трехэлектродной схемой замещения коаксиального датчика в биологических исследованиях [4]. В схеме $C_{\text{пос}}$ -АГП (рис. 1, позиция b) обозначенная пунктиром цепь из элементов C_d , R является схемой замещения двухэлектродной емкостной кондуктометрической ячейки [5].

3. Подключающий элемент R -типа не приводит к затуханию в контуре, если $R=0$ или $R=\infty$. При промежуточных значениях сопротивления чувствительного элемента $0 < R < \infty$ затухание в контур вносится и происходит уменьшение добротности Q , вследствие чего возникают условия для возможного срыва колебаний в АГП. Режиму непрерывной генерации при изменении значений R от нуля до бесконечности соответствует условие $\rho' > \rho'_1$ (4), где

$$\rho'_1 \approx \frac{1}{\alpha} + 2 - \frac{2\sqrt{\alpha(1+\alpha)}}{\alpha}$$

максимальное значение относительного (нормированного по $|R^{(-)}|$) характеристического сопротивления контура, принадлежащее зоне устойчивости (отсутствия колебаний) для схемы $C_{\text{пар}}$ -АГП; $\alpha = C/C_d$ — относительный параметр.

Аналогичные соотношения для схемы $C_{\text{пос}}$ -АГП

$$\rho'_1 \approx \frac{1 + 2\alpha}{1 + \alpha} - \frac{2\sqrt{\alpha(1+\alpha)}}{1 + \alpha}; \quad \alpha = \frac{C_d}{C}.$$

Условие (4) в дальнейшем используется в качестве ограничения на параметры АГП.

Уменьшение добротности контура Q приводит к увеличению относительной нестабильности частоты выходного колебания, т. е. росту погрешности АГП. В терминах информационного подхода [2] это приводит к росту энтропийной погрешности Δ ,

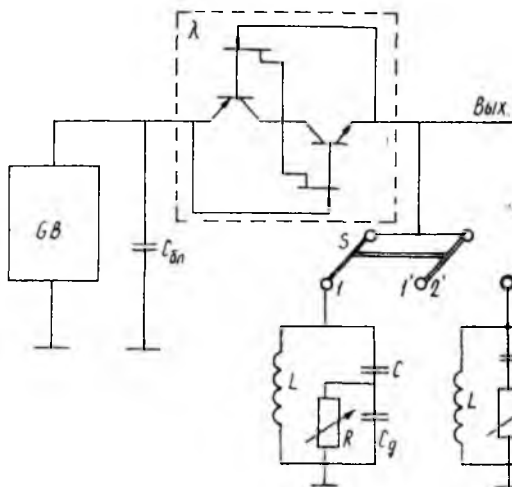


Рис. 2

ухудшению разрешающей способности P_c и уменьшению информационной способности I_c АГП.

При экспериментальном исследовании информационных характеристик АГП в качестве активного элемента в базовом модуле АГ использован λ -диод на составных n -канальном и p -канальном транзисторах. Составные транзисторы обеспечивают увеличение крутизны спадающего участка вольт-амперной характеристики (уменьшение величины отрицательного сопротивления $|R^{(-)}|$) λ -диода, что необходимо для работы АГП с низкодобротными колебательными контурами в широком диапазоне частот. В экспериментальном макете (рис. 2) λ -диод реализован на полупроводниковых триодах КП 303 Е, КТ 361 Д, КП 103 Л и КТ 315 Г без предварительного подбора их по параметрам. Учитывая высокую критичность λ -диода к изменению питающих напряжений, в экспериментальном макете применен регулируемый стабилизатор напряжения. Наличие в макете емкости $C_{бл}$ обеспечивает адекватность теоретической модели (см. рис. 1) исследуемым структурам АГП по переменному току.

В рабочей точке дифференциальное отрицательное сопротивление и собственная емкость λ -диода имели следующие значения: $|R^{(-)}| = 28 \text{ Ом}$; $C_\lambda = 59 \text{ пФ}$.

В ходе исследования экспериментального макета для фиксированных параметров контура L , C и α при определенных зна-

чениях R (0, 5, 10, 20, 33, 56, 100, 300 Ом и $R=\infty$) формировались массивы значений выходных частот (серии по $n=10^2$ наблюдений). Каждая серия разбивалась на $m=7$ бинов с равной шириной d . С учетом количества результатов n_i , попадающих в бин, определялись по каждой серии абсолютная энтропийная погрешность

$$\Delta = \frac{d}{2} \frac{n}{\sum_{i=1}^m n_i \lg n_i}$$

и относительная [2] энтропийная погрешность

$$\gamma = \frac{\Delta n}{\sum_{j=1}^n \omega_j} = 100 \text{ \%}.$$

Для характеристики преобразования выходная частота вычислялась как среднее арифметическое значение серии.

В рамках информационного подхода одной из важнейших характеристик АГП следует признать разрешающую способность P_c , определяемую как число достоверно различимых градаций результата измерения (преобразования) во всем диапазоне возможных значений выходной величины. С этих позиций разрешающая способность P_c представляет собой обобщенную метрологическую характеристику АГП. В частности, разрешающая способность P_c косвенно характеризует и информационную способность АГП [2].

Для определения P_c по данным эксперимента учтем, что энтропийная погрешность является функцией текущего значения x преобразуемой величины, т. е. $P_c = F(x \rightarrow R)$. Отдельная ступень P_c зависит от погрешности преобразования 2Δ на данном участке ХП. Для вычисления P_c разобьем всю характеристику преобразования на частотные интервалы и каждому из этих интервалов припишем соответствующее значение энтропийной погрешности Δ . Учитывая то, что значения энтропийных погрешностей определены в точках, соответствующих фиксированному R , разбиение ХП на частотные интервалы целесообразно проводить в окрестностях этих точек. Для этого найдем средние значения частот, соответствующих последовательным значениям R , и используем их как граничные для соответствующего диапазона. Каждому из диапазонов поставим в соответствие постоянную энтропийную погрешность, равную погрешности Δ в одной точке этого диапазона. Для крайних частотных диапазонов это будут значения Δ при крайних значениях R , а для внутренних — значения Δ соответствующей экспериментальной серии, попадающей в этот диапазон. Тогда разрешающая способность в каждом диапазоне

$$P_{cR} = \frac{\Delta}{2\Delta_R} \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{\Delta_R},$$

Вариант	$R, \text{Ом}$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j, \text{кГц}$	$\Delta, \text{Гц}$	$\gamma, \%$	$ \omega_{i+1} - \omega_i \text{кГц}$	P_{c_k}
Схема $C_{\text{пос}} = \text{АГП}, C = 10000 \text{ пФ}$						
1	0	592,504	196,50	$3,25 \cdot 10^{-2}$	1,48	3,77
	5	595,467	344,75	$5,79 \cdot 10^{-2}$	13,74	20,00
	10	619,993	1832,54	$2,96 \cdot 10^{-1}$	64,68	17,65
	20	724,834	2071,84	$2,86 \cdot 10^{-1}$	237,99	57,43
	$C_{\Sigma} = 150 \text{ пФ}$ 33	1095,970	3731,50	$3,40 \cdot 10^{-1}$	306,77	41,10
	56	1338,380	2554,14	$1,90 \cdot 10^{-1}$	221,74	43,40
	100	1539,440	1804,71	$1,17 \cdot 10^{-1}$	225,43	62,45
300	1789,230	3248,25	$1,82 \cdot 10^{-1}$	175,80	27,10	
∞	1891,040	4366,80	$2,31 \cdot 10^{-1}$	50,91	5,80	
Итого		$P_c = 278,7$				
Схема $C_{\text{гар}} = \text{АГП}, C = 10000 \text{ пФ}$						
2	0	592,633	234,91	$3,96 \cdot 10^{-2}$	6,90	14,70
	5	606,329	437,72	$7,22 \cdot 10^{-2}$	13,62	15,55
	10	619,918	1273,11	$2,05 \cdot 10^{-1}$	66,70	26,20
	$C_{\Sigma} = 3000 \text{ пФ}$ 20	793,650	1290,33	$1,74 \cdot 10^{-1}$	142,43	55,20
	33	904,845	911,30	$1,00 \cdot 10^{-1}$	122,92	67,45
	56	985,445	1327,00	$1,35 \cdot 10^{-1}$	62,95	23,70
	100	1030,760	956,03	$9,28 \cdot 10^{-2}$	32,50	17,00
300	1050,410	1105,97	$1,05 \cdot 10^{-1}$	27,30	12,35	
∞	1085,440	448,04	$4,13 \cdot 10^{-2}$	17,54	19,60	
Итого		$P_c = 251,75$				
Схема $C_{\text{гар}} = \text{АГП}, C = 10000 \text{ пФ}$						
3	0	470,292	1015,94	$2,16 \cdot 10^{-1}$	3,00	1,42
	10	476,372	301,03	$6,31 \cdot 10^{-2}$	29,55	49,08
	20	529,247	535,89	$1,01 \cdot 10^{-1}$	40,30	37,60
	33	557,107	879,06	$1,58 \cdot 10^{-1}$	52,30	29,75
	$C_{\Sigma} = 10000 \text{ пФ}$ 56	633,788	565,12	$8,91 \cdot 10^{-2}$	61,15	54,12
	100	679,535	755,87	$1,11 \cdot 10^{-1}$	35,55	23,51
	300	704,836	675,07	$9,57 \cdot 10^{-2}$	12,65	9,37
Итого		$P_c = 204,85$				
Схема $C_{\text{гар}} = \text{АГП}, C = 16000 \text{ пФ}$						
4	0	404,086	1047,01	$2,59 \cdot 10^{-1}$	63,93	30,53
	10	531,962	391,99	$7,37 \cdot 10^{-2}$	68,00	86,74
	20	540,073	136,08	$2,51 \cdot 10^{-2}$	17,08	62,79
	33	566,127	176,96	$3,12 \cdot 10^{-2}$	38,53	108,84
	$C_{\Sigma} = 16000 \text{ пФ}$ 56	617,125	699,03	$1,13 \cdot 10^{-1}$	50,75	36,30
	100	667,627	455,84	$6,84 \cdot 10^{-2}$	42,98	47,14
	300	703,098	399,92	$5,69 \cdot 10^{-2}$	17,74	22,18
Итого		$P_c = 394,52$				

где k — порядковый номер диапазона; ω_{i+1}, ω_i — граничные частоты диапазона.

Разрешающая способность АГП $P_c = \sum_k P_{c_k}$.

Результаты исследований приведены в таблице.

Анализ экспериментальных результатов подтвердил предположение о сложном характере распределения погрешностей

АГП по диапазону. Для исследованных вариантов АГП отмечено возрастание энтропийных погрешностей в диапазонах частот ХП с наибольшей крутизной. Это закономерно, так как в этих диапазонах происходит существенное уменьшение добротности контура АГП из-за внесения активных потерь от чувствительного элемента R -типа. Несмотря на то, что в целом увеличение диапазона перестройки АГП приводит к возрастанию разрешающей способности, в рамках системного применения исследованных АГП в целях достижения максимума информационной способности необходим более тщательный подход к выбору структуры АГП и ее параметров. Так, несмотря на более высокую разрешающую способность варианта 1 $C_{\text{пос-АГП}}$, в области малых значений сопротивлений чувствительного элемента R -типа, обусловленного спецификой характеристик контролируемого параметра системы, например, $R=0\ldots 10$ Ом, более обоснованно использование варианта 2. При $R>100$ Ом из исследованных схем $C_{\text{пос-АГП}}$ несомненно предпочтительней вариант 1.

Полученные результаты подтверждают важность и необходимость априорных сведений о контролируемом объекте (процессе) при выборе того или иного варианта АГП и его параметров в рамках максимизации информационной способности в рабочем диапазоне.

Список литературы: 1. *Лучук А. М.* Устройства передачи дискретной информации. К., 1978. 260 с. 2. *Новицкий П. В.* Основы информационной теории измерительных устройств. Л., 1968. 248 с. 3. *Арш Э. И.* Автогенераторные измерения. М., 1976. 136 с. 4. *Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П.* Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М., 1986. 143 с. 5. *Кулаков М. В.* Технологические измерения и приборы для химических производств. М., 1983. 423 с.

Поступила в редколлегию 08.05.87