

А. Г. ЗЕЛЕНИНА, Ю. В. АФАНАСЬЕВ, А. Н. ЗЕЛЕНИН, канд. техн. наук

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ФОРМЫ ИНФОРМАЦИИ

Автогенераторные преобразователи, в которых информация о контролируемом физическом параметре трансформируется в изменение частоты выходного сигнала, являются основой частотно-измерительных преобразователей (ЧИП) и фазогенераторных измерительных преобразователей (ФГИП) [1]. Если частоту изменить путем подключения к основному LC -контуре добавочных емкостей или индуктивностей, используя подключающие свойства

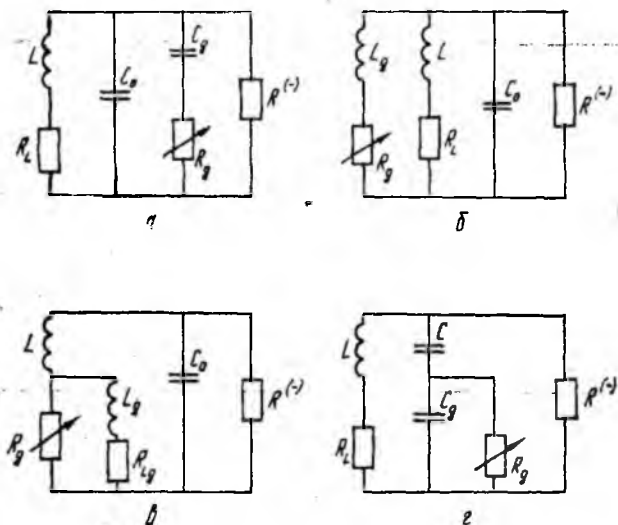


Рис. 1

датчиков R -типа (термо-, тензо-, фото-, магниторезистивные датчики), то получим схемы, изображенные на рис. 1. В зависимости от способа включения дополнительных реактивных элементов назовем их соответственно $C_{\text{пар}}$ -ЧИП, $L_{\text{пар}}$ -ЧИП, $L_{\text{сер}}$ -ЧИП, $C_{\text{сер}}$ -ЧИП схемами. Символом $R^{(\omega)}$ на рис. 1 обозначен схемотех-

$C_{\text{нар}} - \text{ЧИП}$

$$\alpha_1 = C_0 / C_1$$

$L_{\text{нар}} - \text{ЧИП}$

$$l_1 = L_A / L$$

$$a = \rho'$$

$$b = \frac{\rho'}{r_A}(1 + \alpha_1) + r_L - \rho'$$

$$c = 1 + \frac{r_L(1 + \alpha_1)}{r_A} - \frac{\rho' \alpha_1}{r_A} - r_L$$

$$d = \frac{\alpha_1}{r_A}(1 - r_L)$$

$$a = \rho'$$

$$b = \frac{r_A}{l_1} - \rho' + r_L$$

$$c = 1 - r_L + \frac{1 - r_A}{l_1} + \frac{r_L r_A}{\rho' l_1}$$

$$d = \frac{r_A + r_L - r_L r_A}{\rho' l_1}$$

Таблица 1

 $L_{\text{noc}} - \text{ЧИП}$

$$l_2 = L/P_A$$

 $C_{\text{noc}} - \text{ЧИП}$

$$x_2 = C_1/C$$

$$a = \rho'$$

$$a = \rho'$$

$$b = r_A(1 + l_2) + l_2 r_{L_A} - \rho'$$

$$b = r_L - \rho' \left(1 + \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_2 r_A} \right)$$

$$c = 1 - r_A(1 + l_2) - l_2 r_{L_A} \left(1 - \frac{r_A}{\rho'} \right)$$

$$c = \left(1 + \frac{1}{x_2} \right) (1 - r_A) + \frac{r_L - \rho'}{r_A x_2}$$

$$d = \frac{l_2}{\rho'} (r_A + r_{L_A} - r_A r_{L_A})$$

$$d = \frac{1 - r_L}{r_A x_2}$$

нический эквивалент отрицательного сопротивления активного элемента ЧИП.

В статье освещены некоторые особенности оценки эффективности выбора параметров автогенераторных преобразователей формы информации с позиций функциональной (без использования дополнительных технических средств линеаризации сквозной преобразовательной характеристики реализованных на их основе ЧИП или ФГИП).

Преобразовательные характеристики рассматриваемых схем в первом линейном приближении являются решениями соответствующих уравнений третьего порядка $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$.

В табл. 1 приведены коэффициенты уравнений, описывающих соответствующую схему, в относительных единицах

$$r_1 = R_A / |R^{(-)}|; \rho' = L_1 (C_0 R^{(-)})^2; r_{L_1} = R_{L_1} / |R^{(-)}|^2.$$

Анализ преобразовательных характеристик для всех четырех рассматриваемых схем показал, что на форму этих характеристик существенно влияют параметры

$$\alpha_1 = C_0 / C_A; l_1 = L_A / L; l_2 = L / L_A; \alpha_2 = C_A / C_0 \quad (1)$$

для $C_{\text{пар}}\text{-ЧИП}$, $L_{\text{пар}}\text{-ЧИП}$, $L_{\text{нос}}\text{-ЧИП}$, $C_{\text{нос}}\text{-ЧИП}$ соответственно.

Если известна преобразовательная характеристика датчика $R_g = f(N)$, где N — физический параметр контролируемого объекта, то, изменив с помощью параметров α_1 , α_2 , l_1 , l_2 форму этой характеристики, можно добиться ее линеаризации в рабочем диапазоне или сформировать необходимую преобразовательную характеристику ЧИП для линеаризации сквозной преобразовательной характеристики ФГИП.

В общем виде алгоритм преобразования измерительной информации в ФГИП представляется следующим образом:

$$N \Rightarrow R_A \Rightarrow (C, L, R, R^{(-)}) \Rightarrow \omega_{\text{сг}} \Rightarrow \Delta\omega \Rightarrow \Delta\varphi. \quad (2)$$

Первый этап алгоритма (2) определяется преобразовательной характеристикой датчика R -типа. На втором этапе преобразовательная характеристика определяется структурой ЧИП, форма ее зависит от параметров (1).

Преобразование на третьем этапе описывается функцией [2]:

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{ог}}} \cdot \frac{2A_{\text{сг}}}{A_{\text{ог}} K_{\text{цс}}} = \arcsin B, \quad (3)$$

где $\Delta\omega$ — разность парциальных частот опорного и синхронизируемого генераторов, $\Delta\omega = \omega_{\text{ог}} - \omega_{\text{сг}}$; $A_{\text{ог}}$, $A_{\text{сг}}$ — амплитуды опорного и синхронизируемого генераторов; $K_{\text{цс}}$ — коэффициент передачи цепи связи, обеспечивающей однонаправленное действие синхронизирующего сигнала.

На рис. 2, а показана структурная схема ФГИП, 2, б — его преобразовательная характеристика (ПХ). Функция $\arcsin B$ (ПХ ФГИП) имеет три характерных участка: АБ — с убывающей

крутизной при увеличении частоты $\omega_{сг}$ от своего нижнего значения $\omega_{сгн}$; БГ — квазилинейный (2% — нелинейность); ГД — с возрастающей крутизной. Точке О на ПХ ФГИП соответствует условие $\omega_{сг} = \omega_{ог}$. Граничные частоты всего диапазона изменения $\omega_{сг}$ задаются крайними значениями $B = \pm 1$ ($\Delta\varphi = \pm \pi/2$). Данных условий достаточно для того, чтобы рассмотреть алгоритм

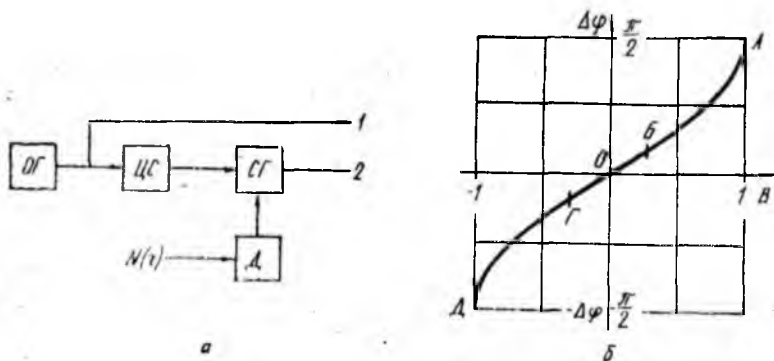


Рис. 2

выбора параметров ФГИП, направленный на линейризацию его ПХ [4].

Предположим, что для некоторого ЧИП известна его ПХ: $\omega_{сг} = f(N)$. Чтобы выбрать системные параметры ФГИП, необходимо проанализировать преобразовательную характеристику ЧИП: выпуклая она или вогнутая, увеличивается или уменьшается ее крутизна с ростом значений $\omega_{сг}$. Затем следует выбрать значение частоты ОГ $\omega_{ог}$ таким образом, чтобы скомпенсировать нелинейность ПХ ЧИП соответствующими параметрами ПХ ФГИП. Так, при возрастающей крутизне ПХ ЧИП участок ПХ ФГИП должен быть с убывающей крутизной и наоборот.

Вариантов выбора такого участка несколько. Один из них заключается в следующем: точка О выходной шкалы ФГИП помещается в начало координат, значение $\omega_{ог}$ выбирается равным одному из крайних значений частоты СГ (верхнему $\omega_{сгв}$) или нижнему $\omega_{сгн}$). Таким образом конкретизируется рабочая ветвь ПХ ФГИП [4].

Затем, выбором уровня синхронизирующего сигнала ($K_{цс}$) создается степень связи ОГ и СГ, обеспечивающая количественное соответствие мер нелинейностей ПХ ФГИП и ПХ ЧИП. Чтобы сравнить, ПХ ЧИП необходимо пронормировать. Отметим, что все значения крутизны ПХ ФГИП (функции $\arcsin B$) пронормированы относительно начала координат, где крутизна равна единице.

Для обеспечения относительной инвариантности ФГИП к действию неконтролируемых параметров ОГ и СГ выполняются схемно и конструктивно-технологически идентичными. Только при этом элемент ОГ, аналогичный датчику R-типа СГ, изолирован от дей-

ствия контролируемого параметра. Здесь $A_{\text{сг}} = A_{\text{ог}}$. По выбранным параметрам получают линеаризованную ПХ ФГИП в диапазоне изменения контролируемого параметра N относительно, например, ПХ ЧИП. Данную ПХ ФГИП можно оптимизировать по критерию линейности, изменяя форму ПХ ЧИП варьированием параметров (1).

В качестве целевой функции, на минимизацию которой направлено решение оптимизационной задачи, можно воспользоваться функцией F , равной сумме вторых производных сквозной ПХ ФГИП по контролируемому параметру N , взятых в n точках:

$$F = \sum_{i=1}^n \left| \frac{d^2 \Delta \varphi_i(N)}{dN^2} \right|. \quad (1)$$

Для определения значения F можно применить метод общего поиска, т. е. просчитать ее для всех значений (1) с заданным шагом. Однако такой путь неэффективен. Как компромиссный вариант между эффективностью и простотой программной реализации в рабочей программе использован метод дихотомии [4].

Программа функциональной линеаризации ПХ автогенераторных преобразователей формы информации подробно не исследуется, так как описанная ниже методика оценки эффективности функциональной линеаризации ПХ не зависит от программы линеаризации. Для оценки эффективности функциональной линеаризации необходимо сформулировать некоторые критерии: частные, обобщенные и системные показатели качества. В радиоэлектронных устройствах оценки нелинейности обычно рассматривают совместно с параметрами диапазонности (по входу или выходу), поэтому выберем их в качестве основных. К числу частных показателей качества можно отнести коэффициенты, характеризующие степень нелинейности преобразовательных характеристик на соответствующих этапах формирования измерительного сигнала, представленного алгоритмом (2).

Показатели нелинейности в соответствии с выделенными этапами имеют вид

$$v_R = \frac{\sum_{i=1}^n |S_{iR} - S_{\text{ср}R}|}{S_{\text{ср}R}}; \quad v_{\omega\text{сг}} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_{i\omega\text{сг}} - S_{\text{ср}\omega\text{сг}}|}{S_{\text{ср}\omega\text{сг}}};$$

$$v_{\Delta\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_{i\Delta\varphi} - S_{\text{ср}\Delta\varphi}|}{S_{\text{ср}\Delta\varphi}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ср}}$ — средняя крутизна соответствующей преобразовательной характеристики, определяемая как отношение всего диапазона изменения выходного параметра к диапазону изменения контроли-

руемого; S_i — крутизна в соответствующей точке преобразовательной характеристики ($i=1, n$); n — количество интервалов разбиения соответствующей преобразовательной характеристики.

Коэффициенты диапазонности можно количественно оценить частью используемого диапазона по выходному эффекту относительно потенциально достижимого. Например, для ФГИП потенциально достижимый диапазон изменения разности фаз выходных сигналов ОГ, СГ равен π . Тогда коэффициент диапазонности ФГИП

$$d_{\Delta\varphi} = \varphi_{\text{макс}} - \varphi_{\text{мин}} / \pi. \quad (6)$$

Аналогично находится коэффициент диапазонности ЧИП

$$d_{\omega_{\text{СГ}}} = \frac{\omega_{\text{СГ}}(R_{\text{д макс}}) - \omega_{\text{СГ}}(R_{\text{д мин}})}{\omega_{\text{СГ}}(\infty) - \omega_{\text{СГ}}(0)}, \quad (7)$$

в котором $\omega_{\text{СГ}}(R_{\text{д макс. мин}})$ значения парциальных частот ЧИП в диапазоне изменения $R_{\text{д}}$; $\omega_{\text{СГ}}(\infty) - \omega_{\text{СГ}}(0)$ — потенциально достижимый диапазон изменения частот ЧИП, определяемый значениями $R_{\text{д}} = \infty$; $R_{\text{д}} = 0$.

Сравнительную оценку для этапов преобразования в алгоритме (2) получаем по обобщенным показателям качества, обозначенным как отношение частных

$$V_{\Delta\varphi, R} = \frac{v_R}{v_{\Delta\varphi}}; \quad V_{\Delta\varphi, \omega_{\text{СГ}}} = \frac{v_{\omega_{\text{СГ}}}}{v_{\Delta\varphi}}; \quad (8)$$

$$D_{\Delta\varphi, \omega_{\text{СГ}}} = \frac{d_{\Delta\varphi}}{d_{\omega_{\text{СГ}}}} = \frac{\left(\frac{\varphi_{\text{макс}} - \varphi_{\text{мин}}}{\pi} \right)}{\frac{\omega_{\text{СГ}}(R_{\text{д макс}}) - \omega_{\text{СГ}}(R_{\text{д мин}})}{\omega_{\text{СГ}}(\infty) - \omega_{\text{СГ}}(0)}}. \quad (9)$$

Из обобщенных показателей качества можно сгруппировать с помощью весовых коэффициентов системные показатели качества.

Таблица 2

Функция	$V_{\Delta\varphi, R}$	$V_{\Delta\varphi, \omega_{\text{СГ}}}$	$D_{\Delta\varphi, \omega_{\text{СГ}}}$
$R_1(N) = e^N + 5$	14,4	7,0	1,3
$R_1(N) = \sqrt{N} + 10$	2,1	1,7	21,2
$R_1(N) = \frac{1}{N} + 3$	2,7	2,6	1,6
$R_1(N) = \sin N + 5$	5,8	5,9	5,3

ва. Весовые коэффициенты должны учитывать важность того или иного обобщенного показателя с системных позиций. В системные

показатели качества должны войти и обобщенные стоимостные оценки, оценки чувствительности устройства (ЧИП или ФГИП) к действию контролируемого параметра, оценки, характеризующие степень нечувствительности устройства к действию неконтролируемых параметров и т. д.

В примере просчитывались системные параметры ФГИП, реализующие линеаризацию и оптимизацию по критерию линейности его преобразовательной характеристики. Исходную зависимость R_d от контролируемого параметра брали определенного вида (табл. 2). Опорный и синхронизируемый генераторы соответствовали структуре $S_{\text{пар-ЧИП}}$ (см. рис. 1). Анализ математических моделей структуры $S_{\text{пар-ЧИП}}$ показал, что при изменении R_d в широких пределах имеет место устойчивая генерация при выполнении условия

$$\rho' > \rho'_{\text{кр}}, \quad (10)$$

где
$$\rho' = \frac{L}{C_0 |R_d - 1|^2}, \quad \text{а } \rho'_{\text{кр}} \cong \frac{1}{\alpha} + 2 - \frac{2}{\alpha} \sqrt{\alpha(1+\alpha)}.$$

Результаты расчета обобщенных показателей качества ФГИП с системными параметрами, удовлетворяющими целям функциональной линеаризации преобразовательной характеристики, представлены в табл. 2.

Полученные данные свидетельствуют об эффективности методов функциональной линеаризации преобразовательных характеристик генераторных преобразователей формы информации. Они показывают, что даже без использования дополнительных технических средств, только согласованием параметров соответствующих этапов из общего алгоритма (2), можно получать высокоэффективные технические средства преобразования формы информации.

Список литературы: 1. *Полулях К. С.* Резонансные методы измерений. М., 1980. 120 с. 2. *Болознев В. В.* Функциональные преобразователи на основе связанных генераторов. М., 1982. 88 с. 3. *Лучук А. М.* Устройства передачи дискретной информации. К., 1978. 260 с. 4. *Зеленина А. Г., Афанасьев Ю. В., Зеленин А. Н.* Системные принципы функциональной линеаризации преобразовательных характеристик фазогенераторных измерительных преобразователей. К., 1985. 16 с. Деп. в УкрНИИТИ 10.02.85, № 2318У.

Поступила в редколлегию 29.10.85