10. Кшнякин Н.А., Скобелев О.П., Дьяченко Б.П. Вибрационный вискозиметр. Авторское свидетельство № 431426, "Бюллетень" №21, 1974.

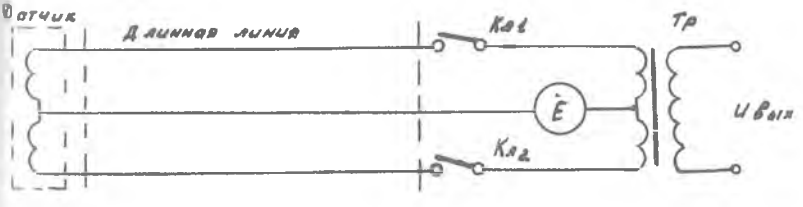
Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

МОСТОВАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ ДЛЯ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Импульсные методы преобразования параметров датчиков и электрические сигналы находят все более широкое применение в измерительных цепях устройств согласования датчиков с системой сбора информации.

Измерительные цепи согласующих устройств СУ могут иметь различные схемы решения. Для индуктивных датчиков лучшими характеристиками обладает мостовая схема со связанными индуктивностями плеч отношения или, так называемый, мост Блумлейна. Приводимый в литературе анализ указанного моста выполнен для гармонического питания и простейшей эквивалентной схемы [1].

Измерительные цепи СУ содержат дополнительные элементы: линию "датчик-СУ" и бесконтактные ключевые элементы (рис. 1).



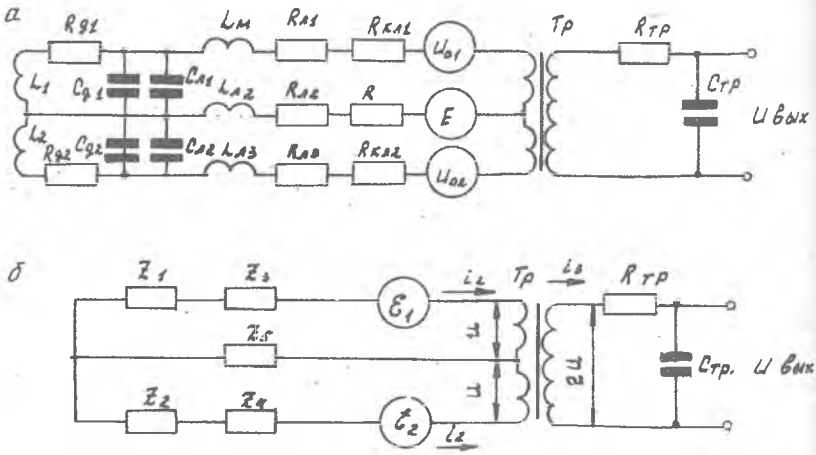
Р и с. 1. Принципиальная схема измерительной цепи

Импульсный режим работы цепи вызывает необходимость учитывать не только основные параметры элементов, но и паразитные (емкости катушек датчика и трансформатора).

В статье приводится вывод уравнения преобразования для измерительной цепи рис. 1, обеспечивающей преобразование параметров индуктивных дифференциальных датчиков в импульсном режиме и реали-

зующей метод первой производной [2].

Эквивалентная схема цепи (рис. 2,а) содержит L_1, L_2 – индуктивности, R_1, R_2 – сопротивления, C_1, C_2 – собственные емкости катушек датчика; $L_{л1}$, $L_{л2}$, $L_{л3}$ – индуктивности,



Р и с. 2. Эквивалентная схема измерительной цепи

$R_{л1}$, $R_{л2}$, $R_{л3}$ – активные сопротивления и $C_{л1}$, $C_{л2}$ – емкости линии; $R_{кл1}$, $R_{кл2}$ – динамические сопротивления и U_{01}, U_{02} – остаточные напряжения ключевых транзисторов; $L_{тр}$, $R_{тр}$, $C_{тр}$ – индуктивность, эквивалентные сопротивление и емкость трансформатора, E – источник постоянного напряжения.

Воспользуемся для нахождения уравнения преобразования операторным методом. Обозначим

$$Z_1 = \frac{R_1 + L_1 P}{1 + R_1 C_1 P + L_1 C_1 P^2}, \quad Z_2 = \frac{R_2 + L_2 P}{1 + R_2 C_2 P + L_2 C_2 P^2},$$

$$Z_3 = R_3 + L_{л1} P, \quad R_3 = R_{кл1} + R_{л1}, \quad \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 - \Delta U_0,$$

$$Z_4 = R_4 + L_{л2} P, \quad R_4 = R_{кл} + R_{л2}, \quad \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_0 + \Delta U_0,$$

$$Z_5 = R_5 + L_{л2} P, \quad R_5 = R_i + R_{л3}, \quad \mathcal{E}_0 = E - U_0,$$

$$z_б = \frac{1 + R_{тр} C_{тр} p}{C_{тр} p}, \quad C_1 = C_{д1} + C_{л1}, \quad u_0 = \frac{u_{01} + u_{02}}{2},$$

$$C_2 = C_{д2} + C_{л2}, \quad \Delta u_0 = \frac{u_{01} - u_{02}}{2}.$$

В результате эквивалентная схема рис. 2,а преобразуется к виду, представленному на рис. 2,б. Процессы в цепи при замыкании ключей $K_{л1}$, $K_{л2}$ описываются системой дифференциальных уравнений в операторной форме:

$$\begin{cases} i_2 z_5 + i_1 z_I = \mathcal{E}_1 - u, \\ i_1 z_5 + i_2 z_{II} = \mathcal{E}_2 + u, \\ i_3 = \dfrac{2u}{z_б}, \\ u = L_{тр} p (i_1 - i_2 - i_3), \\ u_{вых} = 2 \dfrac{u}{1 + R_{тр} C_{тр} p}, \end{cases} \qquad (I)$$

где $z_I = z_1 + z_3 + z_5$, $z_{II} = z_2 + z_4 + z_5$ – сопротивления контуров.

Решая систему уравнений относительно $u_{вых}$, получим:

$$u_{вых} = 2 L_{тр} p \frac{\mathcal{E}_0 (z_{II} - z_I) - \Delta u_0 (z_I + z_{II} + 2 z_5)}{(z_{II} z_I - z_5^2)(1 + R_{тр} C_{тр} p^2) + (z_I + z_{II} + 2 z_5)(L_{тр} p + L_{тр} C_{тр} p^2)} \qquad (2)$$

Подставляя в выражение (2) выражения для сопротивлений, будем иметь:

$$U_{вых} = 2 \mathcal{E}_0 L_{тр} p \frac{(R_2 - R_1)\frac{1}{p} + (L_2 - L_1) + (C_1 - C_2)\sum_{m=0}^{2} d_m p^m + R_{э2} \frac{1}{p} \sum_{k=0}^{4} b_k p^k + (L_{л2} - L_{л1}) \sum_{k=0}^{4} b_k p^k}{\sum_{n=0}^{8} A_n p^n} +$$

$$+ 2 \Delta u_0 L_{тр} p^2 \frac{(R_1 + R_2)\frac{1}{p} + (L_1 + L_2) + (C_1 + C_2)\sum_{m=0}^{2} d_m p^m + R_{э1} \sum_{k=0}^{4} b_k p^k + 6 L_л \sum_{k=0}^{4} b_k p^k}{\sum_{n=0}^{8} A_n p^n},$$

где $R_{э1} = R_{кл1} + R_{кл2} + R_{л1} + R_{л2} + 4R_{л5} + 4R_i$, $R_{э2} = (R_{кл2} - R_{кл1}) + (R_{л2} - R_{л1})$, d_m, b_k, A_n – коэффициенты, связанные с параметрами схемы.

Выражение (3) является решением дифференциального уравнения восьмого порядка. Для нахождения оригинала необходимо понижение порядка уравнения. Способ понижения должен учитывать метод преобразования, особенностью которого является то, что за результат преобразования принимается значение выходного сигнала в начале регулярной области переходного процесса. Область выходного сигна-

15-3465

ла, прилегающая к $t \to 0$ (иррегулярная область), не используется для целей преобразования, так как здесь выходной сигнал формируется в основном паразитными параметрами цепи.

Учитывая, что члены дифференциального уравнения оказывают не одинаковое влияние на различные участки переходного процесса (начальная область формируется в основном составляющими высокого порядка, конец переходного процесса – членами уравнения низкого порядка), понижение порядка осуществлено за счет отбрасывания в знаменателе изображения выходного сигнала членов A_0, A_1 и $A_5 \div A_8$. В результате выражение (3) примет вид

$$u_{вых} = 2\varepsilon_0 \frac{L_{тр}}{A_4} \frac{\frac{R_2 - R_1}{p} + (L_2 - L_1) + (C_1 - C_2)\sum_{m=0}^{2} d_m p^m + \frac{R_{э2}}{p}\sum_{k=0}^{4} b_k p^k + (L_{л2} - L_{л1})\sum_{k=0}^{4} b_k p^k}{p^2 + a_1 p + a_0} +$$

$$+ 2\Delta u_0 \frac{L_{тр}}{A_4} \frac{\frac{R_1 + R_2}{p} + (L_1 + L_2) + (C_1 + C_2)\sum_{m=0}^{2} d_m p^m + \frac{R_{э1}}{p}\sum_{k=0}^{4} b_k p^k + \delta L_л \sum_{k=0}^{4} b_k p^k}{p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (4)$$

где $a_0 = \frac{A_2}{A_4}$, $a_1 = \frac{A_3}{A_4}$.

На основании анализа, учитывающего количественное соотношение параметров реальной измерительной цепи, получены приближенные выражения для коэффициентов:

$$a_0 \cong \frac{1}{L_0 C_0} \frac{h_1 h_2}{h_3}, \quad a_1 \cong 2\frac{R_0}{L_0}\frac{h_4}{h_3}, \quad \frac{A_4}{L_{тр}} \cong 2L_0^2 C_0 h_3,$$

где $L_0 = \frac{L_1 + L_2}{2}$, $C_0 = \frac{C_1 + C_2}{2}$, $R_0 = \frac{R_1 + R_2}{2}$, $h_1 = 1 + \frac{3L_л}{L_0}$;

$$h_2 = 1 + \frac{1}{2}\frac{L_0}{L_{тр}}\left(1 - \delta L^2\right), \quad \delta L = \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1}, \quad h_3 = \left(1 + 6\frac{L_л}{L_0}\right) + \left(1 + 4\frac{L_л}{L_0}\right)\frac{C_{тр}}{2C_0};$$

$$h_4 = \frac{R_{кл} + R_л + R_i + 6R_0\frac{L_л}{L_0}}{R_0}\left\{1 + \frac{C_{тр}}{2C_0}\left[\frac{R_к}{R_к + R_л + 6R_0\frac{L_л}{L_0}} + \frac{L_л}{L_0}\frac{R_к + R_0 + R_{кл}}{R_к + R_л + 6R_0\frac{L_л}{L_0}}\right]\right\};$$

$$R_к = R_{кл} + 2R_л + R_0 + R_i.$$

Экспериментально установлено, что переходный процесс цепи имеет колебательный характер. Для этого случая оригинал выходного напряжения определится выражением

$$u_{вых} = 2\varepsilon_0\left[\frac{1}{h_1h_2}\left(g_1+g_2\frac{t}{\tau_g}\right)-e^{-\frac{a_1}{2}t}\left(g_3\cos\omega t+\frac{g_4}{Q_{gэ}}\sin\omega t\right)\right]+$$

$$+2\Delta u_0\left[\frac{1}{h_1h_2}\left(g_5+g_6\frac{t}{\tau_g}\right)-e^{-\frac{a_1}{2}t}g_7\cos\omega t\right], \qquad (5)$$

где $\omega=\sqrt{a_0-\left(\frac{a_1}{2}\right)^2}\cong\sqrt{\frac{1}{L_0C_0}\frac{h_1h_2}{h_3}}$ – собственная частота цепи;

$Q_{gэ}=\frac{\rho}{R_0}$ – эквивалентная добротность датчика;

$\rho=\frac{L_0}{C_0}$ – характеристическое сопротивление цепи;

$\tau_g=\frac{L_0}{R_0}$ – постоянная времени датчика;

$$g_1=\delta L_g+\delta L_л\frac{L_л}{L_0};\quad g_2=\delta R_g+\delta R_{кл}\frac{R_{кл}}{R_0}+\delta R_л\frac{R_л}{R_0};$$

$$g_3=\frac{\delta L_g}{h_1h_2}+\delta L_л\frac{L_л}{L_0}\left(\frac{h_1h_2}{h_3}-\frac{2}{h_3}\right)-\frac{\delta C}{h_3};$$

$$g_4=\frac{\delta R_g}{\sqrt{(h_1h_2)^3}}+\left(\delta R_{кл}\frac{R_{кл}}{R_0}+\delta R_л\frac{R_л}{R_0}\right)\left(\sqrt{\frac{h_3}{(h_1h_2)^3}}+\frac{\sqrt{h_1h_2h_3}}{h_3^2}-\frac{2}{\sqrt{h_1h_2h_3}}\right)+$$

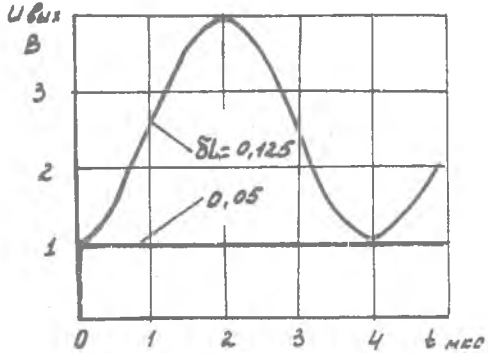
$$+\delta L_g\frac{h_4}{2\sqrt{h_3(h_1h_2)}}+\delta C\left(\frac{2}{\sqrt{h_1h_2h_3}}-\frac{h_4}{2h_3\sqrt{h_1h_2h_3}}\right);$$

$$g_6=1+3\frac{L_л}{L_0};\quad g_5=1+\frac{R_{кл}+3R_л+2R_i}{R_0};\quad \delta L_л=\frac{L_{л2}-L_{л1}}{L_{л2}+L_{л1}};$$

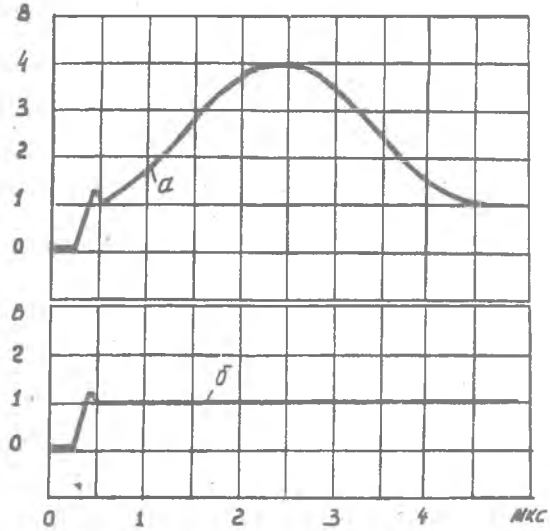
$$\delta R_g=\frac{R_{g2}-R_{g1}}{R_{g2}+R_{g1}};\quad \delta R_{кл}=\frac{R_{кл2}-R_{кл1}}{R_{кл2}+R_{кл1}};\quad \delta C=\frac{C_1-C_2}{C_1+C_2}.$$

Как видно из выражения (5), напряжение на выходе трансформатора пропорционально относительному разбалансу плеч цепи по всем параметрам (δL, $\delta L_л$, δR_g, δC, $\delta R_л$, $\delta R_{кл}$) и разности остаточных напряжений ключевых транзисторов Δu_0. Закон изменения напряжения во времени близок к косинусоидальному, так как синусоидальная составляющая ослаблена в $Q_{gэ}$ раз, а составляющая линейно нарастающего напряжения мала в начальной области переходного процесса ($\frac{t_m}{\tau_g}\ll 1$). Амплитуда первого максимума является результатом преобразования. Время первого максимума t_m определяется из условия равенства нулю первой производной выходного напряжения по времени:

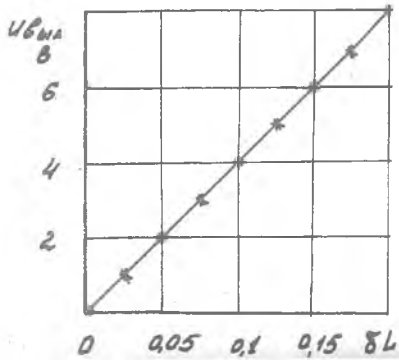
$$\left.\frac{du_{вых}(t)}{dt}\right|_{t=t_m}=0.$$



Р и с. 3. Зависимость выходного сигнала от времени



Р и с. 4. Осциллограммы выходного сигнала: а – $\delta\%$ =0,125;
б – δL = δC =0,05



Р и с. 5. Градуировочная характеристика при δC =0:
○ – экспериментальная; ✱ – расчетная

Выражение (5) после подстановки t_m представляет собой уравнение преобразования измерительной цепи. На рис. 3 представлен выходной сигнал $u_{вых}(t)$, рассчитанный в соответствии с выражением (5) для параметров цепи $\delta L_1 = 0{,}125$, $\delta L_2 = 0{,}05$, $\delta C = 0{,}005$, $\delta R_g = 0{,}005$, $\frac{L_{тр}}{L_0} = 20$, $C_0 = 3 \cdot 10^{-10}$ ф, $L_л = C_л = R_л = U_0 = \delta R_{кл} = R_л = C_л = 0$, $E = 10$В, $L_0 = 0{,}4$ мГн, $R_g = 1$ Ом, $R_{кл} = 3$ Ом, $C_{тр} = 1{,}4 \cdot 10^{-9}$ ф. На рис. 4 приведена осциллограмма выходного сигнала для цепи с параметрами, близкими к расчетным. Сравнение показывает высокое совпадение результатов расчета и эксперимента, что подтверждает правильность принятых допущений при понижении порядка выражения (2). На рис. 5 приведены расчетная и экспериментальная градуировочные характеристики. Относительное изменение индуктивности задавалось с помощью датчика линейных перемещений, имеющего высокую степень линейности зависимости относительного изменения индуктивности от перемещения.

Высокая точность совпадения зависимостей $u_{вых}(t)$ и $u_{вых}(\delta L)$ с экспериментом указывает на возможность использования приближенного уравнения (5) для анализа влияния параметров цепи на характеристики преобразования.

Литература

1. Нуберт Г.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л., "Энергия", 1970.
2. Барсуков Ю.И. и др. Методы преобразования, основанные на тестовых переходных процессах.— В сб.: Автоматизация экспериментальных исследований. Вып. 8, Куйбышев, 1975.

10-3465