

УДК 621 382.8.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКЕ

В.Л. СВИРИД

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28 октября 2016

Аннотация. Предложено оценку эффективности действия отрицательных обратных связей производить на основе разработанного дифференциального метода анализа аналоговой схемотехники, который позволяет учесть особенности измерительного процесса при экспериментальной проверке данной эффективности на соответствующей модели и, следовательно, достичь более достоверного результата, согласованного с теоретическими сведениями.

Ключевые слова: аналоговая схемотехника, обратные связи, эффективность, дифференциальный метод, модель эксперимента, измерение параметров.

Abstract. It was offered to evaluate the performance efficiency of negative feedbacks using the differential method of analog circuitry analysis, which was developed by author. This method allows to take into account the features of measurement process during the experimental test of this efficiency on the given model and to get results that are more reliable, agreed to the theoretical intelligence.

Keywords: analog curcuits, feedbacks, efficiency, differential method, experimental model, parameter measurements.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 108, No. 6, pp. 10-16

**Differential performance evaluation
of feedbacks effectiveness in analog circuitry**

V.L. Svirid

Введение

Отрицательная обратная связь (ООС), являющаяся мощным средством существенного улучшения технических характеристик аналоговой схемотехники, известна с давних времен, однако ее эффективность в ряде случаев оценивалась не по достоинству, в особенности, что касается экспериментального подтверждения. Эти оценки иногда искажались из-за недостаточного качества проводимого эксперимента, так как не всегда учитывались особенности измерительного процесса.

Предлагаемая оценка эффективности действия ООС основана на дифференциальном методе анализа аналоговой схемотехники [1], который позволяет учесть особенности измерительного процесса при экспериментальной проверке данной эффективности на предлагаемой соответствующей модели и, следовательно, достичь более достоверного результата, согласованного с теоретическими сведениями. В качестве критерия эффективности действия ООС принимается, как и прежде, глубина этой связи F при различных типах в виде коэффициента петлевого усиления (КПУ) K_n разорванной ее петли, определяющего совместно с единицей данную глубину ($F = 1 + K_n$).

Реализация обратных связей

Для реализации основных видов ООС в аналоговой схемотехнике предлагается схема-модель (рисунок), основу которой составляет двухкаскадный усилитель на биполярных транзисторах (БТ), соответственно БТ1 и БТ2, работающих в одинаковых режимных условиях, т. е. постоянная составляющая рабочего тока в обоих каскадах одна и та же и составляет $I_0 = 1$ мА, что соответствует собственной крутизне $S = I_0/\varphi_T = 38,5$ мА/В, входному сопротивлению $h_{11} = I_0 / U'_A = \varphi_T (h_{21} + 1) / I_0 = 2,6$ кОм и выходной проводимости $h_{22} = I_0 / U'_A = 5$ мкСм [1]. С помощью данной модели имеется возможность теоретически оценить эффективность четырех основных видов ООС, применяя дифференциальный метод анализа аналоговой схемотехники [1], а затем экспериментально подтвердить эту оценку.

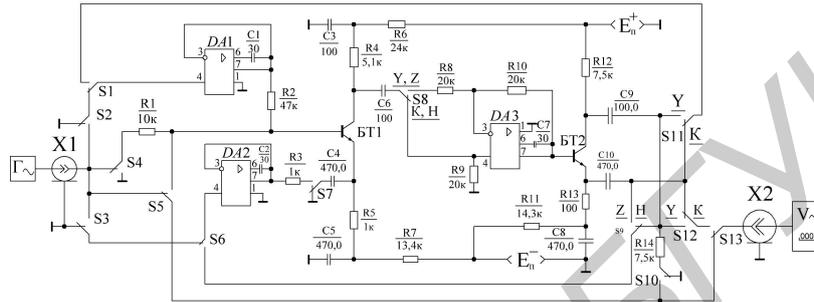


Схема-модель для исследования основных типов ООС в аналоговой схемотехнике

Для исключения влияния цепей ООС на входные и выходные параметры схемы-модели при их коммутации, с целью определения КПУ соответствующих видов ООС введены повторители сигналов $DA1$ и $DA2$ на операционных усилителях (ОУ) типа К574УД1 с основными параметрами: коэффициент передачи $K_0 = 1,5 \cdot 10^5$, входной ток $I_{вх} = 5$ нА, выходное сопротивление $R_{вх} \leq 2$ кОм, что позволяет получить входное и выходное сопротивления повторителя $R_{вх.п} \geq 2$ ГОм, $R_{вх.п} \leq 0,01$ Ом, а коэффициент передачи $K_{п} = 0,99999 = 1$ [2]. В связи с этим данные повторители можно считать идеализированными и их влияние на параметры схемы-модели не учитывать, точно так же, как и дифференциальной операционной схемы (ОС) $DA3$ на том же типе ОУ, реализующей коэффициент передачи по неинвертирующему входу $K_{п.з}^+ = 1$, а по инвертирующему входу $K_{п.з}^- = -R_{10} / R_8 = -1$, с одинаковыми входными сопротивлениями $R_{вх.}^+ = R_9 = 20$ кОм, $R_{вх.}^- = R_8 = 20$ кОм [2].

Дифференциальная ОС ($DA3$) с инвертированием фазы необходима для обеспечения в двухкаскадном усилителе ООС Y и Z -типов, а для ООС K и H -типов такой инверсии сигналов не требуется. Данный прием обеспечивает, по существу, возможность экспериментального определения выходного сопротивления исследуемой модели для различных типов ООС, как общих, так и местных, используя один и тот же (общий) выход, на котором они будут проявляться, и, следовательно, один и тот же образцовый (измерительный) резистор $R_{14} = 7,5$ кОм с переключателем S_{10} .

Резистор R_{14} одновременно является составной частью эквивалентной (расчетной) нагрузки R_n^* , представляющей параллельное соединение резисторов R_{12} и R_{14} ($R_n^* = R_{12} \parallel R_{14}$) для второго каскада на БТ2, и, следовательно, влияющий в зависимости от того, подключен или отключен он от выхода модели, на КПУ и другие параметры, включая собственный коэффициент передачи K_0 схемы-модели. Аналогичная ситуация имеет место и с образцовым (измерительным) резистором $R_1 = 10$ кОм, предназначенным для экспериментального определения (измерения) входных сопротивлений модели при различных видах ООС или без них. С одной стороны, резистор R_1 моделирует внутреннее сопротивление источника сигнала, а с другой – является составной частью цепей ООС, влияющих на искомые параметры. Следовательно, номиналы резисторов R_1 и R_{14} необходимо учитывать при оценке основных параметров модели, которые не должны изменяться при коммутации данных резисторов. Здесь

уместно также отметить, что исследователи ранее на это не обращали внимания и, следовательно, допускали существенные ошибки при измерениях соответствующих параметров.

Положение переключателей $S1...S13$, показанное на схеме-модели (рисунок), считается выключенным (исходным) состоянием. Противоположное положение данных переключателей считается включенным. Уровень входного напряжения, устанавливаемый органами управления генератора $\Gamma\sim$ типа Г4–221, подключенного к клемме X1, можно проконтролировать цифровым вольтметром $V\sim$, например, типа В7-40/1 (погрешность измерения переменных напряжений не превышает $\delta U \leq \pm 0,6\%$), подключенным к клемме X2, при исходных положениях переключателей $S4$, $S5$ и $S13$. Этот уровень целесообразно исходно устанавливать равным, например, $\partial U_{вх} = 1$ мВ или $\partial U_{вх} = 10$ мВ, не допуская при этом превышения выходного напряжения при любых типах ООС или без них $\partial U_{вых. макс.} \leq 10$ В.

Влияние ООС на основные параметры модели определяют при вводе соответствующих их типов. Параллельная по напряжению (Y -связь) реализуется при включенных переключателях $S1$, $S8$, $S11...S13$, последовательная по току (Z -связь) – при включенных $S6...S9$, $S12$ и $S13$, последовательная по напряжению (H -связь) – при включенных $S6$, $S7$, $S12$, $S13$, а параллельная по току (K -связь) – при включенных $S1$, $S12$ и $S13$. Остальные переключатели для каждого вида ООС должны находиться в исходном состоянии.

Измерение основных параметров модели

Измерение основных параметров схемы-модели (рисунок), к которым относятся, прежде всего, КПУ, входные и выходные сопротивления при различных типах ООС, осуществляется следующим образом.

Для измерения КПУ ООС Y -типа необходимо включить переключатели $S1$, $S2$, $S4$, $S8$, $S12$, $S13$ и зафиксировать показания вольтметра $V\sim \partial U_{вых}^Y$. Отношение данного уровня сигнала и установленного входного $\partial U_{вх}$ будет характеризовать искомый параметр.

КПУ ООС Z -типа измеряют аналогично при включенных переключателях $S3$, $S4$, $S7$, $S8$, $S13$. Показания вольтметра $V\sim$ будут характеризовать выходное напряжение $\partial U_{вых}^Z$ разорванной петли ООС данного типа. Остальные переключатели должны находиться в исходном состоянии.

КПУ H -связи измеряют при включенных переключателях $S3$, $S4$, $S7$, $S12$ и $S13$, фиксируя переменное выходное напряжение $\partial U_{вых}^H$ цифровым вольтметром $V\sim$.

Аналогично измеряют КПУ K -связи при включенных переключателях $S2$, $S4$ и $S13$, фиксируя выходное напряжение $\partial U_{вых}^K$.

Собственный коэффициент передачи схемы-модели (рисунок) без ООС $K_0 = \partial U_{вых} / \partial U_{бэ}$ измеряют при включенных переключателях $S5$, $S12$ и исходном положении остальных переключателей за исключением $S13$, исходное состояние которого позволяет оценить переменное напряжение, действующее на переходе база-эмиттер БТ1 ($\partial U_{бэ}$) при установленном посредством генератора $\Gamma\sim$ входном переменном напряжении, например, $\partial U_{вх} = 10$ мВ, а включенное – выходное переменное напряжение $\partial U_{вых}$ с помощью вольтметра $V\sim$. Отношение выходного переменного напряжения к входному, которое измеряется при исходном положении переключателя $S5$, характеризует сквозной коэффициент передачи схемы-модели: $K_c = \partial U_{вых} / \partial U_{вх}$.

Входное сопротивление модели, независимо от вида введенных ООС или без них вообще, определяют, попеременно включая и выключая переключатель $S5$, фиксируя при этом вольтметром $V\sim$ переменные напряжения, действующие на образцовом резисторе R_1 , соответственно $\partial U_{бэ}$ и $\partial U_{вх}$, с последующим вычислением искомого параметра по формуле, получаемой в соответствии с законом Ома:

$$R_{вх} = \frac{\partial U_{бэ}}{\partial I_{вх}} = \frac{\partial U_{бэ}}{(\partial U_{вх} - \partial U_{бэ}) / R_1} = \frac{R_1}{\partial U_{вх} / \partial U_{бэ} - 1}, \quad (1)$$

где $\partial I_{вх}$ – переменная составляющая входного тока, протекающего по резистору R_1 и, следовательно, по входу исследуемой модели.

Выходное сопротивление измеряют независимо от того, введен соответствующий тип ООС или нет при включенных переключателях $S12$ и $S10$, попеременно включая и выключая

переключатель S13, отмечая при этом показания вольтметра V_{\sim} , соответственно, $\partial U_{\text{ВЫХ}}$ и $\partial U_{\text{ВХ}}$, с последующим вычислением определяемого параметра по формуле, получаемой по аналогии с (1):

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial I_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{(\partial U_{\text{ВХ}} - \partial U_{\text{ВЫХ}}) / R_{14}} = \frac{R_{14}}{\partial U_{\text{ВХ}} / \partial U_{\text{ВЫХ}} - 1}, \quad (2)$$

где $\partial I_{\text{ВЫХ}}$ – переменная составляющая выходного тока, протекающего по образцовому резистору R_{14} и, следовательно, по выходу схемы-модели.

Аналитическая оценка эффективности обратных связей

Для аналитического определения параметров схемы-модели (рисунок) следует воспользоваться дифференциальным методом анализа аналоговой схмотехники [1] как наиболее действенным средством, в полной мере характеризующим свойства анализируемой схмотехники.

Так как КПУ независимо от типа ООС в основном формируется двумя каскадами на БТ1 и БТ2 с учетом знака коэффициента передачи дифференциальной ОС $DA3$ ($K_{\Pi.3}^+$ или $K_{\Pi.3}^-$), то для аналитического определения искомого параметра Y -связи можем воспользоваться уравнением (4) из [1] для записи КПУ первого каскада и уравнением (1) [1] – для КПУ второго каскада с учетом обозначений резистивных элементов и их цифровых данных, представленных на рисунке, принимая во внимание, что резистор R_1 является измерительным, но он, как отмечено выше, моделирует внутреннее сопротивление источника сигнала и, следовательно, участвует в формировании искомого параметра:

$$K_{\Pi.1}^Y = \frac{-SR_4 \parallel R_8}{1 + (1/h_{11} + 1/R_1)R_2}, \quad K_{\Pi.2}^Y = \frac{-SR_{12} \parallel R_{14}}{1 + SR_{13}}, \quad (3)$$

где $R_4 \parallel R_8$ и $R_{12} \parallel R_{14}$ – параллельное соединение резисторов R_4 , R_8 и R_{12} , R_{14} .

Общий КПУ для Y -связи записываем на основании уравнения (3):

$$K_{\Pi}^Y = K_{\Pi.1}^Y \cdot K_{\Pi.2}^Y \cdot K_{\Pi.3}^-. \quad (4)$$

С учетом цифровых данных элементов схемы, представленной на рисунке, параметры (3), (4) составляют: $K_{\Pi.1}^Y = -6,58$, $K_{\Pi.2}^Y = -29,77$, $K_{\Pi}^Y = -195,87$.

На основании уравнений (10) и (6) из [1] записываем соответственно соотношение для КПУ первого и второго каскадов ООС Z -типа:

$$K_{\Pi.1}^Z = \frac{SR_4 \parallel R_8}{\left(1 + \frac{R_1 \parallel R_2}{h_{11}}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_5}\right) + SR_3}, \quad K_{\Pi.2}^Z = \frac{1}{1 + \frac{1}{SR_{13}}}. \quad (5)$$

Общий КПУ для Z -связи с учетом (5) имеет вид

$$K_{\Pi}^Z = K_{\Pi.1}^Z \cdot K_{\Pi.2}^Z \cdot K_{\Pi.3}^-. \quad (6)$$

Принимая во внимание цифровые данные параметров, входящих в (5), (6), получаем:

$$K_{\Pi.1}^Z = 3,34, \quad K_{\Pi.2}^Z = 0,79, \quad K_{\Pi}^Z = -2,639.$$

КПУ H - и K -связей записываем на основании соотношений (5) и (3) с учетом коэффициента передачи дифференциальной ОС $K_{\Pi.3}^+$:

$$K_{\Pi}^H = K_{\Pi.1}^Z \cdot K_{\Pi.2}^Y \cdot K_{\Pi.3}^+, \quad K_{\Pi}^K = K_{\Pi.1}^Y \cdot K_{\Pi.2}^Z \cdot K_{\Pi.3}^+. \quad (7)$$

При цифровых данных параметров, входящих в (7), имеем КПУ для этих ООС:

$$K_{\Pi}^H = -25,78, \quad K_{\Pi}^K = -5,198.$$

Входное сопротивление (1) для параллельной по входу ООС Y -типа можем определить аналитически следующим образом:

$$R_{\text{ВХ}}^Y = \frac{\partial U_{\text{ВХ}}}{\partial I_{\text{ВХ}} + \partial I_{R_1} + \partial I_{R_2}} = \frac{\partial U_{\text{ВХ}}}{\frac{\partial U_{\text{ВХ}}}{h_{11}} + \frac{\partial U_{\text{ВХ}}}{R_1} + \frac{\partial U_{\text{ВХ}} - \partial U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{11}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1 + K_0}{R_2}}, \quad (8)$$

где ∂I_{δ} и ∂I_{R_1} , ∂I_{R_2} – переменные составляющие токов, протекающих в цепи базы БТ1 и по резисторам R_1 , R_2 соответственно.

Входящий в (8) собственный коэффициент передачи по напряжению экспериментальной модели аналитически записываем на основании соотношений (3) при условии $R_2 = 0$ и с учетом $K_{\Pi,3}^- = -1$:

$$K_0 = K_{\Pi,1}^Y \Big|_{R_2=0} \cdot K_{\Pi,2}^Y \cdot K_{\Pi,3}^- = -SR_4 \parallel R_8 \cdot SR_{12} \parallel R_{14} / (1 + SR_{13}). \quad (9)$$

С учетом вышеприведенных цифровых данных коэффициент (9) $K_0 = -4658$.

Входное сопротивление модели без ООС следует из уравнения (8) при условии $K_0 = 0$:

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх},F}^Y \Big|_{K_0=0} = h_{11} \parallel R_1 \parallel R_2. \quad (10)$$

Представляет интерес оценка входного сопротивления с ООС посредством соответствующего КПУ, которое для Y -связи можем записать на основании (10) с учетом (4):

$$R_{\text{вх.КПУ}}^Y = R_{\text{вх}} / (1 + K_{\Pi}^Y). \quad (11)$$

Для цифровых данных параметров, входящих в соотношения (8), (10) и (11), получаем: $R_{\text{вх},F}^Y = 10,035$ Ом, $R_{\text{вх}} = 1,9767$ кОм, $R_{\text{вх.КПУ}}^Y = 10,041$ Ом.

Как видим, совпадение расчетных данных (8) и (11) исключительно точное, естественно, в пределах погрешности вычисления цифровых значений, несмотря на разный вид представления искомого параметра, и это является исключительно важным результатом, так как в известных источниках информации, например, [3, 4], такое соответствие не определялось и не обсуждалось.

Принимая во внимание полученный результат, в дальнейшем входные сопротивления исследуемой модели при других типах ООС будем аналитически определять, используя соответствующие значения КПУ.

Входное сопротивление при введении параллельной ООС по току (K -связь) можем записать по аналогии с (11), используя соотношения (10) и (7):

$$R_{\text{вх.КПУ}}^K = R_{\text{вх}} / (1 + K_{\Pi}^K), \quad (12)$$

которое с учетом цифровых данных составляет $R_{\text{вх.КПУ}}^K = 318,9$ Ом.

При последовательных ООС Z - и H -типов трансформации в большую сторону подвергается в основном входное сопротивление БТ1 h_{11} . Другие же составляющие входного сопротивления (10), участвующие в формировании КПУ, подлежат изменению косвенно. Тем не менее для данных связей с учетом соотношений (10), (6) и (7) получаем входные сопротивления в следующем виде:

$$R_{\text{вх.КПУ}}^Z = R_{\text{вх}} (1 + K_{\Pi}^Z), \quad R_{\text{вх.КПУ}}^H = R_{\text{вх}} (1 + K_{\Pi}^H). \quad (13)$$

С учетом цифровых данных входные сопротивления (13) приобретают значения $R_{\text{вх.КПУ}}^Z = 7,193$ кОм, $R_{\text{вх.КПУ}}^H = 198,54$ кОм.

Выходное сопротивление схемы-модели (рисунок) с ООС Y -типа аналитически можем определить по аналогии с входным (8), модифицируя представление (2) и пренебрегая током цепи ООС, благодаря идеализированным свойствам повторителя сигнала DA1:

$$R_{\text{вх.},F}^Y = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial I_{R_n}^* + \partial I_{\text{БТ}}} = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\frac{\partial U_{\text{вых}}}{R_n^*} + (\partial U_{\text{вых}} - \partial E_{\text{вых}}) h_{22}^*} = \frac{1}{\frac{1}{R_{12} \parallel R_{14}} + \left(1 - \frac{\partial E_{\text{вых}}}{\partial U_{\text{вых}}}\right) h_{22}^*}, \quad (14)$$

где $\partial I_{R_n}^*$, $\partial E_{\text{вых}}$ и h_{22}^* – переменная составляющая выходного тока, протекающего по эквивалентной (расчетной) нагрузке R_n^* , выходная ЭДС, действующая внутри БТ2 и образуемая за счет усиления переменного напряжения ∂U_{δ} в K_0 раз, и расчетная выходная проводимость БТ2, получаемая за счет действия в нем местной ООС Z -типа, обусловленная резистором R_{13} [1];

$$\partial E_{\text{вых}} = \partial U_{\delta} K_0 = \frac{\partial U_{\text{вых}} R_1 \parallel h_{11}}{R_2 + R_1 \parallel h_{11}} K_0 = \frac{\partial U_{\text{вых}} K_0}{1 + (1/h_{11} + 1/R_1) R_2}; \quad (15)$$

$$h_{22}^* = \frac{h_{22}}{1 + SR_{13}} = \frac{I_0}{U_A (1 + SR_{13})}. \quad (16)$$

Подставляя (15) в (14) и учитывая (9) и (4), получаем искомое выходное сопротивление в удобном для практического использования виде

$$R_{\text{вых.}F}^Y = \left(\frac{1}{R_{12} \parallel R_{14}} + \left[1 - \frac{K_0}{1 + (1/h_{11} + 1/R_1)R_2} \right] h_{22}^* \right)^{-1} = \left[\frac{1}{R_{12} \parallel R_{14}} + (1 + K_{\Pi}^Y) h_{22}^* \right]^{-1}. \quad (17)$$

Выходное сопротивление без ООС получаем на основании (17) при условии $K_{\Pi}^Y = 0$

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вых.}F}^Y |_{K_{\Pi}^Y=0} = \left(\frac{1}{R_{12} \parallel R_{14}} + h_{22}^* \right)^{-1} = R_{12} \parallel R_{14} \parallel \frac{1}{h_{22}^*}. \quad (18)$$

С учетом цифровых данных параметров, входящих в (16)–(18), расчетные выходные проводимости и сопротивления составляют: $h_{22}^* = 1,031$ мкСм, $R_{\text{вых.}F}^Y = 2,129$ кОм, $R_{\text{вых}} = 3,786$ кОм.

При других типах ООС трансформации будет подвергаться, как видно из (17), только расчетная выходная проводимость h_{22}^* (16), причем для ООС по напряжению она увеличивается, а по току – уменьшается в соответствующую глубину ООС ($F = 1 + K_{\Pi}$) раз. В связи с этим выходные сопротивления для ООС H-, Z- и K-типов представим с учетом соответствующих их КПУ (6) и (7):

$$R_{\text{вых.}F}^H = \frac{1}{\frac{1}{R_{12} \parallel R_{14}} + (1 + K_{\Pi}^H) h_{22}^*}, \quad R_{\text{вых.}F}^Z = \frac{1}{\frac{1}{R_{12} \parallel R_{14}} + \frac{h_{22}^*}{1 + K_{\Pi}^Z}}, \quad R_{\text{вых.}F}^K = \frac{1}{\frac{1}{R_{12} \parallel R_{14}} + \frac{h_{22}^*}{1 + K_{\Pi}^K}}. \quad (19)$$

Представленные выходные сопротивления с учетом цифровых данных параметров, входящих в (19), приобретают значения: $R_{\text{вых.}F}^H = 2,701$ кОм, $R_{\text{вых.}F}^Z = 3,746$ кОм, $R_{\text{вых.}F}^K = 3,748$ кОм, которые численно не существенно отличаются от выходного сопротивления без ООС (18), что особенно характерно для ООС Z- и K-типов. Во многом такой результат обусловлен заметным уменьшением расчетной выходной проводимости h_{22}^* (16) за счет местной ООС, действующей в каскаде на БТ2 (резистор R_{13}).

Экспериментальная проверка эффективности обратных связей

Полученные расчетные цифровые данные основных параметров, характеризующих действие ООС в аналоговой схемотехнике, подвергнуты экспериментальной проверке с помощью схемы-модели, представленной на рисунке.

В результате экспериментальных исследований рассматриваемых типов ООС весьма точно подтвердились все расчетные цифровые данные, включающие собственный коэффициент передачи K_0 (9), КПУ (4), (6), (7), входные (8), (10)–(13) и выходные (17)–(19) сопротивления, естественно, в пределах тех ограничений, которыми характеризуются по погрешностям используемые стандартные измерительные приборы, прежде всего цифровой вольтметр V_{\sim} .

Измерения проводились на рабочей частоте $f_{\text{изм}} = 1$ кГц с соблюдением тех рекомендаций, которые изложены выше. Номиналы образцовых (измерительных) резисторов R_1 и R_{14} предварительно подобраны из ряда стандартных типа С5-60 с разбросом сопротивлений не более $\delta R \leq \pm 0,1\%$.

На основании полученных экспериментальных данных можно утверждать, что схема-модель отражения действия ООС определена верно, а дифференциальный метод анализа ООС показал исключительно высокую эффективность в реальной ситуации.

Заклучение

В результате теоретических исследований впервые установлено полное соответствие представления входных и выходных сопротивлений аналоговой схмотехники посредством закона Ома и КПУ соответствующих типов ООС, а по итогам эксперимента подтверждена исключительно высокая эффективность дифференциального метода оценки и схемы-модели отражения действия ООС в аналоговой схмотехнике и показана возможность исключения влияния измерительных цепей при определении входных и выходных сопротивлений на другие параметры устройств с различными видами ООС.

Список литературы

1. Свирид В.Л. Дифференциальный метод анализа аналоговой схмотехники // Докл. БГУИР. 2016. № 8 (102). С. 39–45.
2. Свирид В.Л. Аналоговая микросхмотехника. Ч.1: Интегральные микросхемы. Системотехническое проектирование радиоэлектронной аппаратуры. Минск: БГУИР, 2003. 232с.
3. Наундорф У. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. М.: Техносфера, 2008. 472 с.
4. Корис Р., Шмидт-Вольтер Х. Справочник инженера-схмотехника. М.: Техносфера, 2006. 608 с.

References

1. Svirid V.L. Differencial'nyj metod analiza analogovoj shemotehniki // Dokl. BGUIR. 2016. № 8 (102). S. 39–45. (in Russ.)
2. Svirid V.L. Analogovaja mikroshemotehnika. Ch.1: Integral'nye mikroshemy. Sistemotehnicheskoe proektirovanie radiojelektronnoj apparatury. Minsk: BGUIR, 2003. 232 s. (in Russ.)
3. Naundorf U. Analogovaja jelektronika. Osnovy, raschet, modelirovanie. M.: Tehnosfera, 2008. 472 s. (in Russ.)
4. Koris R., Shmidt-Vol'ter H. Spravochnik inzhenera-shemotehnika. M.: Tehnosfera, 2006. 608 s. (in Russ.)

Сведения об авторе

Свирид В.Л., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Svirid V.L., PhD., associate professor, associate professor of information radioengineering department of Belarussian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-666-28-36;
e-mail: kafitu@bsuir.by
Свирид Владимир Лукич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6
Belarussian State University of
Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-666-28-36;
e-mail: kafitu@bsuir.by
Svirid Vladimir Lukich