Записки Ленинградского горного института.
Т. 128. СПб, 1991

УДК 62-83:621.335:681.3

В.В.АЛЕКСЕЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОЭВМ ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ БЛОКОВ УМНОЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Специализированный умножитель для систем векторного управления частотным приводом обладает расширенными функциональными возможностями благодаря наличию дополнительных входов, малому дрейфу нулевого уровня и минимальному коэффициенту ошибочной передачи входного сигнала. Принцип действия, рекомендации и методика расчета специализированного умножителя (см. рисунок) изложены в работах [1-3].

Для расчета специализированного умножителя может быть использована микроЭВМ. Оптимизация программы расчета на микроЭВМ серии «Электроника МК» ограничена лишь объемом памяти, который не позволяет хранить ряды номинальных величин: номинальные сопротивления (например, ряд Е192), ряды напряжений стабилизации стабилитронов ($U_{п.о}$), отклонения номиналов резисторов εR (при расчете случайной ошибки) и т.д. В программах, содержащих расчет таких номинальных величин, приходится прерывать вычисления по программе и вводить соответствующие ближайшие стандартные номиналы вручную.

Программы для микроЭВМ приведены с реализацией расчета параметров и общей систематической погрешности $\delta'_с(U)$ при внешней подстройке и температуре $T = 293$ К умножителя со следующими исходными данными:

Приведенная систематическая погрешность (нелинейность) $\delta'_{с.доп} = 0{,}8$ %

Дрейф нулевого уровня $\sigma_{др.доп}(\delta U) = 0{,}006$ %

Минимальное сопротивление входов $R_{вх.min} = 30$ кОм

Предел подстройки коэффициента передачи $\alpha_к = \pm 5$ %

Напряжение питания $U_п = \pm 15$ В

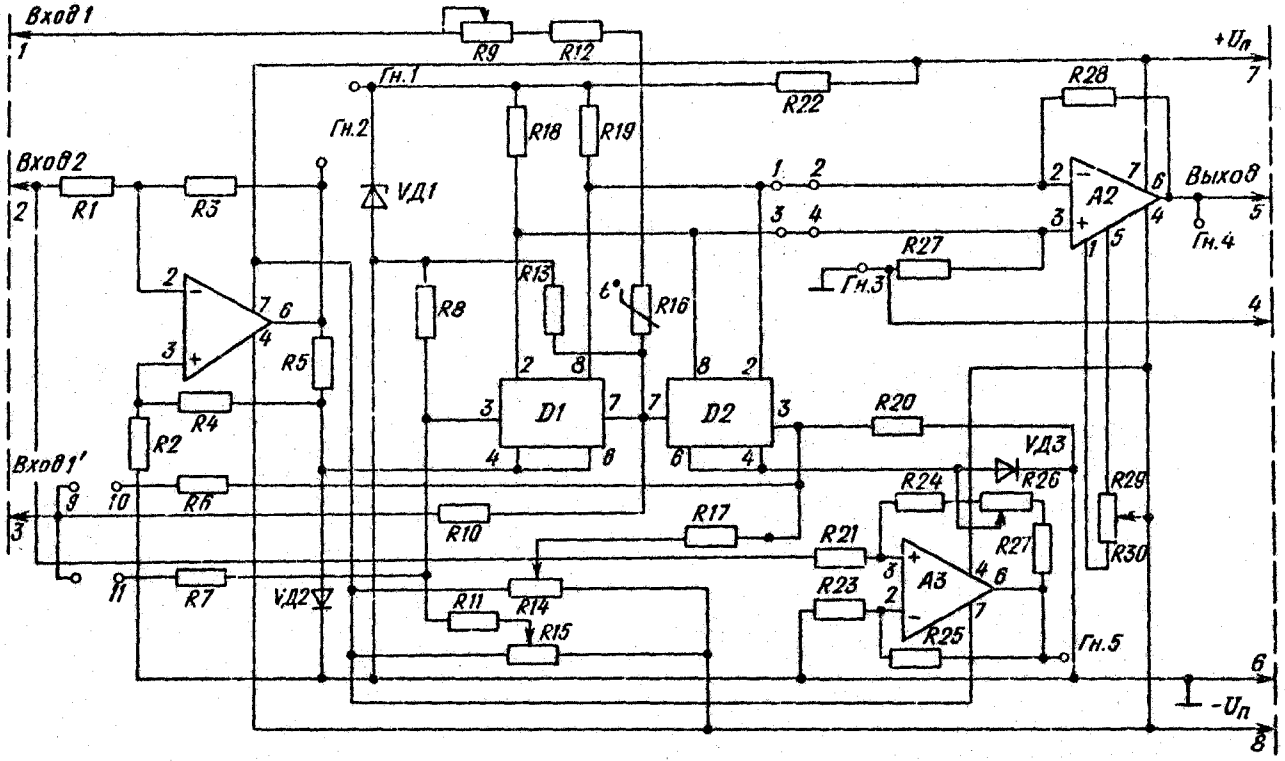
Максимальные входные и выходное напряжения $U_{max} = 10$ В

Тип резисторов С2-29 В (ряд Е192) или ОМЛТ 0,125-0,5 %

Терморезисторы типа КМТ (ММТ) с допуском на сопротивление $\varepsilon R_T = \pm 10$ % и постоянной $B_T = 3600$

Стабилитроны серии КС с номинальным напряжением $U_{п.о} = 7$-10 В; с минимальным и максимальным током стабилизации $I_{ст.min} = 3$ мА; $I_{ст.max} = 20$ мА

Микросхема дифференциального каскада 159НТ1В с параметрами: коэффициент усиления тока $\alpha = 0{,}9877$; сопротивление базы $r_б = 50$ Ом; разность прямых падений напряжения эмиттер-база $\Delta U_{б.э} = 3$ мВ; коэффициент ЭРЛИ $U_Y = 1250$ В; поправочный коэффициент $n_к = 1{,}01$-$1{,}02$.



Принципиальная схема специализированного умножителя на базе интегральных согласованных пар 159НТ1В

Программа I. Расчет максимального входного напряжения $u_{1.max}$ на базах транзисторов дифференциальных каскадов $D1$, $D2$, при которых нелинейность $\delta'_{c.1}$ не превышает допустимого уровня $\delta'_{c.доп}$ с точностью до ϵ:

$$\delta'_{c.доп} - K\epsilon < \left| \left(\frac{2n_к \varphi_T th(u_{1.max}/2n_к\varphi_T)}{u_{1.max}} - 1 \right) / 2{,}72 \right| < \delta'_{c.доп} + \epsilon .$$

Расчет общей систематической погрешности $\delta'_c(U) = \delta'_{c.max}$:

$$\delta'_c(U) \cong \delta'^2_c + 1{,}19\,\delta'_c .$$

Программа имеет вид:

ИП7	ИП2	÷	ИП8	÷	П9	Fe^x	В↑	FI/x	-
2	÷	В↑	Fx^2	1	+	$F\sqrt{}$	÷	ПЕ	ИП9
-	/-/	ИП9	÷	ПВ	ИП6	÷	П5	ИПС	-
П1	ИПД	-	Fx≥0	41	ИП7	ИПО	-	П7	БП
00	ИП1	ИП3	+	Fx<0	52	ИП7	ИП4	+	П7
БП	00	ИП5	Fx^2	ИП5	1	.	1	9	x
+	ПА	ИП5	ИП7	С/П					

Ввод: $-H$ = 0,I = P0 (шаг, мВ); $2n_к$ = 2,03 = P2; $\delta'_{c.доп}$ = 0,008 = = PC; ϵ = $8\cdot10^{-6}$ = PД; $K\epsilon$ = $8\cdot10^{-5}$ = P3; $+H$ = 0,25 = P4 (шаг); 2,72 = = P6; $u_{1.max}$ = I3,6 = P7 (ориентировочное напряжение, мВ); φ_T = 25,3 = = P8 (тепловой потенциал, мВ).

Вывод результатов: P7 = $u_{1.max}$ = I3,25 мВ; P5 = $\delta'_{c.1}$ = 0,00795; PA = $\delta'_{c.max}$ = 0,0095; PB = $\delta'_{c.1}$ = $2{,}16I\cdot10^{-2}$ (относительная погрешность); PI = $\delta'_{c.1} - \delta'_{c.доп} = -5{,}5\cdot10^{-5}$.

Рекомендации: для $\delta'_{c.доп}$, равных I, 3, 5, I0 %, принимать ориентировочные, начальные напряжения соответственно I5, 22, 27, 57 мВ; $K \geq$ I0; $+H/-H \geq 2{,}5$; для микроЭВМ «Электроника БЗ-34 , МК-56, МК-54" вместо оператора ПЕ применить сператор КНОП.

Программа 2. Расчет максимального тока ICT (AI, A3), обеспечивающего приведенную нелинейность по входу 2 $\delta'_{c2} = \delta'_{c.1} = \delta'_c$ согласно выражению

$$R'_c R_к (0{,}379 - 0{,}27\delta'_c) I^2_{0.max} + \left\{ (0{,}492 - 1{,}04\delta'_c) \times \right.$$
$$\left. \times \left[R_к \varphi_T + R'_c U_Y (1-\alpha) \right] \right\} I_{0.max} - 4\varphi_T U_Y \delta'_c = 0 ,$$

где $R_к = R18 = R19$ – сопротивление коллекторной нагрузки, равное 9–I0 кОм; $R'_c = R_c + r_б$ = 49,9 + 50 = 99,9 ≈ I00 Ом; $R_c = R13 = R8 = = R20 \geq R_{вх.min} u_{1max}/U_{max}$ = 49,9 Ом.

Программа имеет вид:

1	ИП5	-	ИП6	x	ИП3	x	ИП4	ИП8	x
+	0	.	4	9	2	ИПО	1	.	0
4	x	-	x	ПВ	0	.	3	7	9

ИП0	0	.	2	7	x	-	ИП3	x	ИП4
x	ПА	4	/-/	ИП8	x	ИП6	x	ИП0	x
ПС	7	0	П7	КИП7	÷	ИПА	÷	2	-
П1	КИП7	←→	-	ИПА	÷	2	÷	П2	С/П
ИПА	ИПС	x	4	x	ИПВ	Fx^2	←→	-	$F\sqrt{}$
ИПВ	/-/	В/О							

Ввод: $\delta_c' = 0{,}008 = $ P0; $R_c' = 99{,}9 = $ P3; $R_к = 9090 = $ P4; $\alpha = $ P5; $U_Y = $ P6; $\varphi_T = 0{,}0253 = $ P8.

Вывод: PI = $I_{0max} = 8{,}76 \cdot 10^{-4}$ А.

Программа 3. Расчет номинального напряжения $U_{п.о}$ стабилитрона и сопротивления органичительного резистора $R22$:

$$R22 = (U_п - U_{п.о})/(I_{ст} + 2I_{0.max}),$$

где $$U_{п.о} = 0{,}5 I_{0max} R_к \left(1 + \frac{u_{1max}}{2\varphi_T}\right) + U_{зап}; \quad \{U_{зап} = 2 \div 5\ В\}.$$

Расчет сопротивлений резисторов внешних цепей ГСТ (A1, A3):

$$R1 = R2 = R21 = R23 = \frac{U_{max}}{K1 I_{0.max}} = \frac{U_{max}}{(0{,}35 \div 0{,}45) I_{0.max}};$$

$$R5 = \frac{U_{гст}}{I_{0.max}} = \frac{3{,}5 \div 8}{I_{0max}};$$

$$R3 = R25 = \frac{R1 \cdot R5 \cdot I_{0.max}}{U_{max}};$$

$$R4 = R3 - R5;$$

$$R29 = R25(0{,}01 \div 0{,}04) = 0{,}025 \cdot R25 = R25 - R26 - R24,$$

где $R24 = R4 - (1 - \gamma)R29$; $R26 = R5 - \gamma R29$; $\gamma = 0{,}3 \div 0{,}7$.

Программа имеет вид:

ИП7	ИП8	÷	2	÷	1	+	ИП4	x	ИП1
x	2	÷	ИП2	÷	ПС	С/П	ПС	/-/	1
5	+	ИПД	ИП1	2	x	+	÷	ПА	1
0	ИП1	ИП9	x	÷	ПВ	С/П	ПВ	ИП0	ИП1
÷	П3	С/П	П3	ИП1	x	ИПВ	x	1	0
÷	П5	С/П	П5	ИП3	-	П6	С/П	ИП5	0
.	0	2	5	x	ПЕ	С/П			

Ввод: $U_{гст} = 3{,}52 = $ P0; $I_{0.max} = 8{,}76 \cdot 10^{-4} = $ PI; $U_{зап} = 4 = $ P2; $R_к = 9090 = $ P4; $u_{1.max} = 0{,}01325 = $ P7; $\varphi_T = 0{,}0253 = $ P8; K1 = 0,365 = = P9; $I_{ст} = 6{,}1 \cdot 10^{-3} = $ РД.

Вывод. После нажатия В/О, С/П высвечивается результат расчета РС = $= U_{п.о} = 9{,}024$. Выбираем ближайшее стандартное напряжение стабилитрона, вводим $U_{п.о} = 9{,}1$ = РХ и нажимаем клавишу С/П. Высвечивается результат расчета сопротивления РБ = $R1$ = 31275. Выбираем ближайший номинал ряда Е192, вводим $R1$ = 31200 = РХ и нажимаем клавишу С/П. Высвечивается результат расчета Р3 = $R5$ = 4018, выбираем ближайший стандартный номинал, вводим $R5$ = 4020 = РХ и нажимаем клавишу С/П. Высвечивается результат расчета Р5 = $R3$ = 10987, выбираем ближайший стандартный номинал, вводим $R3$ = 11000 = РХ и нажимаем клавишу С/П. Высвечивается результат расчета Р6 = $R4$ = 6980 Ом. Если полученный номинал далек от стандартного, необходимо соответствующим образом изменить величины, вводимые в регистры Р0, Р9, и повторить расчет, нажав клавиши БП,29,С/П, начиная с расчета $R1$ и кончая $R4$. Затем нажимаем клавишу С/П, высвечивается результат расчета РХ = РЕ = $R29$ = 275. Выбираем ближайший номинал из ряда Е24: $R29$ = 270 Ом. При $R29$ = 100 получим согласно приведенным выше выражениям $R24$ = 6810 Ом, $R26$ = 3920 Ом.

Вывод остальных результатов: РА = Р22 = 751; принимаем ближайший номинал ряда Е24, равный $R22$ = 750 Ом.

Программа 4. Расчет температурного дрейфа нуля умножителя (при $U_1 = U_2 = 0$) согласно выражению для дрейфа смещения нуля выбранного интегрального операционного усилителя:

$$\sigma_{др}(\delta U) = \left[\left(1 + R28/R18 + 2R28/R_{вх.д}\right)^2 \times \right.$$
$$\left. \times \sigma^2(U_{др}) + \left\{R28\right\}^2 \sigma^2(I_{др})\right]^{0,5} U^{-1}_{max.вых},$$

где $\sigma(U_{др})$, $\sigma(I_{др})$ - параметры дрейфа, определяемые для выбранного ОУ, исходя из значений дрейфа напряжения смещения $\partial e_{см}/\partial T$ и дрейфа разности входных токов $\partial(\Delta I_{вх})/\partial T$, приводимых в литературе (например, для ОУ типа 544УД1 соответственно 10 мкВ/°С и 0,01 нА/°С [2, с.66]),

$$\sigma(U_{др}) = \frac{1}{3} \frac{\partial e_{см}}{\partial T} \Delta T;$$

$$\sigma(I_{др}) = \frac{1}{3} \frac{\partial(\Delta I_{вх})}{\partial T} \Delta T;$$

$R28$ - сопротивление обратной связи;

$$R28 = R27 = \frac{2\varphi_T (1+\delta_{с.1})(1+\delta_{с.2}) U_{max.вых}}{U_{max.1} I_{0\,max} \alpha};$$

$\delta_{с.2}$ - относительная нелинейность по входу 2,

$$\delta_{с.2} = \frac{R'_с R18 I^2_{0\,max} + 2 I_{0\,max} \left[R18 \varphi_T + R'_0 U_Y (1-\alpha)\right]}{4 \varphi_T U_Y}.$$

Программа имеет вид:

ИП3	ИП4	x	ИП1	Fx^2	x	1	ИП5	-	ИП6
x	ИП3	x	ИП4	ИП8	x	+	2	x	ИП1
x	+	4	÷	ИП8	÷	ИП6	÷	П9	ИП8
2	0	x	1	ИПВ	+	x	1	ИП9	+
x	ИП7	÷	ИП1	÷	ИП5	÷	ПО	ИПО	ИП4
÷	1	+	2	ИПО	x	ИПА	÷	+.	Fx^2
ИП2	Fx^2	x	ИПО	Fx^2	ИПС	Fx^2	x	+	$F\sqrt{}$
1	0	÷	1	0	0	x	ПД	С/П	

Ввод: $I_{0.max} = 8{,}76\cdot10^{-4}$ = Р1; $\sigma(U_{др}) = 10^{-4}$ = Р2; R'_c = 100 = Р3; $R_к$ = 9090 = Р4; α = 0,9877 = Р5; U_Y = 1250 = Р6; $u_{1.max}$ = 0,01325 = = Р7; φ_T = 0,0253 = Р8; $R_{вх.д} = 10^7$ = РА; $\delta_{с.1} = 2{,}161\cdot10^{-2}$ = РВ; $\sigma(I_{др})$ = = 10^{-10} = РС.

Вывод результатов. После нажатия В/О, С/П высвечивается результат расчета $\sigma_{др}(\delta U)$ Рд = РХ = 0,0061 %, который не удовлетворяет расчетному допустимому значению. Следовательно, усилитель 544УД1 применить нельзя. Возьмем усилитель с лучшими параметрами дрейфа напряжения смещения (140УД6) и введем их: $\sigma(U_{др})$ = $6\cdot10^{-5}$ = Р2; $R_{вх.д} = 2\cdot10^6$ = РА; $\sigma(I_{др}) = 5\cdot10^{-10}$ = = РС. Нажав клавиши БП,48,С/П, повторяем расчет и получаем $\sigma_{др}(\delta U)$; Рд = РХ = 0,0037 %. Усилитель 140УД6 можно применить.

Вывод остальных результатов: Р9 = $\delta_{с.2} = 3\cdot10^{-2}$ %; Р0 = $R28 = R27$ = = 46443; принимаем ближайший меньший номинал 46400 Ом.

Программа 5. Расчет номиналов терморезистора $R16$, резисторов $R12$, $R9$, $R11$, ($R17$), $R9$, $R6(R7)$, $R10$:

$$R16 = \frac{\alpha R_ц R10\, T^2}{B_T},$$

где $\alpha R_ц$ - температурный коэффициент, равный 0,0034 1/°С;

$$R10 = \frac{R_c(U_{max.1} - u_{1.max})}{u_{1.max}};$$

$$R12 = R10 - R16(1+|\varepsilon R16|) - R10\alpha_к;$$

$$R9 = \Big((2|\varepsilon R16|)R16 + \delta_{с.2}R10 + 2\alpha_к R10\Big)(1+|\varepsilon R9|) + \Delta R12;$$

$\Delta R12$ - абсолютная разность расчетного и стандартного номиналов резистора Р12;

$$R11 = R17 - \frac{U_п R_c}{\Delta U_{б.э}};$$

$$R6 = R7 \cong \frac{R10}{2(1+\delta_{с.2})^2}.$$

Программа 5 составляется для терморезисторов $R16$ с допуском на сопротивление $\varepsilon R_T = \pm 10$ %, для резисторов $R9$ с допуском $\varepsilon R_П = \pm 5$ % и для $\alpha_K = \pm 5$ %:

1	0	ИП7	-	ИП2	x	ИП7	÷	ПА	0
.	0	0	3	4	x	ИП1	Fx^2	x	ИП0
÷	ПВ	С/П	ПВ	1	.	1	x	/-/	ИПА
0	.	9	5	x	+	ПС	С/П	ПС	-
П5	ИПС	2	ИПВ	x	0	.	1	x	ИП9
0	.	1	0	+	ИПА	x	+	1	.
0	5	x	ИП5	+	ПД	ИП6	ИП2	x	ИП8
÷	П4	1	ИП9	+	Fx^2	$F1/x$	ИПА	x	2
÷	ПЕ	С/П							

Ввод: $B_T = 3600 =$ P0; $T = 293 =$ P1; $R_C = 49{,}9 =$ P2; $R'_C = 100 =$ P3; $U_П = 15 =$ P6; $u_{1.max} = 0{,}01325 =$ P7; $\Delta U_{б.э} = 3 \cdot 10^{-3} =$ P8; $\delta_{c.2} = 3 \cdot 10^{-2} =$ P9.

Вывод результатов. После нажатия В/О, С/П высвечивается результат расчета сопротивления терморезистора РВ = $R16 = 3049$. Выбираем ближайший стандартный номинал ряда Е24, вводим $R16 = 3000 =$ РХ и нажимаем клавишу С/П. Высвечивается результат расчета следующего резистора РС = $R12 = 32429$, выбираем ближайший меньший номинал ряда Е192, вводим $R12 = 32400 =$ РХ и нажимаем клавишу С/П. РД = $R9 =$ (6,8 кОм).

Вывод остальных результатов: РХ = РЕ = $R6 = R7 = 17725$ (17600 Ом); Р4 = $R11 = R17 = 245500$ (240 кОм), РА = $R10 = 37610$ (37400 Ом).

Расчет показывает, что случайная погрешность умножителя с этими данными составляет $\sigma(\delta U) = 0{,}45$ % [3] и определяется параметрами резисторов $R1$-$R5$, $R18$, $R19$, $R21$, $R23$-$R28$ (для резисторов С2-29В допуск $|\varepsilon R| = 0{,}1$ %) и терморезистора $R16$ (допуски $|\varepsilon R_T| = |\varepsilon B_T| = 10$ %).

В диапазоне изменения температуры $\Delta T = 30$ °С благодаря малому температурному коэффициенту (ТКС) резисторов С2-29В превалирует составляющая случайной ошибки, вызванная неточностью изготовления терморезисторов, а при использовании резисторов с допуском более 0,5 % наибольший удельный вес получает составляющая случайной ошибки, вызванная неточностью изготовления резисторов.

Программа 6. Расчет допуска $|\varepsilon R|$ на сопротивления резисторов $R1$-$R5$, $R13$, $R18$, $R19$, $R21$, $R23$-$R28$ из условия обеспечения заданной инструментальной приведенной погрешности $\delta' = 1{,}35$ % (в скобках для $\delta' = 2{,}85$ %) при нормальной температуре $T = 293$ К из выражения

$$|\varepsilon R| = 3\sigma_д(\delta R) \le \frac{\delta' - \delta'_{c.max}}{\bar{S}^U_{ij}},$$

где $\sigma_д(\delta R)$ – среднеквадратическое отклонение сопротивлений резисторов, вызванное неточностью изготовления;

$$\bar{S}^U_{ij} = \sqrt{3 + \sum_{i=0}^{n} \left(S^U_{R'1i}\right)^2 + \sum_{j=0}^{m} \left(S^U_{R'2j}\right)^2},$$

$\bar{S}^{U}_{ij}$ – чувствительность выходного напряжения к изменениям элементов R'_{1i}, R'_{2j} ($\sqrt{3}$ для ГСТ), составляющие которой определяются следующими чувствительностями:

$$S^{U}_{R'_{11}} = S^{U}_{R19} = -\frac{R'_{10}(R'_{21}+2R'_{2})}{R'_{10}(R'_{21}+2R'_{2})+R'_{2}R'_{11}};$$

$$S^{U}_{R'_{10}} = S^{U}_{R28} = -S^{U}_{R19};$$

$$S^{U}_{R'_{21}} = S^{U}_{R18} = -\frac{R'_{2}(R'_{11}+R'_{10})(R'_{21}+R'_{2})}{R'_{21}\left[R'_{10}(R'_{21}+R'_{2})+R'_{2}(R'_{10}+R'_{11})\right]};$$

$$S^{U}_{R'_{2}} = S^{U}_{R27} = \frac{R'_{21}(R'_{10}+R'_{11})R'_{2}}{(R'_{21}+R'_{2})\left[R'_{10}(R'_{21}+R'_{2})+R'_{2}(R'_{11}+R'_{10})\right]}.$$

Расчет составляющей случайной ошибки умножителя, вызванный неточностью изготовления резисторов со стандартным допуском $|\varepsilon R|^{*}$ на сопротивление $\left(|\varepsilon R|^{*} = 3\sigma_{д}(\delta R)\right)$:

$$\sigma_{д}(\delta U) = \frac{1}{3}|\varepsilon R|^{*}\bar{S}^{U}_{ij}.$$

Программа имеет вид:

ИП2	2	x	ИП3	÷	ИП0	x	ПД	ИП2	ИП1
x	ИПД	+	÷	Fx^2	2	x	ПЕ	ИП1	ИП0
+	ИП2	x	П4	ИП2	ИП3	+	П5	x	ИП0
ИП5	x	ИП4	+	ИП3	x	÷	Fx^2	+	ИП4
ИП3	x	ИП5	ИП0	x	ИП4	+	ИП5	x	÷
Fx^2	+	П6	3	+	$F\sqrt{}$	П7	ИП8	ИП9	-
ИП7	3	x	÷	ПА	3	x	ПВ	С/П	ПВ
3	÷	ИП7	x	ПС	С/П				

Ввод: $R28 = 46400 = $ P0; $R19 = 9090 = $ P1; $R27 = 46400 = $ P2; $R18 = 9090 = $ P3; $\delta' = 0{,}0135 = $ P8; $\delta'_{с.max} = 0{,}0095 = $ P9.

Вывод. После нажатия В/О, С/П высвечивается результат расчета допуска на сопротивления РВ = $|\varepsilon R| = 1{,}068\cdot10^{-3}(5{,}07\cdot10^{-3})$. Выбираем ближайший меньший стандартный допуск, вводим $|\varepsilon R|^{*} = 10^{-3}(5\cdot10^{-3}) =$ РХ и нажимаем клавишу С/П. Высвечивается результат расчета составляющей случайной ошибки, вызванной неточностью изготовления резисторов РХ = РС = $\sigma_{д}(\delta U) = 1{,}24\cdot10^{-3}$ $(6{,}23\cdot10^{-3})$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев В.В. Синтез блоков умножения для частотных электроприводов с векторным управлением // Зап. ЛГИ. 1982. Т. 94.

2. Дартау В.А., Алексеев В.В. Средства автоматики электроприводов с блочным векторным управлением / Ленинградский горный ин-т. Л., 1986.

3. Разработка рекомендаций по построению систем векторного управления электроприводом переменного тока: Отчет о НИР / Ленинградский горный ин-т; Руководитель В.В.Рудаков. № ГР 01850015836. Л., 1985.