

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРАНЗИСТОРНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОСНОВАННОЕ НА ГРАНИЧНОЙ МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА

А. К. Макаров

Ленинград

Одним из основных параметров транзисторных логических элементов промышленной автоматики является их нагрузочная способность по входу m и выходу n . Увеличение нагрузочной способности логического элемента приводит к сокращению общего количества элементов, необходимых для построения бесконтактных схем автоматического управления, а следовательно, к снижению стоимости этих систем. Поэтому при проектировании транзисторных логических элементов промышленной автоматики (в отличие от аналогичных устройств вычислительной техники) особое внимание уделяется величине нагрузочной способности.

Последняя зависит от различных факторов, и поэтому в ряде случаев при проектировании схем управления на стандартных логических элементах следует проверять реальное значение их нагрузочной способности в зависимости от схемы или условий работы.

Предлагаемый аналитический и графоаналитический метод, при помощи которого можно определить нагрузочную способность транзисторного логического элемента, основан на граничной методике расчета [1], учитывающей отклонения основных параметров транзистора и условий работы элемента в наименее благоприятную сторону. Для определения нагрузочной способности транзисторного элемента при использовании предлагаемого метода достаточно располагать основными параметрами транзистора и логического элемента.

1. Вывод основных расчетных соотношений. На рис. 1 показаны два последовательно соединенных резисторно-транзисторных элемента, выполняющих логическую функцию ИЛИ — НЕ.

Уровень всех m входных сигналов первого элемента достаточно низок, чтобы T_1 находился в состоянии отсечки; следовательно, T_2 открыт.

В системе возможны отклонения от номинальных значений напряжения — на величину ΔU , сопротивления — на величину ΔR .

Условие отсечки транзистора Для транзистора T_1 (рис. 1) запишем систему уравнений

$$U_{\delta 3} + I_{\text{см}3} R_{\text{м}} = U_{\text{см}};$$

$$U_{\text{см}} + U_{\text{кз}} = I_{\text{вз}} R_{\text{в}} + I_{\text{см}3} R_{\text{см}};$$

$$I_{\text{см}3} = m I_{\text{вз}} + I_{\delta 3}.$$

Решаем эту систему

$$m = \frac{U_{кз} \mp U_{бзз}}{R_B} + I_{бз} = \frac{U_{см} - U_{бзз}}{R_{см}}. \quad (1)$$

При граничных условиях уравнение (1) принимает вид

$$m = \frac{U_{кз \max} \mp U_{бзз}}{R_B (1 - \Delta R)} + I_{бз \max} = \frac{U_{см} (1 - \Delta U) - U_{бзз}}{R_{см} (1 \mp \Delta R)} \quad (2)$$

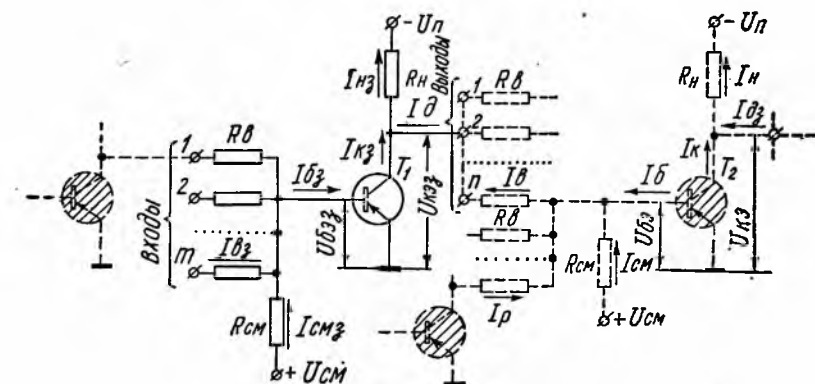


Рис. 1.

Для того, чтобы обеспечить надежное закрывание транзистора, величина $U_{бзз}$, входящая в (2), должна быть

$$U_{бзз} \geq U_{бзз \min}, \quad (3)$$

где $U_{бзз \min}$ — минимальное значение напряжения, при котором транзистор с наименьшим значением внутреннего сопротивления базы находится в состоянии отсечки при самой низкой температуре окружающей среды.

Решая совместно (2) и (3), после некоторых преобразований получаем окончательно условие отсечки

$$\frac{R_B}{R_{см}} \geq A \left[\frac{m (U_{кз \max} \mp U_{бзз \min})}{1 - \Delta R} + R_B I_{бз \max} \right], \quad (4)$$

где

$$A = \frac{1 \mp \Delta R}{U_{см} (1 - \Delta U) - U_{бзз \min}}.$$

Условие насыщения транзистора. Для насыщенного транзистора T_2 (рис. 1) при условии, что входной сигнал подан только на один из входов, а остальные входы подсоединены к «идеально» насыщенным транзисторам, можно написать следующую систему уравнений:

$$U_{кзз} + U_{см} = I_B R_B + I_{см} R_{см}$$

$$U_{кзз} = U_{бз} + I_B R_B$$

$$U_{бз} = I_P R_B$$

$$I_B = I_б + I_{см} + I_P (m - 1).$$

Решение этой системы уравнений дает

$$\frac{U_{кзз} - U_{бз}}{R_B} = I_0 + \frac{U_{см} + U_{бз}}{R_{см}} + \frac{U_{бз}}{R_B} (m - 1). \quad (5)$$

С учетом граничных условий при

$$I_0 > \frac{I_{к\max}}{\beta}, \quad (6)$$

где β — минимальное значение статического коэффициента усиления по току транзистора на границе области насыщения, уравнение (6) принимает вид

$$\frac{U_{кзз\min} - U_{бз}}{R_B (1 + \Delta R)} - \frac{U_{см} (1 + \Delta U) + U_{бз}}{R_{см} (1 - \Delta R)} - \frac{U_{бз} (m - 1)}{R_B (1 - \Delta R)} \geq \frac{I_{к\max}}{\beta}. \quad (7)$$

Чтобы определить величину $I_{к\max}$ составим систему уравнений для точки А выхода транзистора T_1 , когда к ней подсоединено n элементов с учетом того, что $U_{кзз} \gg U_{бз}$.

$$I_{нз} = I_{кз} + I_d;$$

$$I_d = nI_B;$$

$$I_{нз}R_n = U_n - U_{кз};$$

$$I_BR_B = U_{кзз}.$$

Решаем эту систему уравнений

$$\frac{U_n - U_{кзз}}{R_n} = \frac{nU_{кзз}}{R_B} + I_{кз}. \quad (8)$$

С учетом граничных условий уравнение (8) принимает вид

$$\frac{U_n (1 - \Delta U) - U_{кзз\min}}{R_n (1 + \Delta R)} = \frac{nU_{кзз\min}}{R_B (1 - \Delta R)} + I_{кз\max}. \quad (9)$$

Поскольку максимальный ток коллектора насыщенного транзистора может быть определен как

$$I_{к\max} = \frac{U_n (1 + \Delta)}{R_n (1 - \Delta R)}, \quad (10)$$

то, заменив в (9) величину R_n на значение, полученное из (10), после преобразований получим

$$I_{к\max} = B \left[n \frac{U_{кзз\min}}{R_B (1 - \Delta R)} + I_{кз\max} \right], \quad (11)$$

где

$$B = \frac{U_n (1 + \Delta)}{[U_n (1 - \Delta U) - U_{кзз\min}] (1 - \Delta R)}$$

$$\Delta = \Delta U + \Delta R$$

при допущении, что $(1 + \Delta U)(1 + \Delta R) = 1 + \Delta$.

Решая совместно (7) и (11), после преобразований и некоторых упрощений получим условие насыщения в окончательном виде

$$\frac{R_B}{R_{cm}} \leq B \left\{ \frac{U_{кз \min}}{1 + \Delta R} - \frac{B \cdot n \cdot U_{кз \min}}{\beta(1 - \Delta R)} - \frac{R_B}{\beta} B I_{кз \max} - U_{сз} \times \right. \\ \left. \times [m(1 + \Delta R) - 2\Delta R] \right\}, \quad (12)$$

где

$$B = \frac{1 - \Delta R}{U_{cm}(1 + \Delta U) + U_{сз}}.$$

При определении нагрузочной способности логического элемента практически может возникнуть только одна из трех задач:

1. Когда количество элементов n , подключаемых на выход элемента, известно (задано). При этом требуется определить максимально возможное количество элементов m , которые можно подключить на вход без нарушения нормального функционирования элемента в схеме ($m \neq n$; n — известно).

2. Когда известно (задано) количество элементов m , подключаемых на вход элемента, и требуется определить максимальное количество элементов n , которые можно подключить на выход ($m \neq n$; m — известно).

3. Когда количество элементов, подключаемых на вход, принимаем равным количеству элементов, подключаемых на выход, и требуется обеспечить или найти максимальное значение этой величины (случай симметричной нагрузки $m = n = M$).

Все три задачи могут решаться как для определения нагрузочной способности m , n или M логического элемента при известных его параметрах — анализ нагрузочной способности, так и для определения параметров элемента с определенным (заданным) значением нагрузочной способности — расчет логического элемента. Такое решение может быть выполнено графически — построением линий отсечки и насыщения по уравнениям (4) и (12) или аналитически. При определении значений максимальной нагрузочной способности аналитически решаем совместно (4) и (12) и получаем уравнение, описывающее область работы логического элемента,

$$\Gamma m + D \frac{U_{кз \min}}{E - U_{кз \min}} n + \frac{Ж}{E - U_{кз \min}} - И U_{кз \min} + K = 0, \quad (13)$$

где

$$\Gamma = \frac{A(U_{сз \min} + U_{кз \max})}{1 - \Delta R} + BU_{сз}(1 + \Delta R);$$

$$D = \frac{3}{1 - \Delta R}; \quad E = U_n(1 - \Delta U); \quad Ж = 3 \cdot R_B \cdot I_{кз \max};$$

$$3 = \frac{BU_n(1 + \Delta)}{\beta(1 - \Delta R)}; \quad И = \frac{B}{1 + \Delta R}; \quad K = AR_B I_{сз \max} - 2BU_{сз} \Delta R.$$

Определение нагрузочной способности по входу ($m \neq n$ и n — известно). Решив уравнение (13) относительно m , получаем формулу для определения нагрузочной способности по входу при известных параметрах схемы логического элемента

$$m = \frac{CU_{кз \min} - И U_{кз \min}^2 - P}{\Gamma(E - U_{кз \min})}. \quad (14)$$

Может быть поставлена также задача на отыскание величины, соответствующей максимально возможной величине нагрузочной способности по входу для заданного $U_{кэз}$. Для этого возьмем производную по $U_{кэз \min}$ и приравняв ее нулю, решим получившееся квадратное уравнение относительно $U_{кэз \min}$. После преобразований получаем

$$U_{кэз \min} = E \pm \sqrt{E^2 - \frac{P + CE}{I}}. \quad (15)$$

Определение нагрузочной способности по выходу ($m \neq n$ и m известно). Используя уравнение (13), аналогично предыдущему случаю получаем расчетные соотношения

$$n = \frac{QU_{кэз \min} - IU_{кэз \min}^2 - S}{\Delta U_{кэз \min}}; \quad (16)$$

$$U_{кэз \min} = \pm \sqrt{\frac{S}{I}}. \quad (17)$$

Определение симметричной нагрузочной способности ($m = n = M$). Из уравнения (13) получаем расчетные соотношения

$$M = \frac{TU_{кэз \min} - IU_{кэз \min}^2 - P}{\Gamma E - FU_{кэз \min}}; \quad (18)$$

$$U_{кэз \min} = -H \pm \sqrt{H^2 + \frac{P + \Gamma H}{I}}. \quad (19)$$

В уравнениях (14) — (19) приняты следующие обозначения:

$$T = IE + K; \quad P = KE + \mathcal{J}; \quad C = T - Dn; \quad Q = T + \Gamma m;$$

$$S = P + \Gamma Em; \quad F = \Gamma - D; \quad H = \frac{\Gamma E}{F};$$

2. Применение метода для расчета нагрузочной способности логического элемента

Основные величины, необходимые для расчета элемента (рис. 2) принимаем по данным [2]. Эти величины вместе с параметрами транзистора П42А, используемого в схеме, приведены в табл. 1.

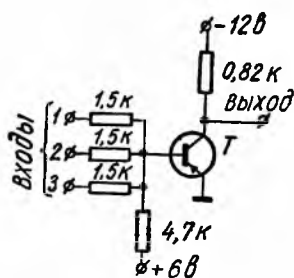


Рис. 2.

Аналитический расчет нагрузочной способности элемента. Рассчитываем коэффициенты для формул (4, 12 — 19). Результаты расчетов сводим в табл. 2.

По формулам 14, 16, 18 определяем нагрузочную способность элемента при граничных условиях. Результаты расчета сводим в табл. 3.

Графоаналитический расчет нагрузочной способности элемента. Подставив в (4) соответствующие значения, получаем условие отсечки:

$$\frac{R_B}{R_{CM}} \geq 0,249 m + 0,0145. \quad (20)$$

Таблица 1

Основные параметры элемента и транзистора П42А

Название параметра		Буквенное обозначение	Величина	Размерность
Элемент ЭТ-ДЮ1	Минимальное отклонение величины питающего напряжения	$-\Delta U$	0,15	—
	Максимальное отклонение величины питающего напряжения	$+\Delta U$	0,1	—
	Максимальное «нулевое» значение входного сигнала	$U_{кз макс}$	0,9	в
	Минимальное «единичное» значение входного сигнала	$U_{кз мин}$	4,0	в
	Отклонение величины сопротивлений	$\pm \Delta R$	0,05	—
	Остальные данные элемента указаны на рис. 2.			
Транзистор П42А	Минимальная величина запирающего напряжения при $T = +50^\circ\text{C}$	$U_{бзз мин}$	$\pm 0,2$	в
	Максимальная величина напряжения между базой и эмиттером насыщенного транзистора при $I_б = 6 \text{ ма}$, $U_н = 12 \text{ в}$, $R_н = 0,8 \text{ ком}$, $T = +50^\circ\text{C}$	$U_{бэ}$	$-0,4$	в
	Максимальная величина обратного тока базы при $U_к = 12 \text{ в}$, $U_{бэ} = 0,5 \text{ в}$, $T = +50^\circ\text{C}$	$I_{бз макс}$	45	мкА
	Максимальная величина обратного тока коллектора при $U_к = 12 \text{ в}$, $U_{бэ} = 0,5 \text{ в}$, $T = +50^\circ\text{C}$	$I_{кз макс}$	90	мкА
	Минимальная величина статического коэффициента усиления по току на границе области насыщения при $T = -40^\circ\text{C}$	β	25	—

Таблица 2

Величина коэффициентов для аналитического расчета

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
0,215	2,343	0,1357	0,306	0,0832	10,2	0,0107	0,079	0,129
К	Т	Р	С			Q		
			при $n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	при $m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
0,0091	1,3261	0,1035	1,2429	1,1597	1,0765	1,6321	1,9381	2,2441
S			F	H				
при $m = 1$	$m = 2$	$m = 3$						
3,2235	6,3435	9,4635	0,2228	13,73				

Таблица 2

Нагрузочная способность элемента

По входу m при			По выходу n при			Симметричная M
$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	
1,46	1,3	1,12	3,72	—	—	1,41

Аналогично по (12) получаем условие насыщения:

$$\frac{R_B}{R_{CM}} \leq 0,5197 - 0,0585n - 0,057m.$$

Здесь следует заметить, что для графоаналитического расчета (4) и (11) достаточно рассчитать только три первых коэффициента из табл. 2.

При симметричной нагрузке выражения 20 и 21 соответственно принимают вид

$$\frac{R_B}{R_{CM}} \geq 0,249M + 0,0145;$$

$$\frac{R_B}{R_{CM}} \leq 0,5197 - 0,1155M.$$

Для определения симметричной нагрузочной способности в координатах $\frac{R_B}{R_{CM}} = f(M)$ строим линии условий отсечки и насыщения (рис. 3).

Заштрихованная часть показывает область возможной работы элемента. Точка a пересечения линий дает значение наибольшей величины симметричной нагрузочной способности.

Эта же величина ранее была определена аналитически (табл. 3). Из рис. 3 видно, что наибольшее значение нагрузочной способности получается при отношении $\frac{R_B}{R_{CM}} \approx 0,355$, но так как у элемента это

отношение равно $\frac{R_B}{R_{CM}} = \frac{1,5}{4,7} = 0,32$, то реальное значение симметричной нагрузочной способности будет меньше и составит $M = 1,25$ (точка b пересечения штрихпунктирной линии с границей области отсечки).

Аналогично используя (20) и (21), графически определяем значения нагрузочной способности по входу (сплошные линии), и по выходу (пунктирные линии) (рис. 4). Совпадение величин нагрузочной способности, полученных аналитическим и графоаналитическим способом, показывает правильность расчетов.

Определение максимальной нагрузочной способности элемента. Как было показано ранее, величина нагрузочной способности элемента при прочих равных условиях зависит от величины $U_{кзз\ мин}$. Для определения значения $U_{кзз\ мин}$, соответствующего максимальной нагрузочной способности элемента, подставим в (15), (17), (19) соответствующие величины из табл. 2. Затем, подставив полученные значения $U_{кзз\ мин}$ в (14), (16), (18), получим максимально возможные значения нагрузочной способности. Результаты расчета сведены в табл. 4

Таблица 4

Максимальная нагрузочная способность логического элемента

По входу			По выходу			Симметричная	
n	$U_{кзз \min}$	m	m	$U_{кзз \min}$	n	$U_{кзз \min}$	M
1	8,06	2,3	1	5	4,25	4,47	1,53
2	6,82	1,75	2	7	1,54		
3	5,89	1,35	3	8,54	—		

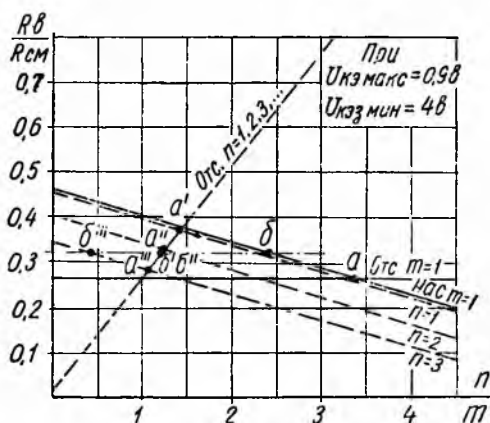


Рис. 3.

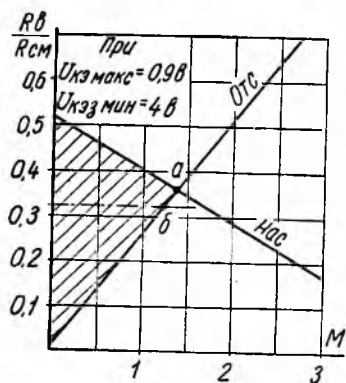


Рис. 4.

Приведенный расчет выполнен для значения «нулевого» напряжения на всех входах логического элемента $U_{кзз \max} = 0,9$. Вполне очевидно, что снизив эту величину, нагрузочную способность элемента получим выше. Минимальное значение входного напряжения зависит от степени насыщения предыдущего (по схеме) транзистора и может достигать значений, меньше 0,1 в. Поэтому полученные выше значения нагрузочной способности элемента являются минимальными (при граничных условиях). В тех случаях, когда условия работы схемы будут значительно отличаться от граничных, величина реальной нагрузочной способности должна быть пересчитана аналогично рассмотренному примеру.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Доманицкий, И. В. Прангисвили. Методика точного расчета полупроводниковых переключающих схем, применяемых в промышленной автоматике. «Автоматика и телемеханика», г. 24, № 5, 1963.
2. Бесконтактные логические элементы для схем промышленной автоматики, под ред. Шереметьевского. ВНИИЭМ, М., 1965.
3. Е. В. Миллер. Бесконтактные логические элементы на полупроводниках и их применение. Изд-во «Энергия», М.—Л., 1964.