

## *Орлов Алексей Вениаминович*

канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный

авиационный технический университет» в г. Стерлитамаке

г. Стерлитамак, Республика Башкортостан

## НЕСТАНДАРТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ КЛЮЧЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ

*Аннотация: в статье рассматривается работа ключевого усилителя на элементах цифровой логики при коротком замыкании в нагрузке; проводится анализ влияния параметров фильтра низких частот и сопротивления выходного каскада усилителя на величину тока короткого замыкания.*

**Ключевые слова:** ключевой усилитель, ток короткого замыкания, выходной каскад, фильтр нижних частот.

Усилители класса *D*, широко используемые в устройствах с автономным питанием, могут также эксплуатироваться в экстремальных режимах, при которых не исключается возможность короткого замыкания (КЗ) в цепи нагрузки.

В данной статье приводятся результаты исследования работы ключевого усилителя, который построен по мостовой схеме (рис. 1), в случае короткого замыкания в нагрузке. Усилитель реализован на вентилях интегральной микросхемы (ИМС) КМОП-структуры серии К561. Наличие порога у элементов цифровой логики ИМС позволяет использовать их в качестве экономичных усилительных элементов, компараторов, формирователей импульсов и т. д.

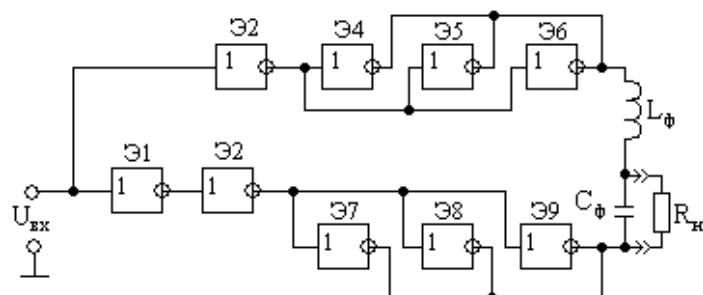


Рис. 1. Схема ключевого усилителя на элементах цифровой логики

Случай КЗ в цепи нагрузки можно рассмотреть на примере эквивалентной схемы каскада усиления мощности, приведенной на рис.2, где приняты следующие обозначения:  $E_{\Pi}$  – напряжение источника питания;  $L_{\Phi}$  и  $C_{\Phi}$  – индуктивность и емкость фильтра низких частот (ФНЧ);  $r = r_L + r_{VT1} + r_{VT2}$  – суммарное сопротивление потерь катушки индуктивности ФНЧ, первого и второго транзисторов соответственно. На рис. 2 показаны эквивалентные сопротивления лишь двух транзисторов одного «плеча» мостовой схемы, открытых в рассматриваемый момент времени.

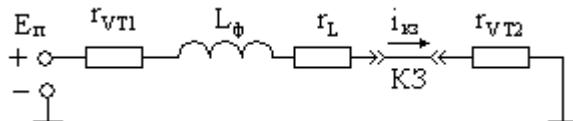


Рис. 2. Выходной каскад ключевого усилителя

Ток в режиме короткого замыкания в нагрузке, протекающий через выходные транзисторы, определяется следующим образом:

$$i_{KZ}(t) = \frac{E_{\Pi}}{r} \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad (1)$$

где  $\tau = L_{\Phi} / r$ .

В схеме вместо источника напряжения может быть подведен выход от импульсного модулятора. Ток КЗ в этом случае будет определяться формулой (если транзисторы находятся в открытом состоянии):  $i_{KZ}(t) = \frac{U_{\Pi}}{r} \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$ , где  $U_{\Pi}$  – уровень импульсных сигналов.

Воспользовавшись выражением (1) можно определить время, в течение которого ток, протекающий через транзисторы, достигает номинального значения ( $I_h$ ):

$$t_h = -\tau \cdot \ln \left(1 - \frac{r \cdot I_h}{E_{\Pi}}\right). \quad (2)$$

С учетом (2) значение тока короткого замыкания можно записать в виде:

$$i_{KZ}(t) = \frac{E_{\Pi}}{r} \left(1 - e^{-\frac{t_h + \tau \ln(1 - r \cdot I_h / E_{\Pi})}{\tau}}\right), \quad (3)$$

где  $t_u$  – длительность импульса частотно-широко-импульсно модулированного (ЧШИМ) сигнала.

Максимальное значение тока КЗ можно определить, если в выражение (3) подставить предельное значение  $t_u$ . Предельное значение  $t_u$  достигает половины периода модулирующего сигнала в области средних частот, т.е.  $t_{u \max} = 1/2F_{\text{сч}}$ . Тогда максимальный ток в режиме короткого замыкания в нагрузке:

$$I_{KZ \ max} = \frac{E_{\Pi}}{r} \left( 1 - e^{-\frac{0,5F_{\text{сч}} + \tau \ln(1 - r \cdot I_{\Pi} / E_{\Pi})}{\tau}} \right).$$

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости тока короткого замыкания от частоты модулирующего сигнала для двух значений индуктивности фильтра. В расчетах были использованы следующие данные:  $E_{\Pi} = 2,8 \text{ В}$ ;  $I_{\Pi} = 2 \text{ мА}$ ;  $r_L = 10 \text{ Ом}$ ;  $r_{VT1} = 30 \text{ Ом}$ ;  $r_{VT2} = 80 \text{ Ом}$ ;  $L_{\phi 1} = 120 \text{ мГн}$ ;  $L_{\phi 2} = 72 \text{ мГн}$ ; число усилительных элементов на одно плечо каскада  $N = 3$ .

Как показали расчеты, максимальный ток на выходе ключевого усилителя в случае короткого замыкания в нагрузке не превышает предельно допустимое значение для К561 серии транзисторных структур, и, следовательно, в импульсных усилителях подобного класса нет необходимости введения специальных схем защиты с токоограничителем.

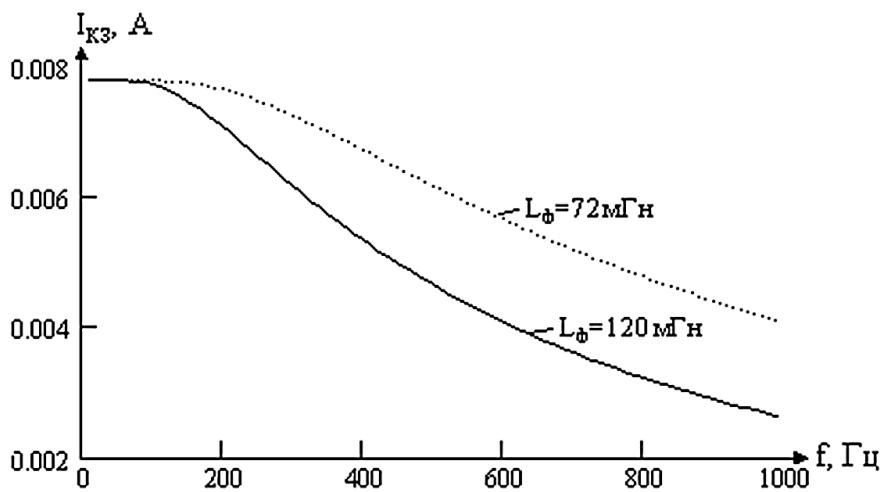


Рис. 3. Зависимость тока КЗ от частоты усиливаемого сигнала

Приведенные графики зависимости тока КЗ от частоты модулирующего (усиливаемого) сигнала отражают особенность работы ЧШИМ (при ШИМ ток

короткого замыкания от частоты сигнала не зависит). Так как у любого реального усилителя коэффициент усиления зависит от частоты (в области низких частот всегда наблюдается завал частотной характеристики), а также с уменьшением частоты уменьшается крутизна модуляционной характеристики, то реальное значение максимального тока на выходе импульсного усилителя в случае короткого замыкания в нагрузке не превышает 5–6 мА на один элемент (на пару транзисторов элемента логики).

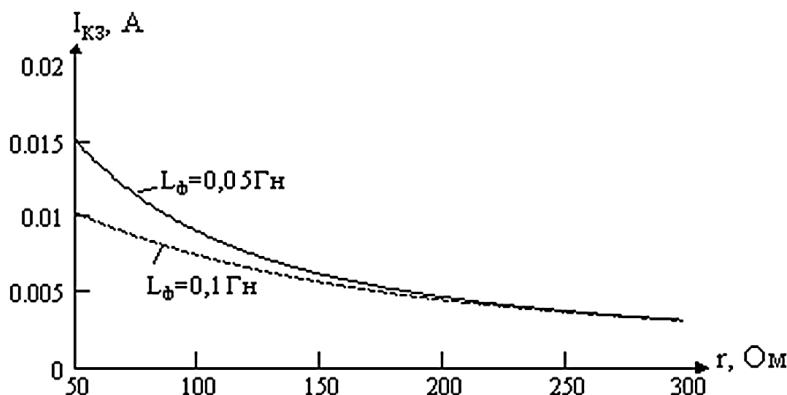


Рис. 4. Зависимость тока короткого замыкания от сопротивления выходного каскада ключевого усилителя

На рис. 4 представлена зависимость тока короткого замыкания от суммарного сопротивления выходного каскада ключевого усилителя. Из анализа графиков, представленных на данном рисунке, можно сделать следующий вывод: значение тока КЗ уменьшается при увеличении сопротивления, а также при увеличении индуктивности фильтра.

Таким образом, из анализа работы импульсного усилителя на КМОП-транзисторах при коротком замыкании в нагрузке следует, что в ключевых усилителях с напряжением питания до трех вольт перегрузки при КЗ отсутствуют, т.к. их запас по мощности на несколько порядков превышает величину коэффициента использования по току. Максимальный ток короткого замыкания наблюдается на частотах усиливаемого сигнала ниже 200 Гц, а при увеличении суммарного сопротивления выходной цепи до 300 Ом, его частотная зависимость исчезает.

***Список литературы***

1. Бирюков С.А. Применение цифровых микросхем серий ТТЛ и КМОП. – 2-е изд., стер. – М.: ДМК, 2000. – 240 с.
2. Шило В.Л. Популярные микросхемы КМОП: Справочник. – М.: Ягуар, 1993. – 64 с.