

Омский научный семинар  
«Современные проблемы радиофизики и радиотехники»

## ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КЛЮЧЕВОГО РЕЖИМА УСИЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Докладчик: Ламкова Наталья Сергеевна – студентка ОмГУПС, техник АО «ОНИИП» (ОМСК)

Авторы: Фадеев Константин Сергеевич – к.т.н., зав. кафедрой ТРСИС ОмГУПС, начальник НИЛ КТС АО «ОНИИП» (ОМСК)

Зайцев Владимир Васильевич – к.т.н., доцент КАФЕДРЫ ТРСИС ОмГУПС, старший научный сотрудник АО «ОНИИП» (ОМСК)

Ламкова Наталья Сергеевна – студентка ОмГУПС, техник АО «ОНИИП» (ОМСК)

# ВВЕДЕНИЕ

В работе мы рассматриваем необходимые условия для реализации ключевого усилителя мощности в диапазоне от 3 до 30 МГц (с коэффициентом перекрытия по частоте  $K_f = 10$ ) при минимальном количестве переключений поддиапазонов. Затем определяем влияние этих параметров на энергетическую эффективность устройства.

# ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение существенных условий и параметров, влияющих на предельно возможную энергетическую эффективность (электронный КПД и КПД по первой гармонике) выходного каскада усилителя мощности радиочастоты.



# АКТУАЛЬНОСТЬ


Актуальность работы обусловлена увеличением количества систем радиодоступа с требуемой энерговооруженностью мобильного терминала 100 Вт и более. При этом мобильный терминал работает от собственного автономного источника электропитания, запас энергии которого прямо влияет на время непрерывной работы терминала.



# КЛАСС DE

Класс DE совмещает свойства 2-х классов D и E. В режиме D форма тока выходных транзисторов принимает вид прямоугольных импульсов, поскольку транзистор либо заперт, либо полностью открыт. Одним из главных преимуществ усилителей класса D достаточно высокий КПД 90-95% при этом он мало зависит от выходной мощности. Но есть и один недостаток – это снижение КПД из-за влияния выходной емкости транзистора и паразитных емкостей печатной платы. В классе E как раз устраняется данное явление.

# ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

- 
1. Полное отсутствие импортозамещения транзисторов;
  2. Ключевой режим получилось осуществить только за одно переключение поддиапазонов;
  3. Практически невозможно найти транзисторы, подходящие для реализации ключевого режима в частотном диапазоне от 3 до 30 МГц.

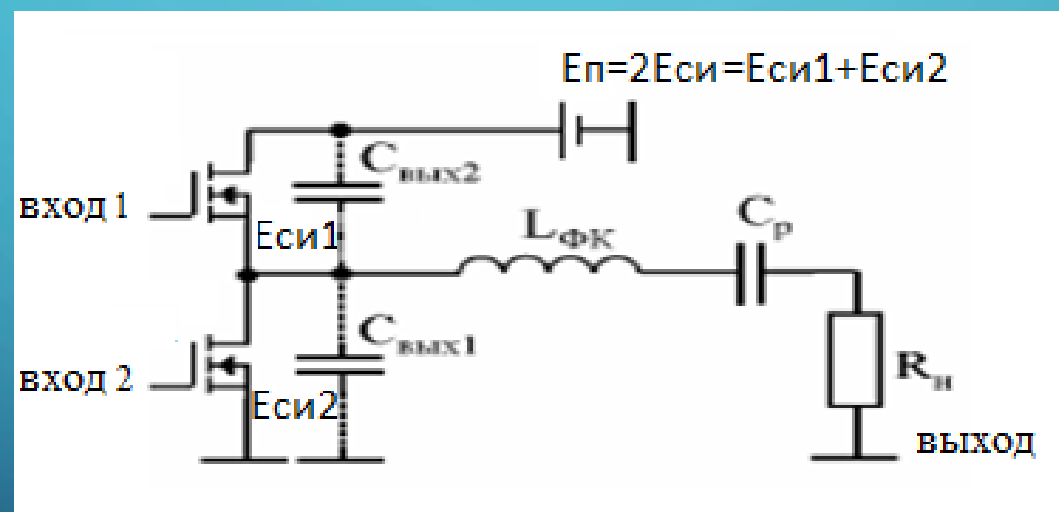
# НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ВЫБОРЕ ТРАНЗИСТОРОВ:



- выходная мощность 50-100 Вт;
- максимально допустимое постоянное напряжение сток-исток не более 150В;
- напряжение затвор-исток не более  $\pm 6$ В;
- максимально допустимый постоянный ток стока не более 5А;
- выходная емкость не больше 30мкФ.

# ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ

Для оценочных расчётов была выбрана двухтактная схема с последовательным питанием, резистивной нагрузкой и Г-образным ФК, представленная на рис. 1.



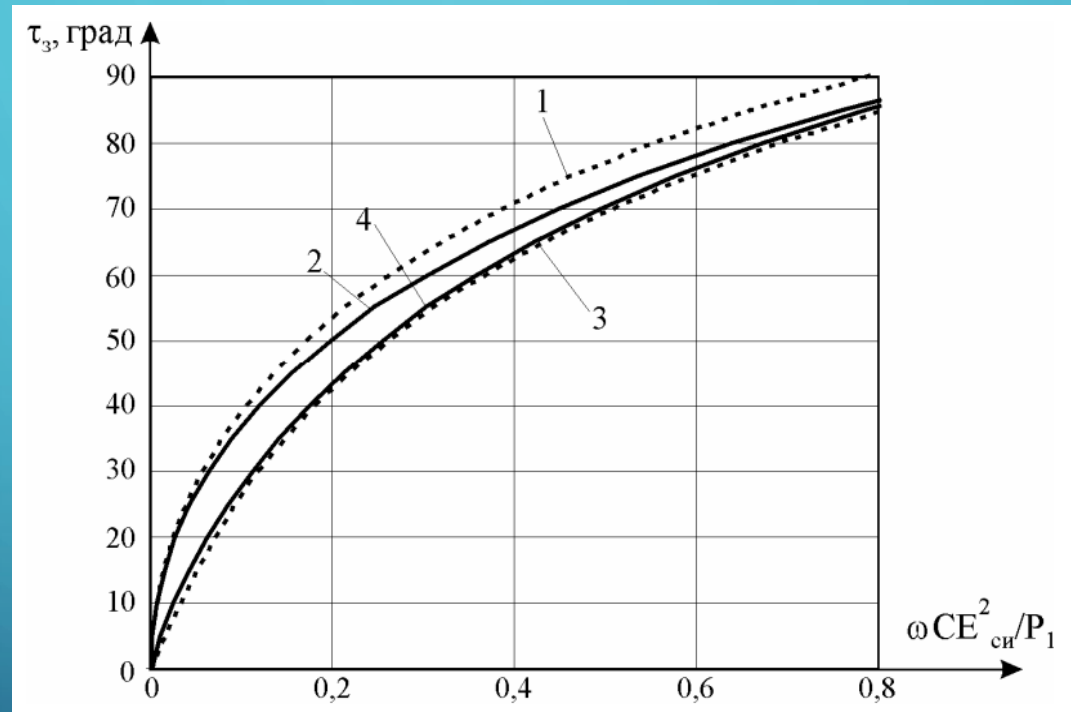
*Рис.1 - Схема УМ класса DE с резистивной нагрузкой*



Достаточно большую роль здесь играет как раз емкость, поскольку от неё и зависит практически весь расчёт. Так за общую емкость транзистора принимаем значение:

$$C = C_{\text{вых эфф}} + \frac{C_M}{2}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{вых эфф}}$  – выходная емкость транзистора,  $C_M$  – монтажная емкость.

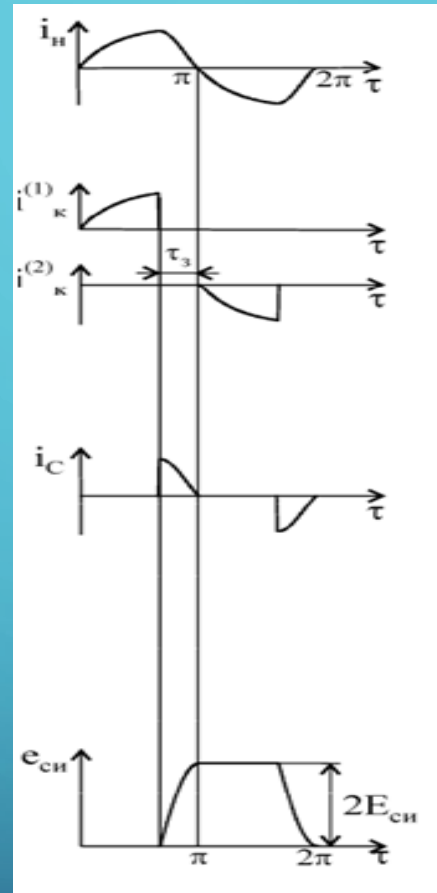


*Рис.2 Зависимости  $\tau_z$  от  $\omega C E^2 c_n / P_1$  в УМ класса FE с Г-образным (1) и с параллельным (2) ФК, класса DE с Г-образным (3) и с параллельным (4) ФК [1]*

Таблица 1

### Параметры режима работы УМ класса DE с Г-образным ФК

$\tau_3, \text{град}$	0	5	15	30	45	60	75	90
$c(\tau_3)$	0	0,0258	0,0772	0,154	0,226	0,280	0,310	0,310
$l(\tau_3)$	0	0,0784	0,235	0,471	0,717	0,997	1,34	1,811
$v_1(\tau_3)$	2/	0,637	0,635	0,632	0,626	0,618	0,607	0,594
$\alpha_0(\tau_3)$	1/2	0,474	0,421	0,343	0,275	0,221	0,178	0,143
$\alpha_{1c\phi}(\tau_3)$	2/	0,633	0,602	0,519	0,429	0,353	0,291	0,239
$k_1(\tau_3)$	8/2	0,850	0,909	0,956	0,976	0,986	0,992	0,995
$\sigma_{отк}(\tau_3)$	1	0,935	0,804	0,614	0,458	0,345	0,265	0,204
$\sigma_{зак}(\tau_3)$	0	0,00623	0,0187	0,0375	0,0571	0,0793	0,107	0,144
$\sigma_L(\tau_3)$	1	0,947	0,842	0,689	0,572	0,504	0,478	0,493



*Рис.3 - Временная зависимость токов и напряжений УМ класса DE с Г-образным ФК [1]*

Ниже представлены формулы 2-7, которые были использованы в математической модели ключевого усилителя мощности режима DE с Г-образным ФК в них используются параметры из таблицы 1.

Индуктивность катушки ФК:

$$L_{\text{ФК}} = \frac{lc}{(2\omega^2 C_{\text{ВЫХЭФФ}})}, \quad (2)$$

где  $l = \frac{\omega L_{\text{ФК}}}{R_{\text{H}}}$  – нормирующая индуктивность ФК,  $c = \omega C_{\Sigma} R_{\text{H}}$  – нормирующая ёмкость ФК,

Сопротивление ФК:

$$r_L = \frac{\omega L_{\text{ФК}}}{Q_L}, \quad (3)$$

где  $Q_L$  – добротность катушки ФК,  $L_{\text{ФК}}$  – индуктивность катушки ФК,  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота,  $f$  – рабочая частота.

Коэффициент Берга:

$$\alpha_0 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\pi - \tau_3}{1 - e^{\frac{\tau_3 - \pi}{l}}} - l \right), \quad (4)$$

где  $\tau_3$  – длительность интервала неокрытия,  $l = \frac{\omega L_{\text{ФК}}}{R_{\text{H}}}$  – нормирующая индуктивность ФК,  $L_{\text{ФК}}$  – индуктивность катушки ФК.

Коэффициент первой гармоники:

$$k_1 = \frac{\alpha_{1сф} \cdot v_1}{\alpha_0}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{1сф}$  – коэффициент тока стока первой гармоники синфазной,  $v_1$  – коэффициент пропорциональности между максимальным и средним значением напряжения сток-исток,  $\alpha_0$  – коэффициент Берга.

Электронный КПД выходной цепи:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{P_1}{k_1 \cdot \alpha_0^2 \cdot E_{\text{си}}^2} [\sigma_{\text{отк}} \cdot r_{\text{отк}} + \sigma_{\text{зак}} \cdot r_{\text{зак}} + \sigma_L \cdot r_L]} \quad (6)$$

где  $r_{\text{отк}}$ ,  $r_{\text{зак}}$  – сопротивление транзистора в открытом и закрытом состоянии,  $E_{\text{си}}$  – среднее значение напряжение сток-исток,  $\sigma_{\text{отк}}$ ,  $\sigma_{\text{зак}}$  – коэффициент пропорциональности в зависимости от длины фронта транзистора в открытом и закрытом состоянии,  $k_1$  – коэффициент первой гармоники,  $\alpha_0$  – коэффициент Берга,  $P_1$  – мощность первой гармоники,  $\sigma_L$  – коэффициент пропорциональности в зависимости от длины фронта ФК.

КПД по первой гармонике:

$$\eta_1 = \eta_{\text{э}} \cdot k_1, \quad (7)$$

где  $k_1$  – коэффициент первой гармоники,  $\eta_{\text{э}}$  – электронный КПД выходной цепи.

# ВЫВОД

Основными условиями, обеспечивающими высокую энергетическую эффективность каскада ( $\text{КПД} \geq 80\%$ ) являются режим работы и физические параметры транзистора:

- входная и выходная ёмкости;
- собственное сопротивление открытого транзистора в ключевом режиме;
- длительность фронтов переключения относительно периода колебания, которые зависят от внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки.

Номенклатура транзисторов, отвечающих необходимым условиям крайне ограничена. При увеличении физических размеров транзисторов в соответствии с ростом требуемой единичной мощности при неизменной технологии будут увеличиваться соответствующие входная и выходная ёмкости. При этом схемотехника, обеспечивающая необходимую эффективность будет усложняться.

# ЛИТЕРАТУРА

[1] Алипов А.С. Исследование работы ключевых генераторов класса DE // Труды МТУСИ: сборник статей. – М.: МТУСИ, 2005. – С. 33–43.

[2] De Vries I.D. High power and high frequency class-DE inverters. Ph. D. thesis. – University of Cape Town, 1999. – 110

[3] Алипов А.С. Исследование работы ключевых генераторов класса DE в диапазоне частот // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ, 2005. Тезисы докладов. – М.: МТУСИ, 2005.

[4] Switchmode RF Power Amplifiers. Andrei Grebennikov, Nathan O. Sokal. Newnes is an imprint of Elsevier 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK. Copyright 2007 by Elsevier Inc.