

## ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТОКА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КЛАССА D С КОММУТАЦИЕЙ ТОКА

А.В. Шуваев

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматриваются основные характеристики усилителя мощности класса D с коммутацией тока (CSCD). Приводится доказательство того, что теоретическая максимальная эффективность слива, которая может быть достигнута при переключении тока усилителя мощности класса D, составляет 100%, при некоторых идеализированных предположениях, а именно: мгновенное переключение транзисторов, нулевое напряжение колена и идеальный шунтирующий резонатор с бесконечной добротностью и нулевыми потерями. В работе при анализе реального усилителя мощности показано, что эффективность слива уменьшается с увеличением значения  $V_{ds,sat}/V_{max}$ . Из-за влияния напряжения на колене усилитель мощности CSCD имеет лучшую производительность, чем усилитель мощности с коммутацией напряжения. Делается вывод о том, что главное преимущество усилителя мощности CSCD заключаются в том, что выходная емкость транзистора может быть шунтирована выходным резонатором, что приводит к переключению при нулевом напряжении. Однако по мере повышения частоты переключения при нулевом напряжении все труднее достичь с увеличением паразитной индуктивности, вносимой проводами. А также делается вывод о том, что выходной шунтирующий резонатор обеспечивает разомкнутую цепь на основной частоте и короткое замыкание на всех гармониках. Дроссельный индуктор обеспечивает разомкнутую цепь для всех гармоник четного порядка

**Ключевые слова:** теория усилителей, усилители на твердотельных (полупроводниковых) элементах, усилитель мощности класса D, эффективность стока

### Введение

Усилители мощности класса D делятся на две топологии: усилитель мощности класса D с переключением напряжения (VSCD) и усилитель мощности класса D с коммутацией тока (CSCD). В этой статье будет рассмотрена только топология CSCD. На рис. 1 показана общепринятая схема усилителя мощности CSCD, где оба транзистора рассматриваются как идеальные переключатели с мгновенным включением и выключением.

Трансформатор также считается идеальным в том смысле, что он имеет коэффициент связи 1 ( $n=2m$ ) с идеальным балансом величины/фазы и бесконечной полосой пропускания. Выходной шунтирующий резонатор ( $L_0, C_0$ ) резонирует на основной частоте с высокой добротностью и обеспечивает короткое замыкание на всех частотах гармоник, так что только основная составляющая выходного тока трансформатора ( $I_T$ ) может поступать на со-противление нагрузки  $R_L$ . В течение первого полупериода ( $0\sim\pi$ ), когда верхний транзистор ( $T_1$ ) включен, а нижний транзистор ( $T_2$ ) выключен, постоянный ток ( $I_{DC}$ ), подаваемый от источника питания через дроссель-индуктор, переключается на  $T_1$ . В течение следующего

полупериода ( $\pi\sim2\pi$ ),  $T_2$  включается и  $T_1$  выключается, затем постоянный ток переключается на  $T_2$ . Результирующие токи стока  $I_{DSP}$  и  $I_{DSM}$  выражены следующим образом:

$$I_{DSP} = \begin{cases} 0, & 0\sim\pi \\ I_{DC}, & \pi\sim2\pi \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{DSM} = \begin{cases} 0, & 0\sim\pi \\ I_{DC}, & \pi\sim2\pi \end{cases} \quad (2)$$

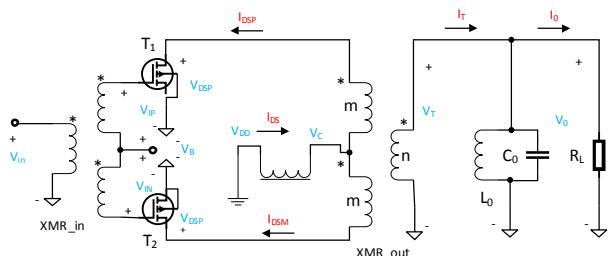


Рис. 1. Схема усилителя мощности класса D с коммутацией тока (CSCD)

Напряжения стока ( $V_{DSP}$  и  $V_{DSM}$ ) являются полуволновыми выпрямленными версиями выходного напряжения с нулевым напряжением колена ( $V_{sat}$ ). В течение первого полупериода ( $0\sim\pi$ ), когда верхний транзистор ( $T_1$ ) включен, а нижний транзистор ( $T_2$ ) выключен, напряжение стока верхнего транзистора  $V_{DSP}$  остается нулевым, если сопротивление включения транзисторов предполагается равным

нулю. С другой стороны, напряжение стока нижнего транзистора  $V_{DSM}$  имеет полусинусоидальную форму волны.

Во время другого полупериода ( $\pi \sim 2\pi$ ), когда  $T_2$  включен, а  $T_1$  выключен, формы напряжения  $V_{DSP}$  и  $V_{DSM}$  меняются местами. После построения полного цикла сигнала на сбалансированных узлах трансформатора образуется синусоидальный сигнал. Напряжение стока можно представить в виде:

$$V_{DSM} = V_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) + \sum_{n=1}^N V_{2n} \cos(2n \cdot \omega_0 t + \theta_{2n}), \quad (3)$$

$$V_{DSM} = V_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1 + \pi) + \sum_{n=1}^N V_{2n} \cos(2n \cdot \omega_0 t + \theta_{2n} + 2n \cdot \pi). \quad (4)$$

Здесь величина основной части  $V_1$  равна половине величины  $V_{DSP}$  или  $V_{DSM}$ , поскольку они являются полуволновыми выпрямленными синусоидальными волнами:

$$V_1 = \frac{V_{max}}{2}. \quad (5)$$

Эффективность слива, рассмотренного выше, усилителя мощности CSCD теперь можно рассчитать. Эффективность стока - это отношение общей выходной мощности к общей мощности постоянного тока ВЧ:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}}, \quad (6)$$

где выходная мощность ( $P_{out}$ ) - это мощность, подаваемая на  $R_L$ , а мощность постоянного тока ( $P_{DC}$ ) - мощность, обеспечиваемая источником питания. Выходная мощность рассчитывается как:

$$P_{out} = \frac{V_{max} \cdot I_1}{2}. \quad (7)$$

Общая мощность постоянного тока может быть рассчитана как:

$$P_{DC} = V_{DD} \cdot I_{DC}, \quad (8)$$

где  $I_{DC}$  - известная величина и  $V_{DD}$  равно среднему значению напряжения центрального отвода трансформатора ( $V_C$ ):

$$V_{DD} = \frac{1}{T} \int_0^T V_C(t) dt = \frac{1}{2T} \int_0^T (V_{DSP} + V_{DSM}) dt = \frac{1}{\pi} \cdot V_{max}, \quad (9)$$

где  $T$  - период основной частоты. В (9) показано, что среднее значение полуволновой выпрямленной синусоидальной волны составляет  $1/\pi$  от ее пикового значения ( $V_{max}$ ). Наконец, можно получить эффективность слива:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} = \frac{\frac{V_{max} \cdot I_1}{2}}{V_{DC} \cdot I_{DC}} = \frac{\frac{1}{2} V_{max} \cdot \frac{4}{\pi} I_{DC}}{\frac{1}{\pi} V_{max} \cdot I_{DC}} = 100\%. \quad (10)$$

Теоретическая максимальная эффективность слива, которая может быть достигнута при переключении тока УМ класса D, составляет 100%, как указано в (10). Однако это требует некоторых идеализированных предположений, включая мгновенное переключение транзисторов, нулевое напряжение колена ( $V_{ds,sat}$ ) и идеальный шунтирующий резонатор ( $L_0$ ,  $C_0$ ) с бесконечной добротностью и нулевыми потерями.

### Анализ характеристик усилителя мощности CSCD

Анализ усилителя мощности CSCD предполагает нулевое напряжение колена ( $V_{ds,sat}$ ), что, однако, невозможно реализовать в реальности. На самом деле, конечное напряжение колена в реальном усилителе мощности оказывает большое влияние на эффективность стока и всегда должно учитываться. Конечное напряжение колена в анализе усилителя мощности CSCD обычно включается как константа, как показано на рис. 2. Включение реально напряжения колена приводит к изменению выражения выходной мощности, мощности постоянного тока и эффективности стока:

$$P_{out} = \frac{(V_{max} - V_{ds,sat}) \cdot I_1}{2}, \quad (11)$$

$$V_{DD} = \frac{1}{\pi} \cdot (V_{max} - V_{ds,sat}) + V_{ds,sat}, \quad (12)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} = \frac{\frac{1}{2} (V_{max} - V_{ds,sat}) \cdot \frac{4}{\pi} I_{DC}}{\left(\frac{1}{\pi} (V_{max} - V_{ds,sat}) + V_{ds,sat}\right) \cdot I_{DC}} =$$

$$= \frac{\frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{V_{sat}}{V_{ds,sat}}\right)}{\frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{V_{ds,sat}}{V_{max}}\right) + \frac{V_{ds,sat}}{V_{max}}} \cdot 100\%. \quad (13)$$

### Анализ полученных результатов и выводы

Из выражения 13 видно, что эффективность слива уменьшается с увеличением значения  $V_{ds,sat}/V_{max}$ . Влияние напряжения колена в усилителе мощности VSCD обсуждается в работах [1, 2]. Из-за влияния напряжения на

колене усилитель мощности CSCD имеет лучшую производительность, чем усилитель мощности VSCD [2]. Преимущества CSCD в основном заключаются в том, что выходная емкость транзистора может быть шунтирована выходным резонатором, что приводит к переключению при нулевом напряжении [3]. Однако по мере повышения частоты переключение при нулевом напряжении все труднее достичь

с увеличением паразитной индуктивности, вносимой проводами.

Второе предположение в выводе об идеализированном усилителе мощности CSCD заключается в том, что выходной шунтирующий резонатор обеспечивает разомкнутую цепь на основной частоте и короткое замыкание на всех гармониках. Дросельный индуктор обеспечивает разомкнутую цепь для всех гармоник четного порядка.

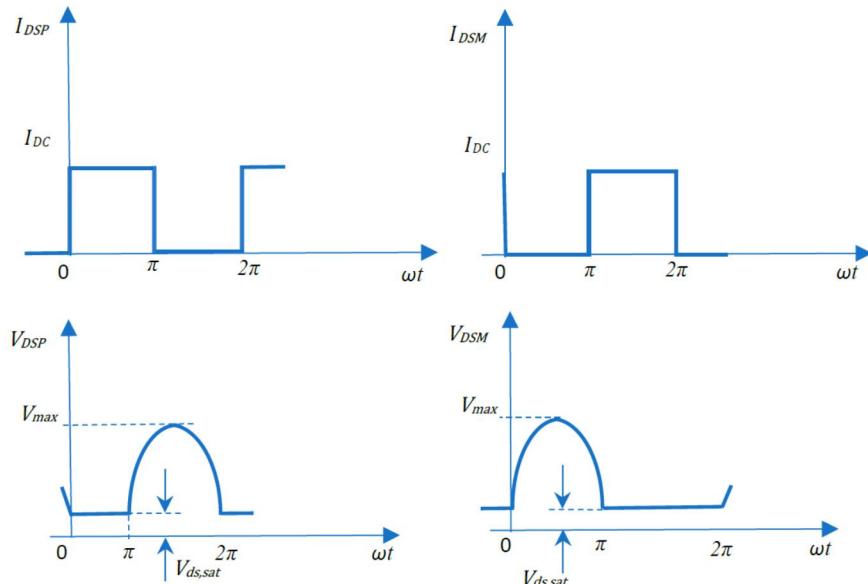


Рис. 2. Реальное напряжение колена в усилителе мощности CSCD

Однако такое требование к импедансу нагрузки непрактично и целесообразно только до гармоники 5-го порядка. В большинстве конструкций завершения до 3-го порядка достаточно, чтобы обеспечить требуемую эффективность в пределах нескольких дБ сжатия усиления [5]. Такая особенность усилителя мощности CSCD делает его обратным усилителем мощности класса F. Таким образом, эффективность стока в зависимости от подавления гармоник такая же, как и у обратного усилителя мощности класса F, как показано в таблице [4].

Последнее идеализированное предположение в выводе о работе усилителя мощности CSCD - это модель коммутатора для транзисторов. Предполагается, что транзистор включается мгновенно, так как обеспечивает нулевое сопротивление, когда входное напряжение затвора превышает пороговое напряжение, и выключается мгновенно, когда напряжение затвора становится ниже порогового напряжения. Такое предположение может быть допу-

стимо в однополосном усилителе мощности класса D, когда транзистор находится под достаточной перегрузкой (обычно она должна быть выше 3 дБ) [2]. Однако в параллельной схеме такое предположение становится неточным и нуждается в изменении.

Эффективность стока усилителя мощности CSCD в зависимости от подавления гармоник (n-гармоники тока стока, m-гармоники напряжения стока)

Гармоники	n=1	n=3	n=5	n=∞
m=1	0,5	0,563	0,586	0,637
m=2	0,667	0,75	0,781	0,849
m=4	0,711	0,8	0,833	0,905
m=∞	0,785	0,884	0,92	1,000

## Литература

1. Cripps S. *RF power amplifiers for wireless communications*. Artech House, 2006.
2. Grebennikov A., Sokal N.O., and Franco M.J. *Switchmode RF and microwave power amplifiers*. Academic Press, 2012.

3. Beltran R.A. Class-F and inverse class-F power amplifier loading networks design based upon transmission zeros. Pp. 1-4.
4. Young Yun W., Youngoo Y., and Bumman K. Analysis and experiments for high efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54. No. 5, Pp. 1969-1974.
5. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Е. Журилова, О.Ю. Макаров // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 109-112.

Поступила 07.05.2021; принята к публикации 21.06.2021

#### Информация об авторах

**Шуваев Андрей Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kipr@vorstu.ru

### QUESTIONS OF IMPROVING THE DRAIN EFFICIENCY OF A CLASS D POWER AMPLIFIER WITH CURRENT SWITCHING

**A.V. Shuvaev**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** this article discusses the main characteristics of a Class D current-switched power amplifier (CSCD). I give a proof that the theoretical maximum drain efficiency that can be achieved by switching the current of a class D power amplifier is 100%, under some idealized assumptions, namely: instantaneous switching of transistors, zero knee voltage, and an ideal shunt resonator with infinite Q-factor and zero loss. In this paper, when analyzing a real power amplifier, I demonstrate that the drain efficiency decreases as the value increases  $V_{ds}/V_{max}$ . As a result of changes in the knee voltage, the CSCD power amplifier has better performance than the voltage-switched power amplifier. I conclude that the main advantage of the CSCD power amplifier is that the output capacitance of the semiconductor transistor can be grounded by the output resonator, which leads to switching at zero voltage. However, as the frequency increases, zero-voltage switching becomes more difficult to achieve with an increase in the parasitic inductance introduced by the wires. And I also conclude that the output resonator that grounds the signal provides an open circuit and a short circuit on all adjacent harmonics. The choke inductor provides an open circuit for all harmonics

**Key words:** amplifier theory, drain efficiency, solid-state (semiconductor) element amplifiers, class D power amplifier

#### References

1. Cripps S. “RF power amplifiers for wireless communications”, Artech House, 2006.
2. Grebenikov A., Sokal N.O., Franco M.J. “Switchmode RF and microwave power amplifiers”, Academic Press, 2012.
3. Beltran R.A. “Class-F and inverse class-F power amplifier loading networks design based upon transmission zeros”, pp. 1-4.
4. Young Yun W., Youngoo Y., Bumman K. “Analysis and experiments for high efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 5, pp. 1969-1974.
5. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. “Frequency-time analysis of nonstationary signals by methods of the wavelet transform and window Fourier transform”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 109-112.

Submitted 07.05.2021; revised 21.06.2021

#### Information about the author

**Andrey V. Shuvaev**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru