

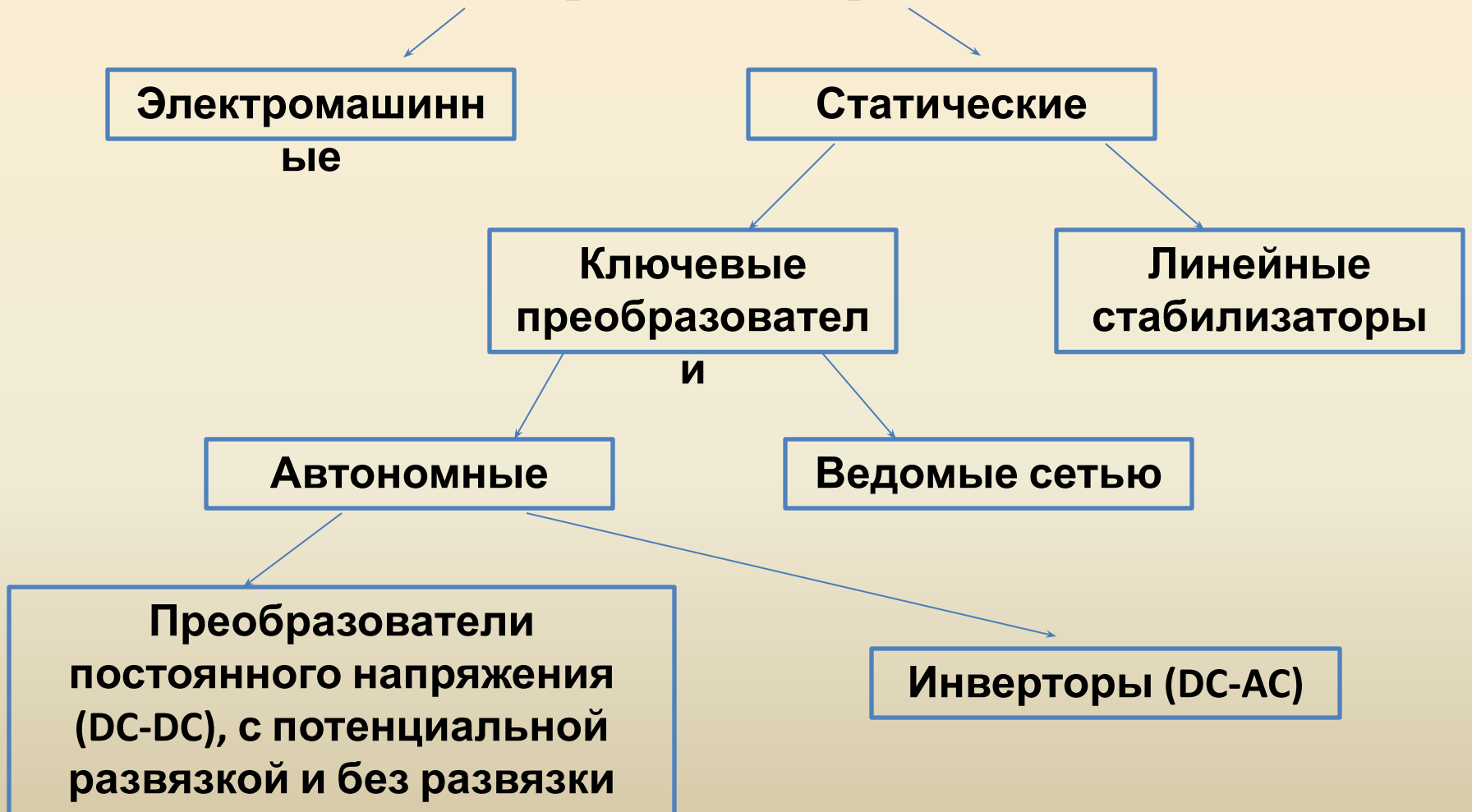
# Автономные преобразователи

**Целью дисциплины** является изучение схемотехники и методов расчёта автономных силовых преобразовательных устройств для последующего их использования в проектировании.

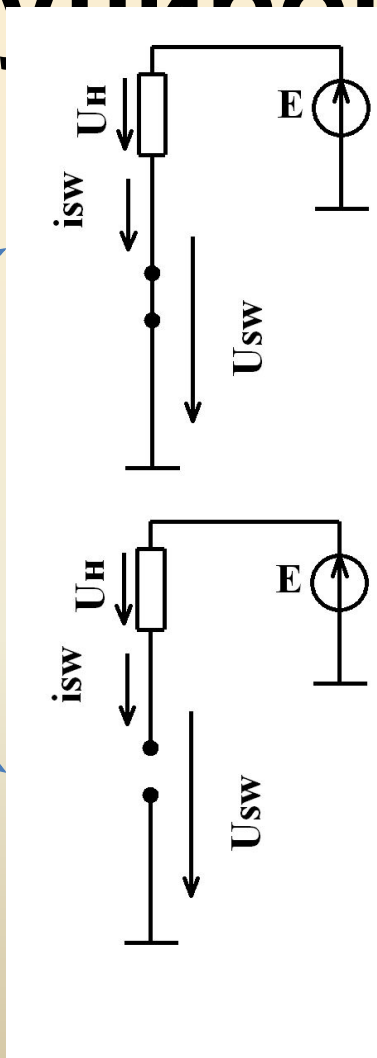
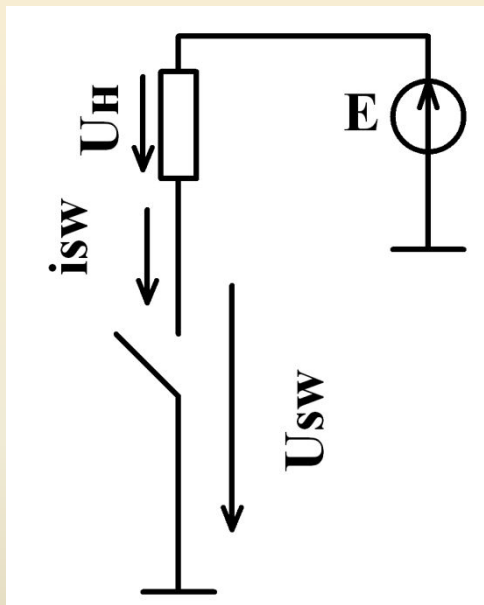
## **Задачи дисциплины:**

- изучить схемные решениями современных автономных преобразовательных устройств;
- изучить современную элементную базу автономных преобразователей и перспектив её развития;
- приобрести навыки принятия конкретных обоснованных технических решений при конструировании силовых электронных устройств..

# Преобразователи электроэнергии



# Принцип импульсного (ключевого) регулирования



$$U_H = E$$

$$U_{sw} \approx 0$$

Мощность, выделяющаяся в  
ключе:  $p_{sw} = U_{sw} \cdot I_{sw} \approx 0$

$$U_H = 0$$

$$I_{sw} \approx 0$$

Мощность, выделяющаяся в  
ключе:  $p_{sw} = U_{sw} \cdot I_{sw} \approx 0$

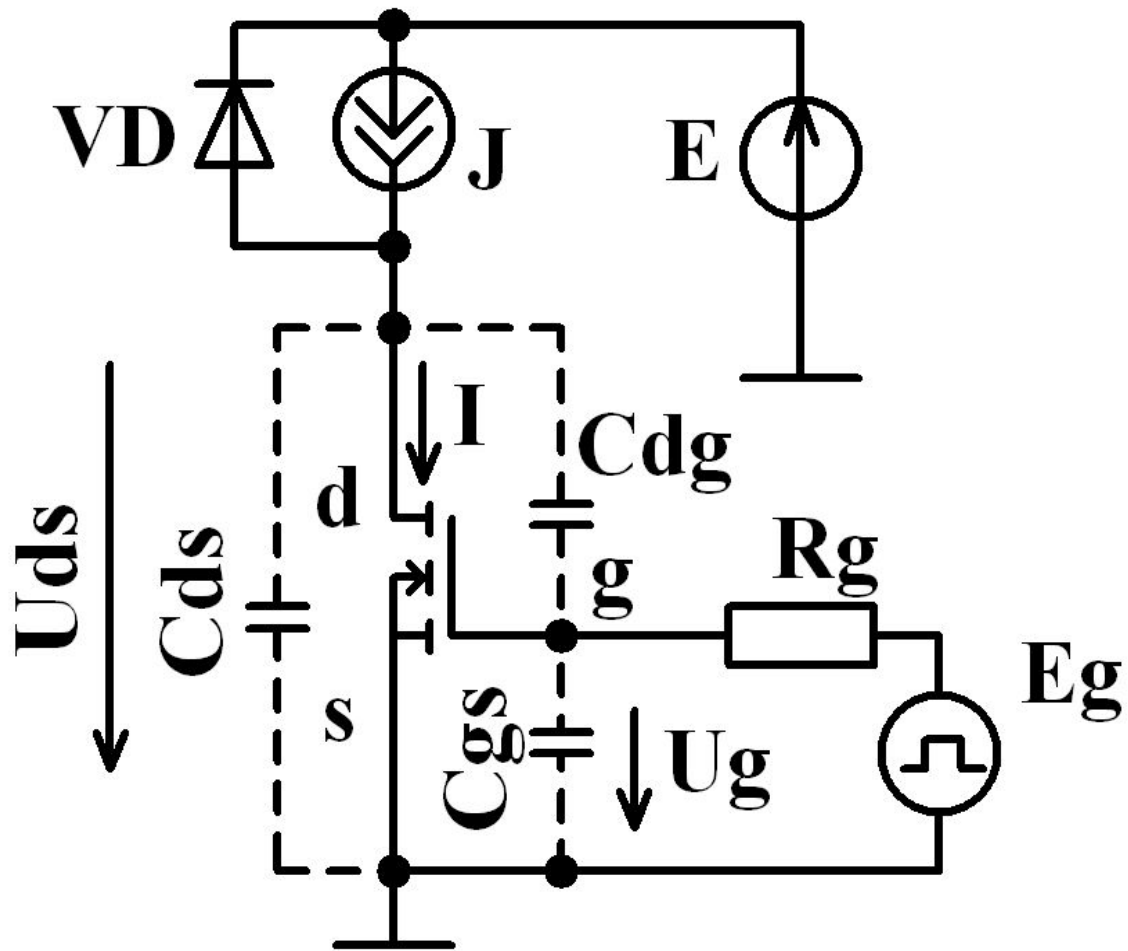
# Литература:

1. Справочник по силовой электронике / Ю. К. Розанов, П. А. Воронин, С. Е. Рывкин, Е. Е. Чаплыгин; ред. Ю. К. Розанов. – М. : Изд. дом МЭИ, 2014 .
2. Силовая электроника : учебник для вузов по направлению "Электроника, электромеханика и электротехнологии" / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк . – М. : Изд. дом МЭИ, 2007.
3. Воронин, П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2е, перераб. и доп. / П.А. Воронин. — М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005.
4. Чаплыгин, Е.Е. Инверторы напряжения и их спектральные модели. Учебное пособие / Е.Е. Чаплыгин. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 64с.
5. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника – Техносфера, 2005.
6. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи – М.: Энергоатомиздат, 1986.

# Тема I

## Транзисторный ключ

# Принципиальная схема устройства



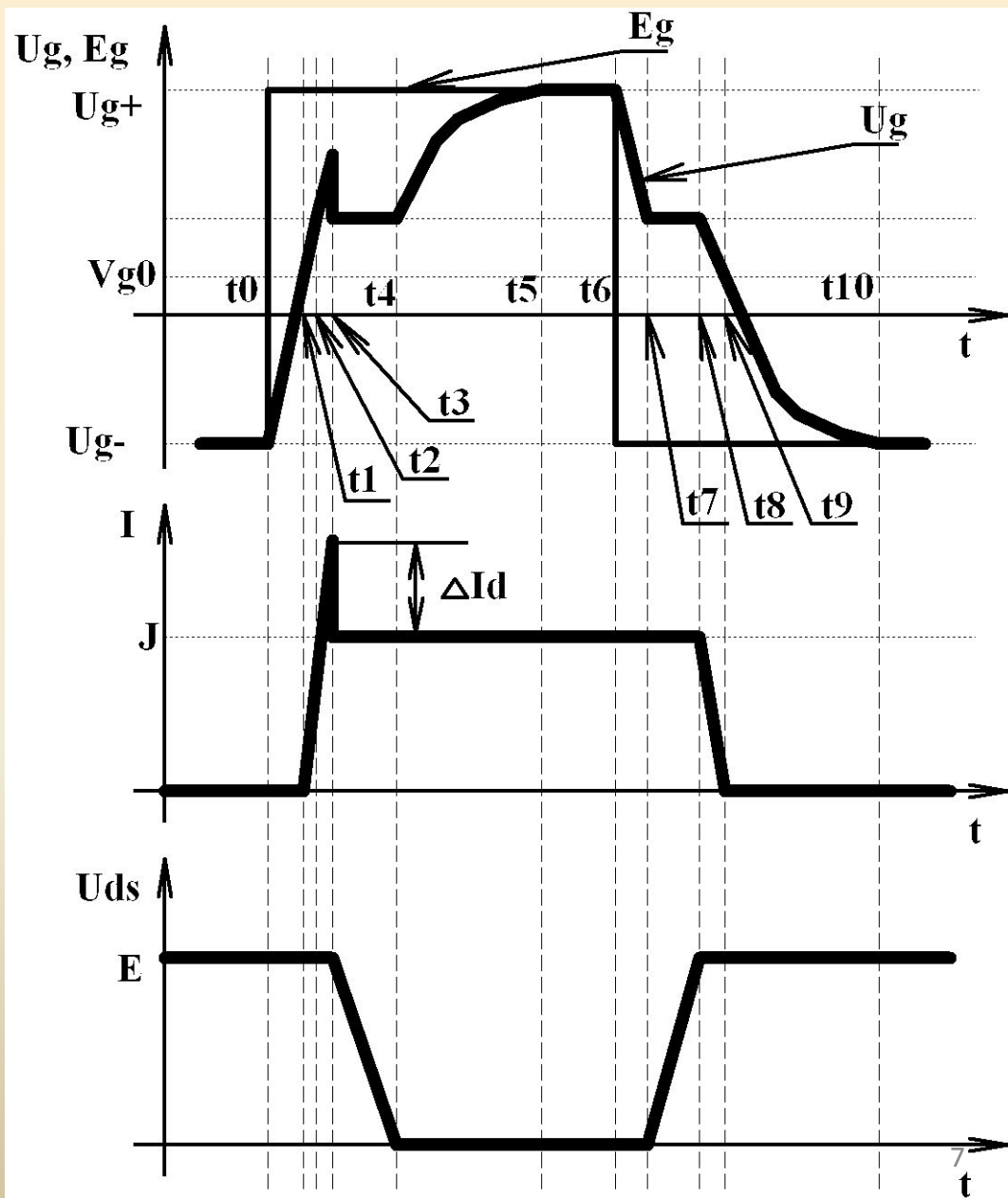
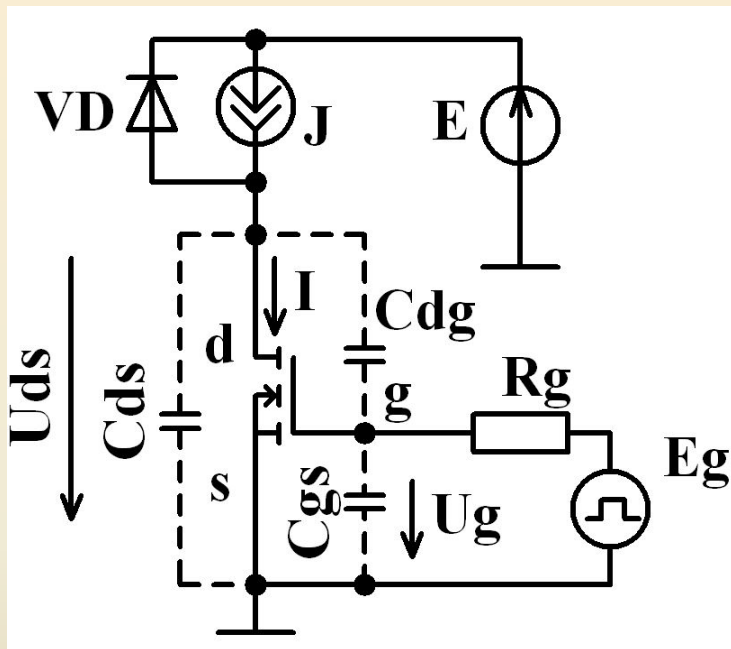
**d – сток (drain)**

**s – ИСТОК  
(source)**

**g – затвор  
(gate)**

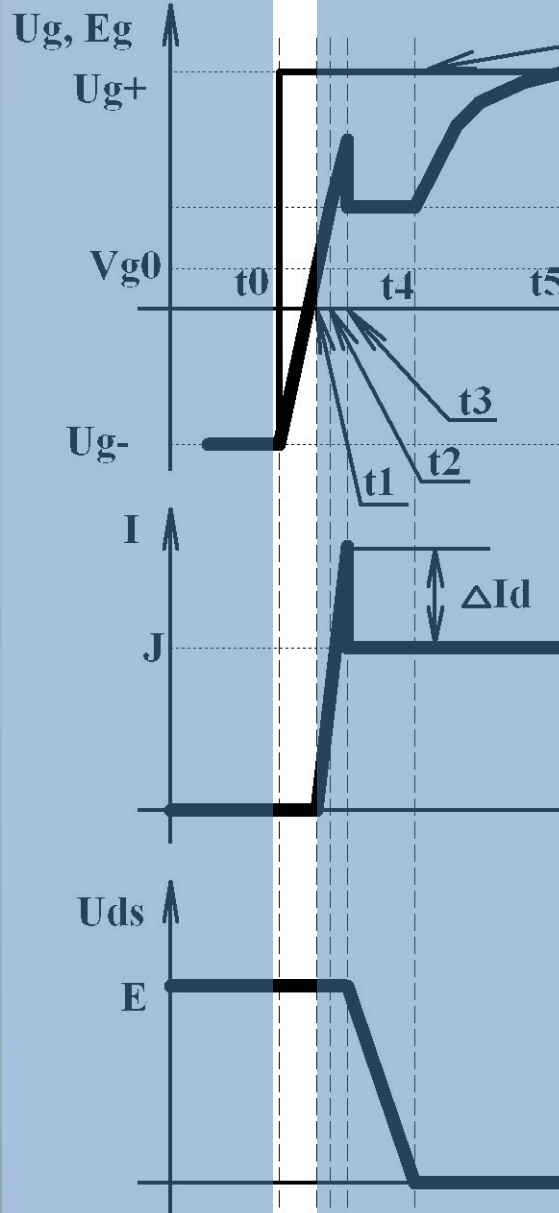
**Eg – ИСТОЧНИК  
ИМПУЛЬСНОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ**

# Этапы переключения



# Наращение напряжения

## затвора: $t_0-t_1$



$U_g$  – напряжение

затвора:

$$U_g(t) = U_{g-} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + U_{g+} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}\right) = (U_{g-} - U_{g+}) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + U_{g+}$$

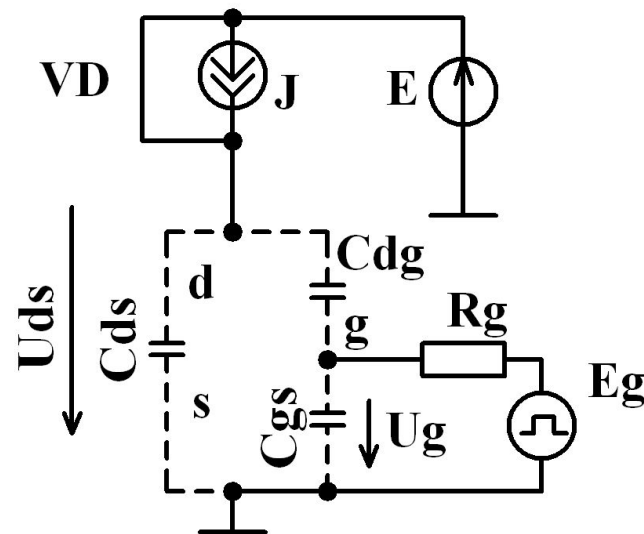
$\tau = R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})$  – постоянная времени

Приближенная замена вида  $e^x \approx 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!}$

+... :

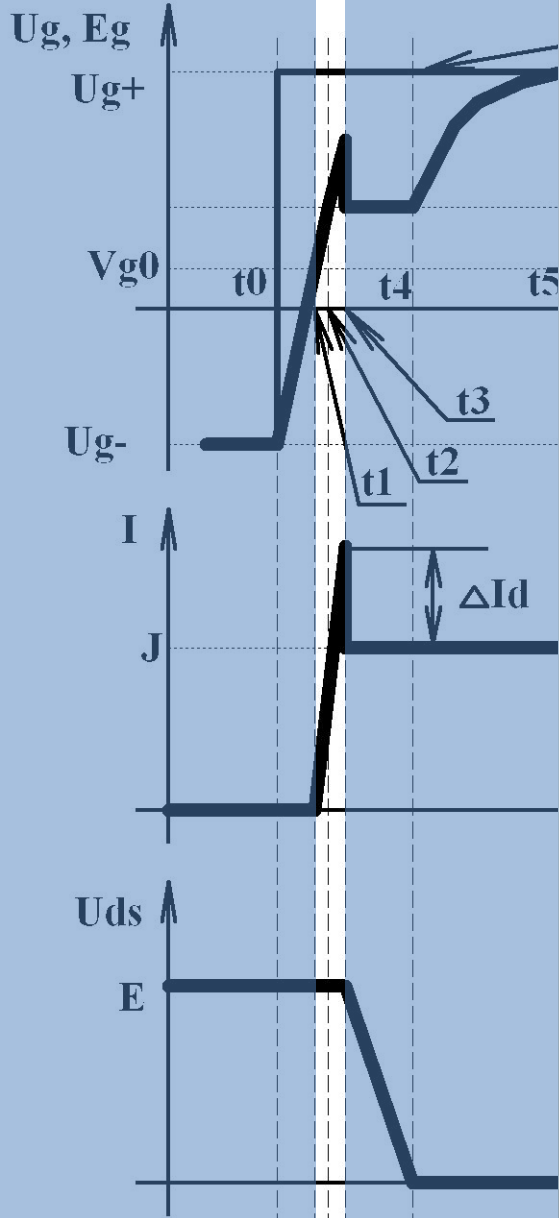
$$U_g(t) = (U_{g-} - U_{g+}) \cdot \left(1 - \frac{t-t_0}{\tau}\right) + U_{g+}$$

$$t_{3+} = t_1 - t_0 = \tau \cdot \left[1 - \frac{V_{g0} - U_{g+}}{U_{g-} - U_{g+}}\right] := R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg}) \cdot \left[\frac{V_{g0} - U_{g-}}{U_{g+} - U_{g-}}\right]$$





# Наращание тока стока: t1-t3



I – ТОК

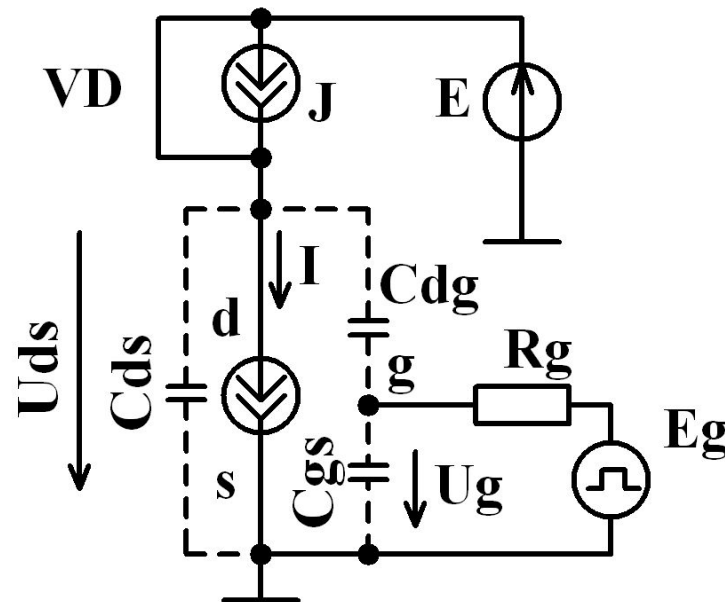
стока:  $I(t) = S \cdot (U_g(t) - V_{g0})$

$$U_g(t) = (V_{g0} - U_{g+}) \cdot \left(1 - \frac{t - t_1}{\tau}\right) + U_{g+}$$

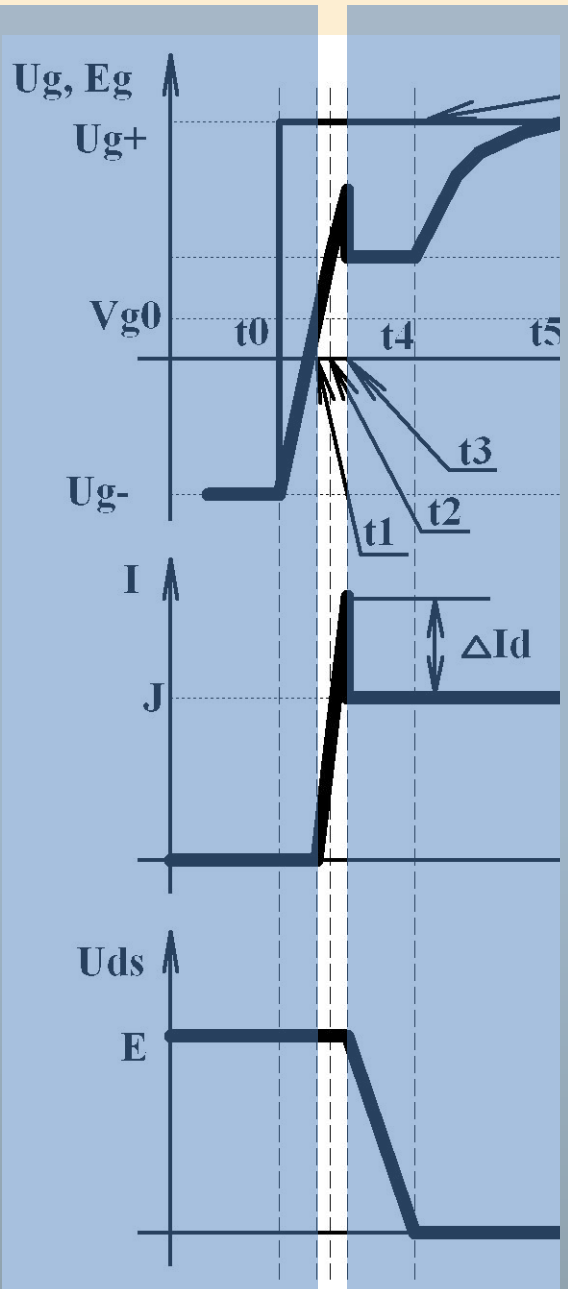
$$I(t) = S \cdot \left( (V_{g0} - U_{g+}) \cdot \left(1 - \frac{t - t_1}{\tau}\right) + U_{g+} - V_{g0} \right) =$$

$$= S \cdot (U_{g+} - V_{g0}) \cdot \frac{t - t_1}{\tau} = S \cdot (U_{g+} - V_{g0}) \cdot \frac{t - t_1}{R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})}$$

$$t_{i+} = t_3 - t_1 = R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg}) \cdot \frac{J + \Delta I_d}{S \cdot (U_{g+} - V_{g0})}$$



# Потери энергии на интервале



$t1-t3$

$p(t) = I(t) \cdot U_{ds}(t)$  – мгновенная мощность.

Интегрируя ее на этом интервале, можно получить выделившуюся энергию:

$$W_{i+} = \int_{t1}^{t3} I(t) \cdot U_{ds}(t) dt = \frac{S \cdot (U_{g+} - V_{g0}) \cdot E}{2 \cdot R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})} \cdot (t3 - t1)^2$$

$$I(t) = S \cdot (U_{g+} - V_{g0}) \cdot \frac{t - t1}{R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})}$$

$$U_{ds}(t) = E$$

$$S \cdot (U_{g+} - V_{g0}) \cdot \frac{t3 - t1}{R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})} = J + \Delta Id$$

$$t_{i+} = t3 - t1$$

$$W_{i+} = \frac{(J + \Delta Id) \cdot E}{2} \cdot t_{i+}$$

# Спад напряжения сток-исток:

## t3-t4

действует эффект

$Ug = \frac{J}{S} + Vg0$  | **напряжение затвора практически не меняется**

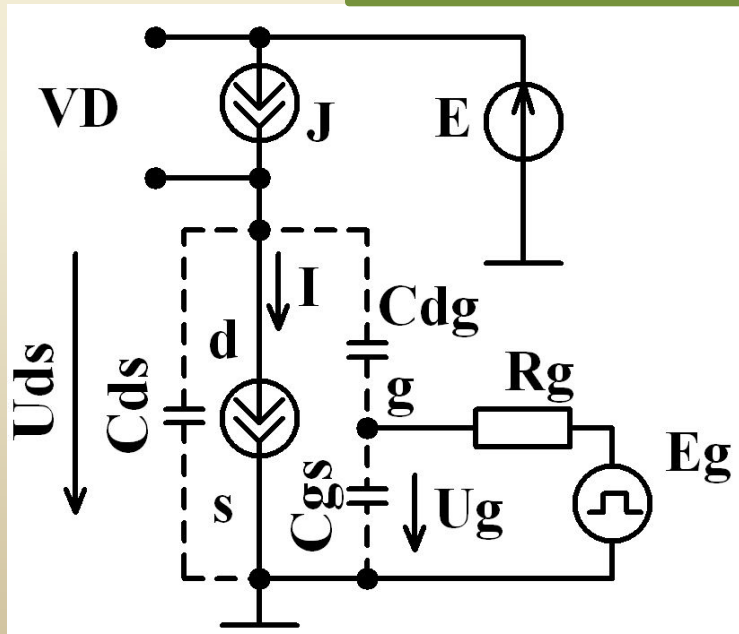
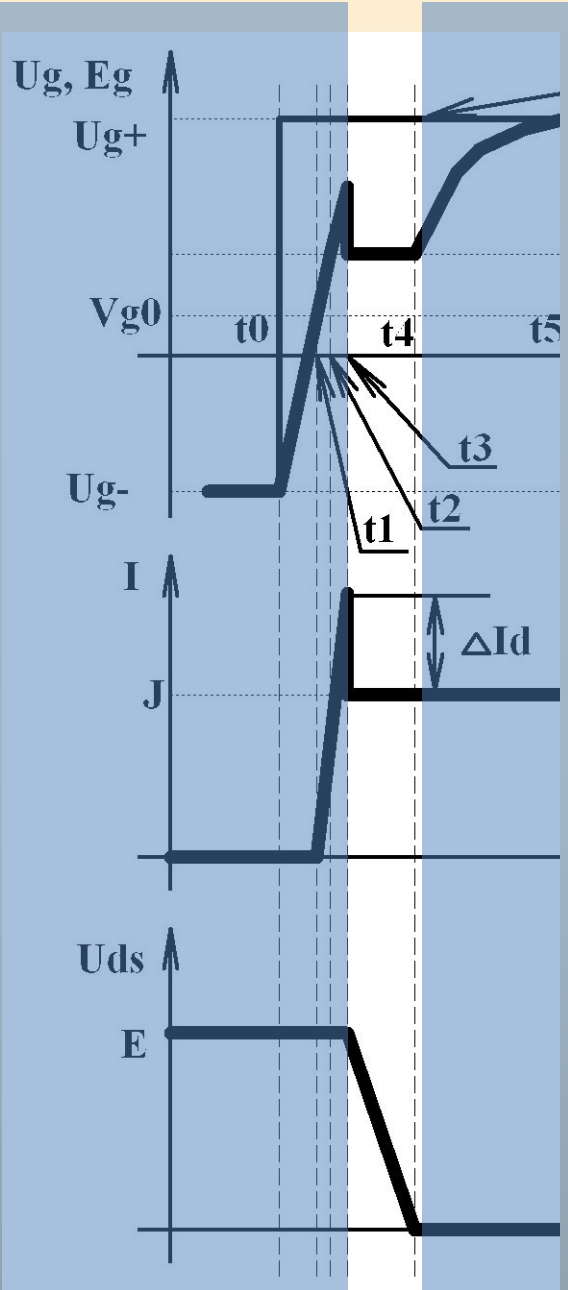
**Udg – напряжение сток-**

**затвор:**

$$Udg(t) = E - \frac{J}{S} - Vg0 - \frac{Ug_+ - \frac{J}{S} - Vg0}{Rg \cdot Cdg} \cdot (t - t3)$$

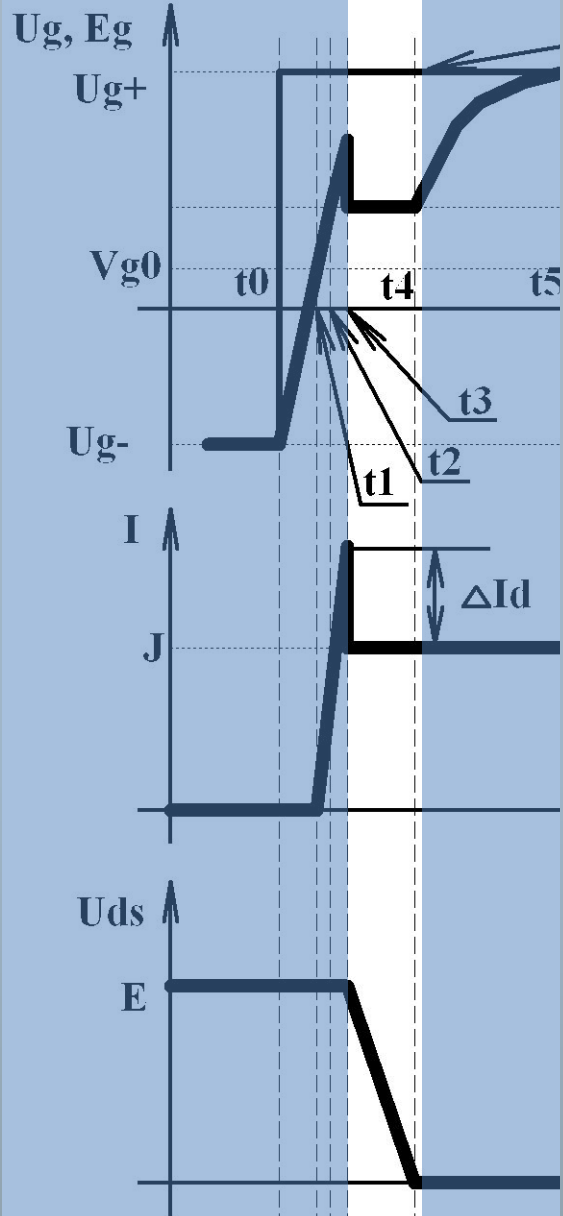
$$Udg(t4) = -\frac{J}{S} - Vg0$$

$$t_{H+} = t4 - t3 = \frac{E \cdot Rg \cdot Cdg}{Ug_+ - \frac{J}{S} - Vg0}$$



# Потери энергии на интервале

## t3-t4



$$I(t) = J$$

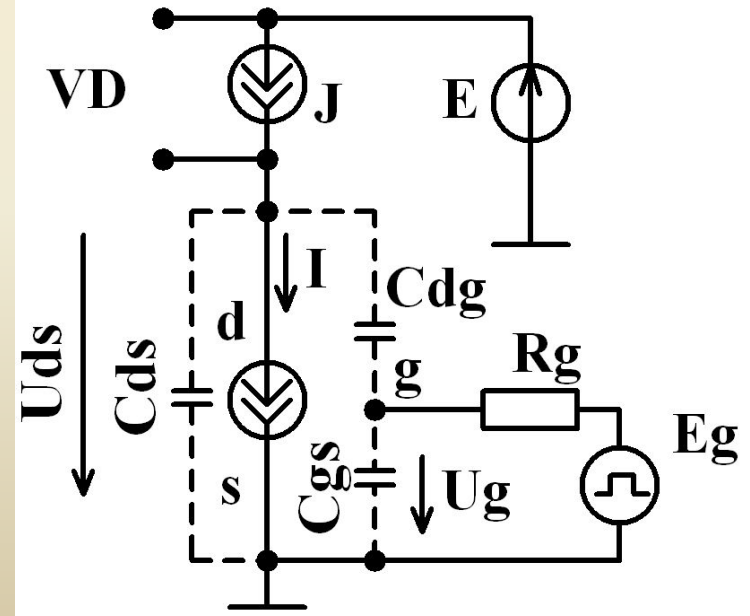
$$U_{ds}(t) = U_{dg}(t) + U_g = U_{dg}(t) + \frac{J}{S} + V_{g0} = E - \frac{U_{g+} - \frac{J}{S} - V_{g0}}{R_g \cdot C_{dg}} \cdot (t - t_3)$$

$$W_{H+} = \int_{t_3}^{t_4} I(t) \cdot U_{ds}(t) dt = E \cdot J - J \cdot \frac{U_{g+} - \frac{J}{S} - V_{g0}}{2 \cdot R_g \cdot C_{dg}} \cdot (t_4 - t_3)^2$$

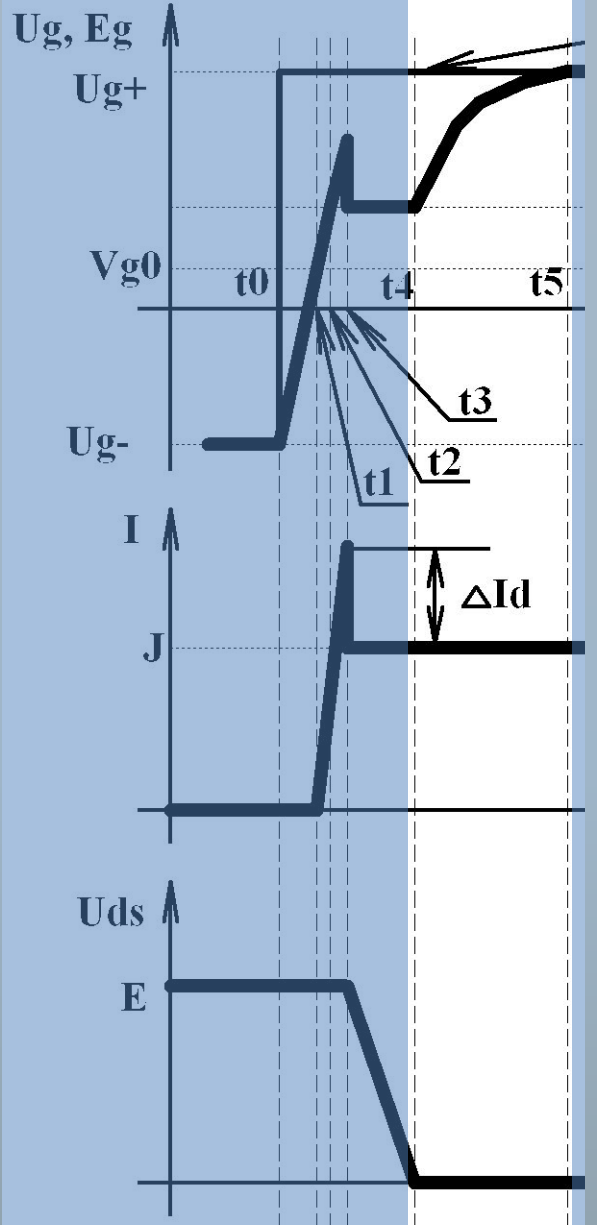
$$t_{H+} = t_4 - t_3$$

$$\frac{U_{g+} - \frac{J}{S} - V_{g0}}{R_g \cdot C_{dg}} \cdot (t_4 - t_3) = E$$

$$W_{H+} = \frac{J \cdot E}{2} \cdot t_{H+}$$



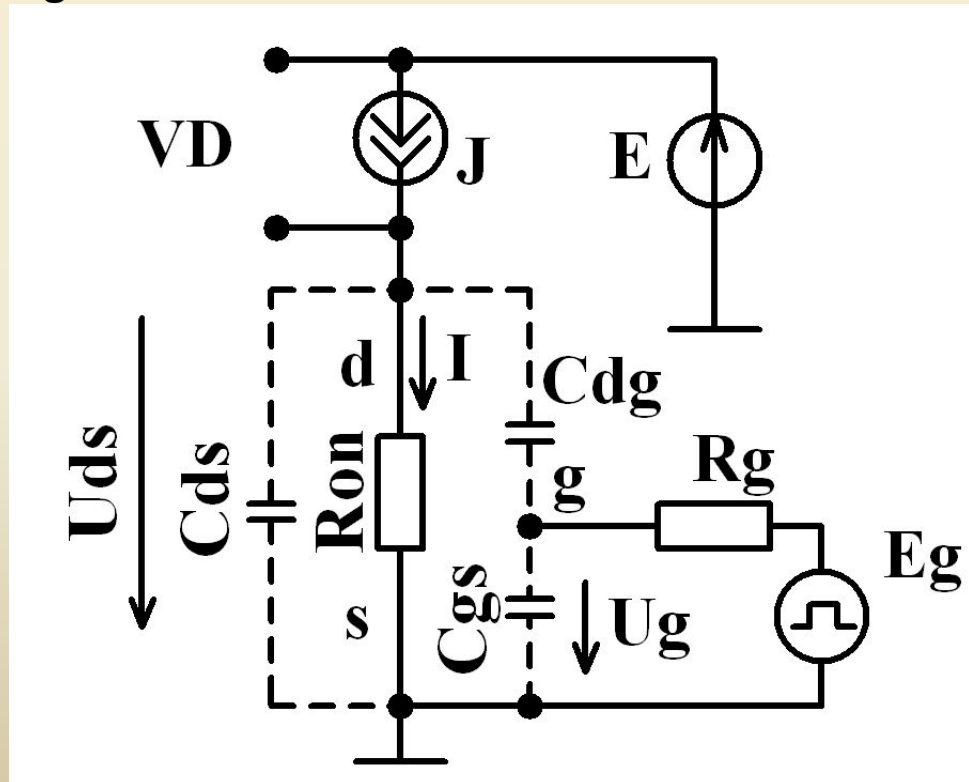
# Нарастание напряжения $U_g$ : $t_4$ - $t_5$



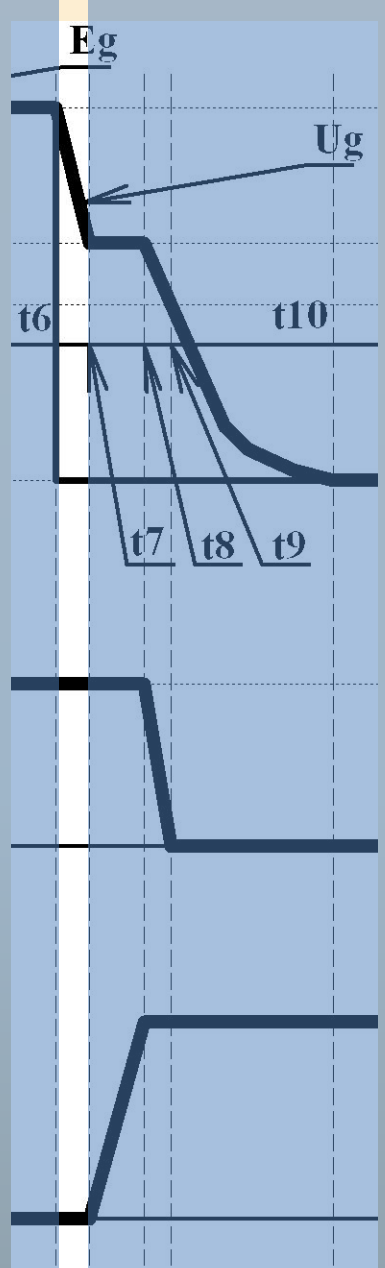
$$\tau = R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})$$

$$3 \cdot \tau = 3 \cdot R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})$$

$U_g$  – напряжение затвора –  
асимптотически стремится к  
 $U_{g+}$



# Спад напряжения $U_g$ : $t_6$ - $t_7$



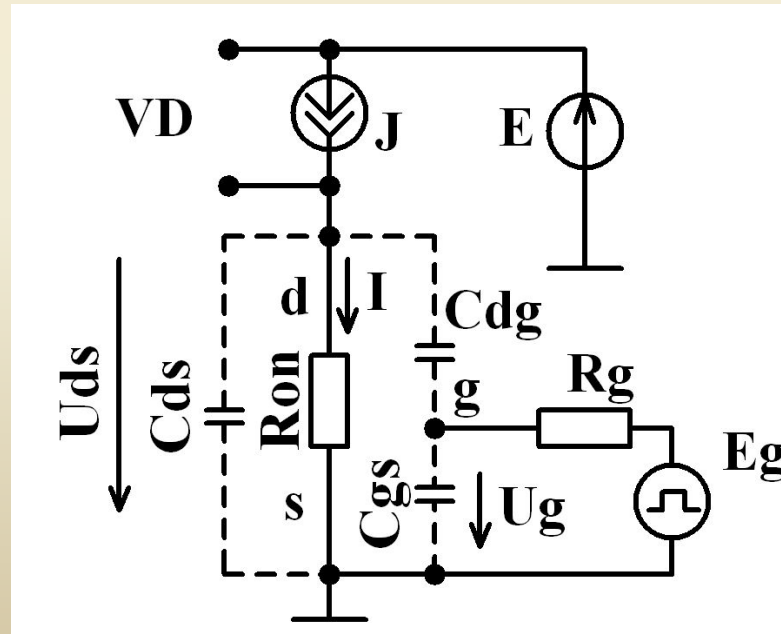
$$U_g(t) = U_{g+} \cdot e^{-\frac{t-t_6}{\tau}} + U_{g-} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_6}{\tau}}\right) = (U_{g+} - U_{g-}) \cdot e^{-\frac{t-t_6}{\tau}} + U_{g-}$$

$$\tau = R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})$$

$$U_g(t) = (U_{g+} - U_{g-}) \cdot \left(1 - \frac{t-t_6}{\tau}\right) + U_{g-}$$

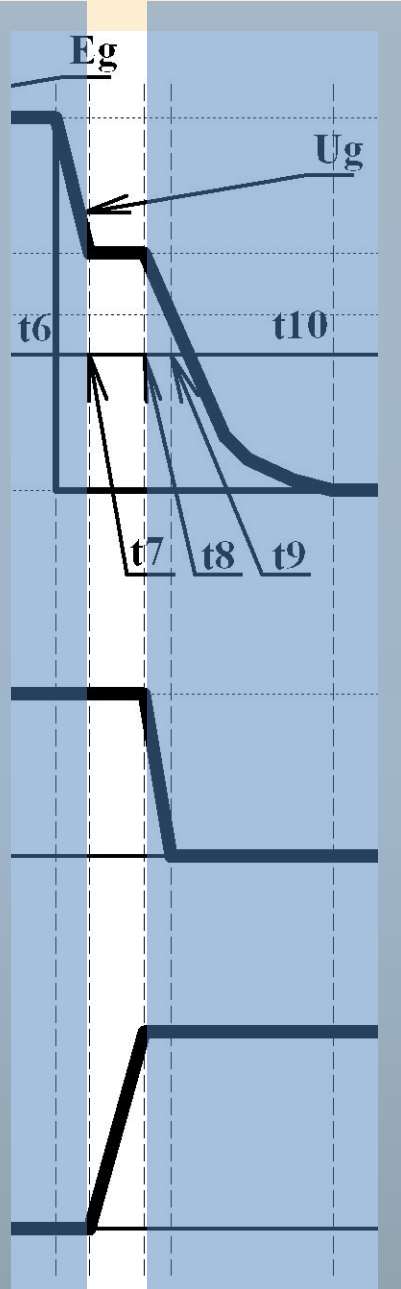
$$U_g(t_7) = \frac{I}{S} + V_{g0}$$

$$t_{3-} = t_6 - t_7 = \tau \cdot \left[ \frac{U_{g+} - \frac{I}{S} - V_{g0}}{U_{g+} - U_{g-}} \right] = R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg}) \cdot \left[ \frac{U_{g+} - \frac{I}{S} - V_{g0}}{U_{g+} - U_{g-}} \right]$$



# Наращение напряжения сток-

## исток: t7-t8

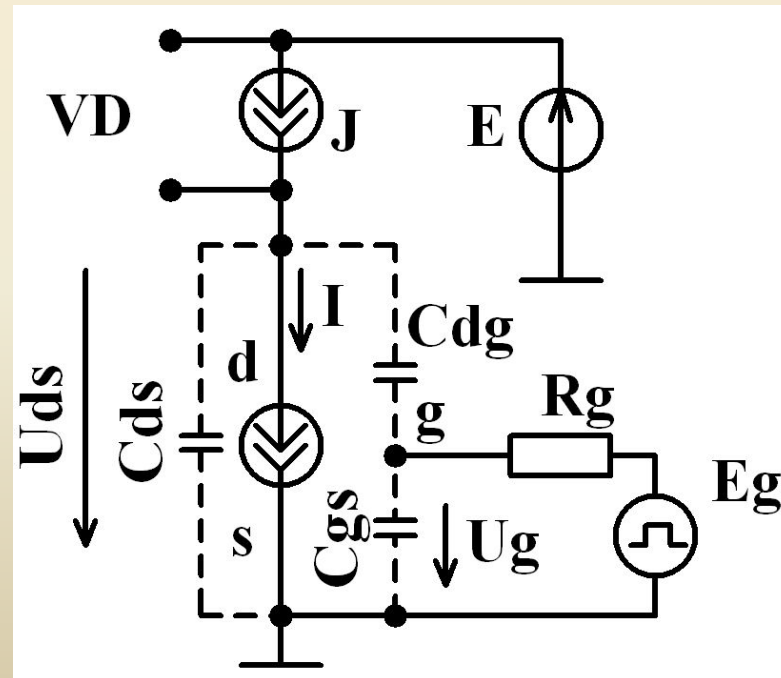


$$U_g = \frac{J}{S} + V_{g0}$$

$$U_{dg}(t) = -\frac{J}{S} - V_{g0} - \frac{U_{g-} - \frac{J}{S} - V_{g0}}{R_g \cdot C_{dg}} \cdot (t - t_7)$$

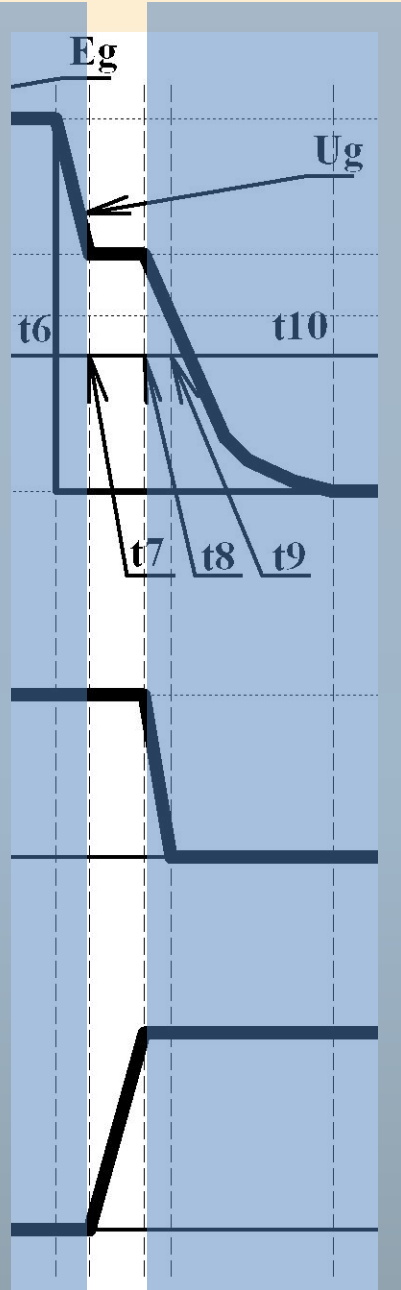
$$U_{dg}(t_8) = E - \frac{J}{S} - V_{g0}$$

$$t_{H-} = t_8 - t_7 = \frac{E \cdot R_g \cdot C_{dg}}{\frac{J}{S} + V_{g0} - U_{g-}}$$



# Потери энергии на интервале

## t7-t8



$$I(t) = J$$

$$U_{ds}(t) = U_{dg}(t) + U_g = U_{dg}(t) + \frac{J}{S} + V_{g0} = \frac{\frac{J}{S} + V_{g0} - U_{g-}}{R_g \cdot C_{dg}} \cdot (t - t_7)$$

$$W_{H-} = \int_{t_7}^{t_8} I(t) \cdot U_{ds}(t) dt = J \cdot \frac{\frac{J}{S} + V_{g0} - U_{g-}}{2 \cdot R_g \cdot C_{dg}} \cdot (t_8 - t_7)^2$$

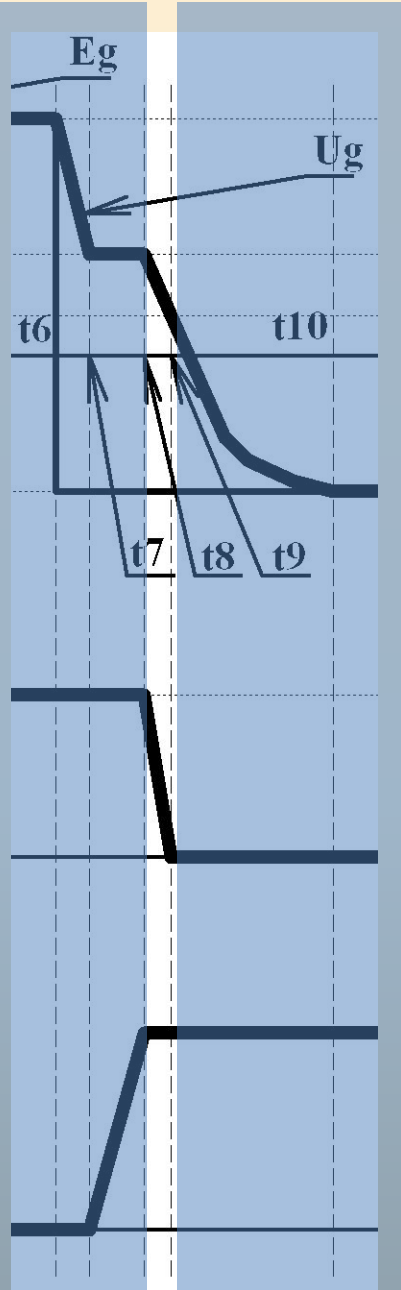
$$t_{H-} = t_8 - t_7$$

$$\frac{\frac{J}{S} + V_{g0} - U_{g-}}{R_g \cdot C_{dg}} \cdot (t_8 - t_7) = E$$

$$W_{H-} = \frac{J \cdot E}{2} \cdot t_{H-}$$



# Спад тока стока t8-t9



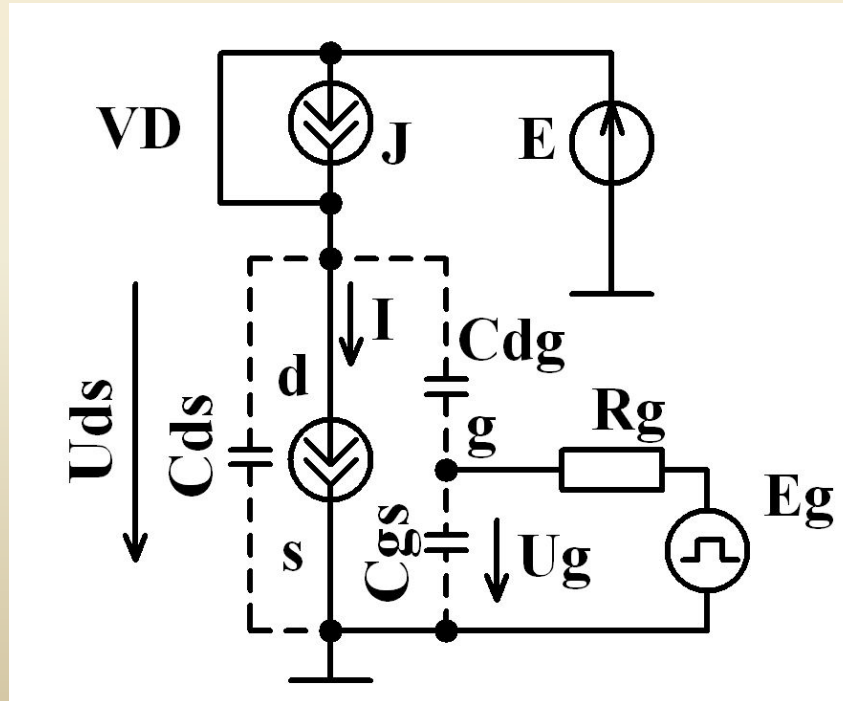
$$I(t) = S \cdot (Ug(t) - Vg0)$$

$$Ug(t8) = \frac{J}{S} + Vg0$$

$$Ug(t) = \left( \frac{J}{S} + Vg0 - Ug_- \right) \cdot \left( 1 - \frac{t - t8}{\tau} \right) + Ug_-$$

$$I(t) = S \cdot \left( \left( \frac{J}{S} + Vg0 - Ug_- \right) \cdot \left( 1 - \frac{t - t8}{\tau} \right) + Ug_- - Vg0 \right) =$$

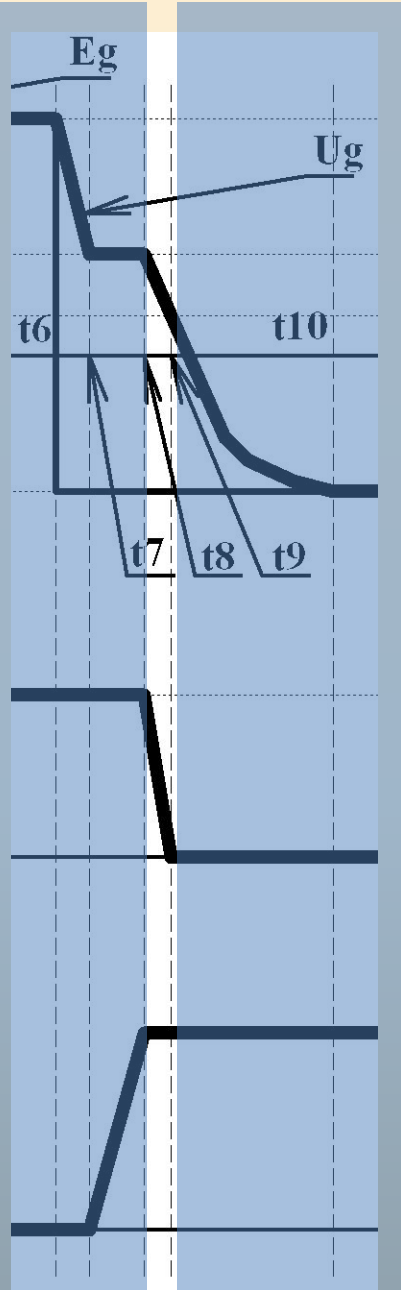
$$= J - \left[ J + S \cdot (Vg0 - Ug_-) \right] \cdot \frac{t - t8}{Rg \cdot (Cgs + Cdg)}$$



$$ti_- = t9 - t8 = \frac{Rg \cdot (Cgs + Cdg)}{1 + \frac{S}{J} \cdot (Vg0 - Ug_-)}$$

# Потери энергии на интервале

## t8-t9



$$I(t) = J - [J + S \cdot (V_{g0} - U_{g-})] \cdot \frac{t - t_8}{R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})}$$

$$U_{ds}(t) = E$$

$$W_{i-} = \int_{t_8}^{t_9} I(t) \cdot U_{ds}(t) dt = J \cdot E - [J + S \cdot (V_{g0} - U_{g-})] \cdot E \cdot \frac{(t_9 - t_8)^2}{2 \cdot R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})}$$

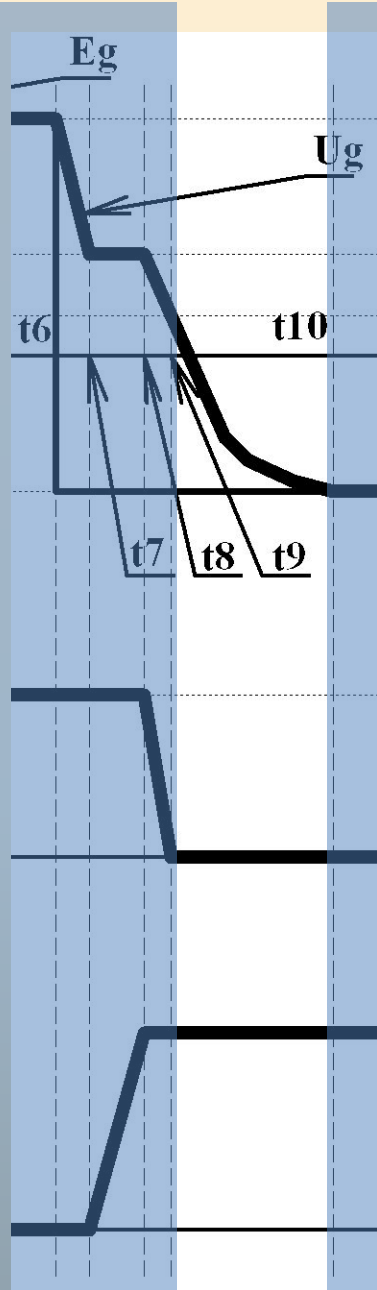
$$t_{i-} = t_9 - t_8$$

$$I(t_9) = J - [J + S \cdot (V_{g0} - U_{g-})] \cdot \frac{t_9 - t_8}{R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})} = 0$$

$$J \cdot E = [J + S \cdot (V_{g0} - U_{g-})] \cdot E \cdot \frac{t_9 - t_8}{R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})}$$

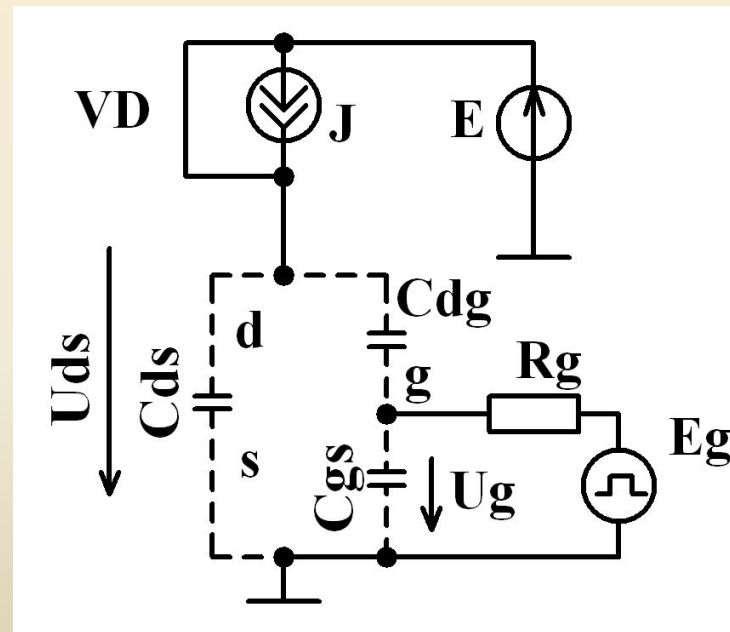
$$W_{i-} = \frac{J \cdot E}{2} \cdot t_{i-}$$

# Спад напряжения $U_g$ : $t_9$ - $t_{10}$



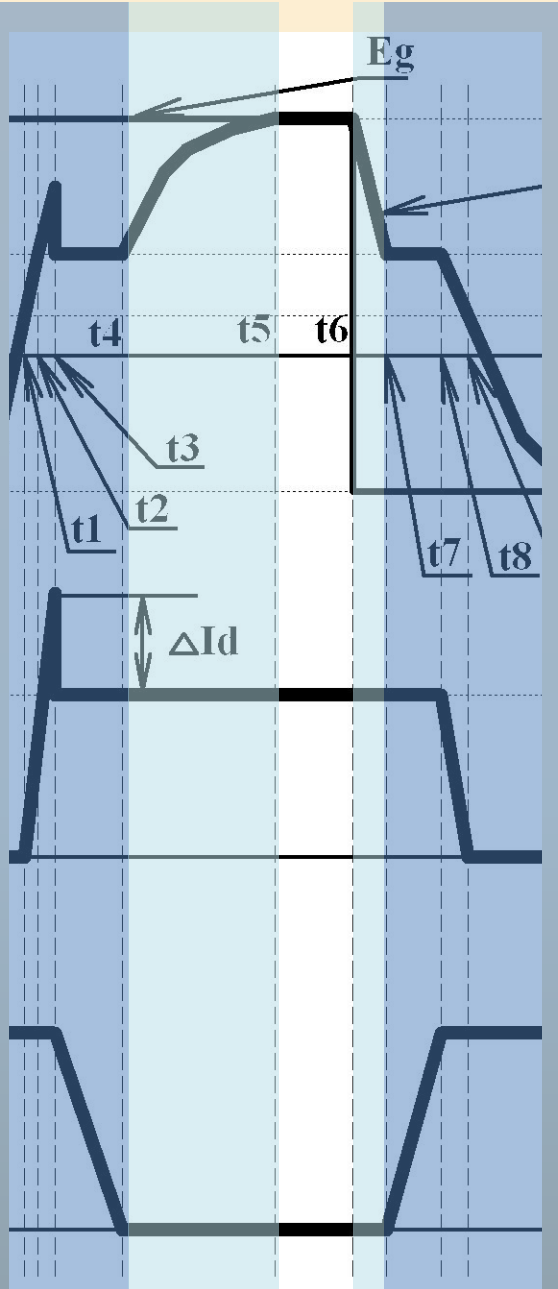
$$\tau = R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})$$

$$3 \cdot \tau = 3 \cdot R_g \cdot (C_{gs} + C_{dg})$$



# Транзистор в состоянии

## насыщения: t5-t6



Фактически, транзистор находится в области

насыщения от момента t4 до момента t7. Но можно пренебречь длительностью t4-t5 и t6-t7

по сравнению с t5-t6 (в реальных масштабах по времени).

Ключ находится в состоянии проводимости, поэтому соответствующие потери называются

потерями проводимости:

$$W_{\text{пр}} = \int_{t5}^{t6} I(t) \cdot U_{ds}(t) dt$$

$$U_{ds} = R_{on} \cdot J$$

$$W_{\text{пр}} = \int_{t5}^{t6} R_{on} \cdot J^2 dt = R_{on} \cdot J^2 \cdot (t6 - t5)$$

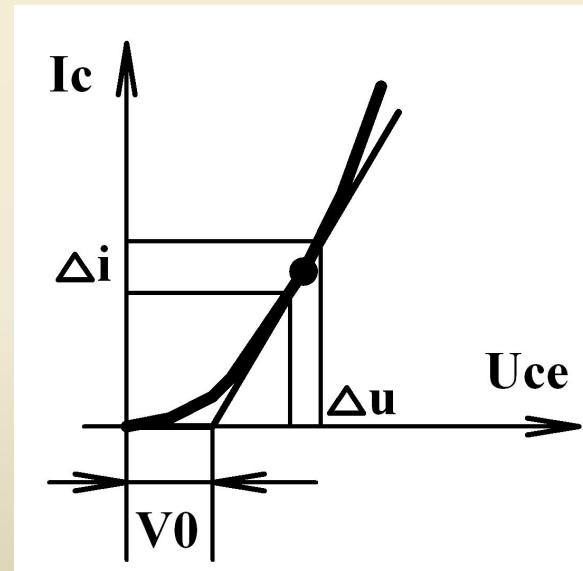
$$P_{\text{пр}} = W_{\text{пр}} \cdot \frac{1}{T} = R_{on} \cdot J^2 \cdot \frac{(t6 - t5)}{T}$$

# Потери мощности на интервале

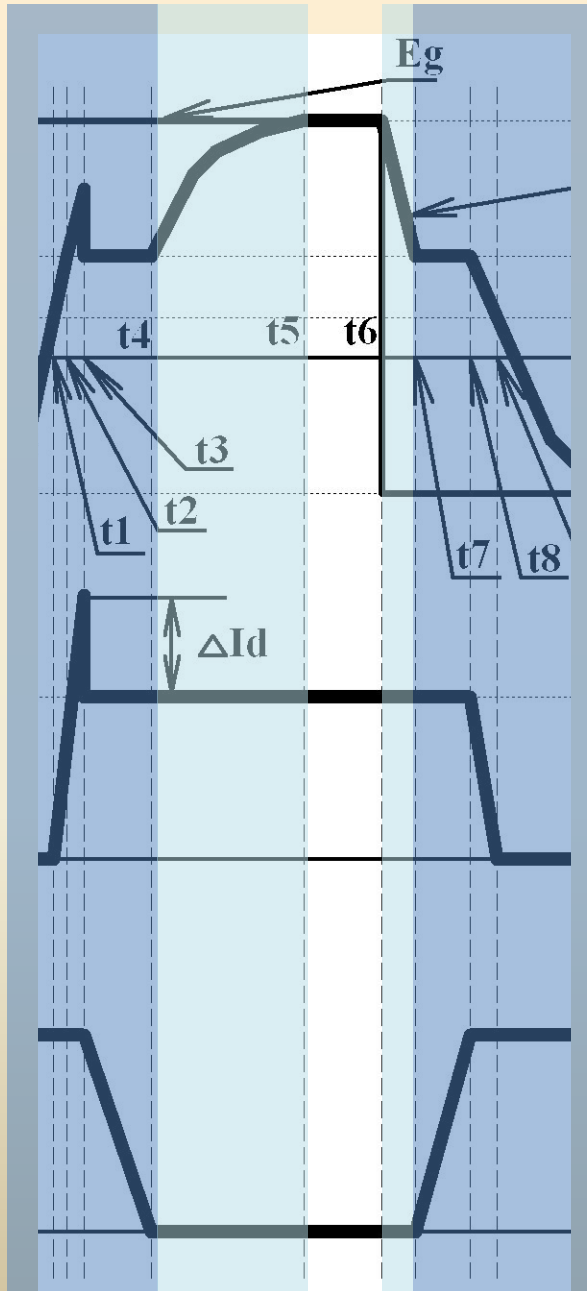
## t5-t6

**Вольт-амперная характеристика:**  
например, для биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ):

$$U_{ce}(I) = R_{dif} \cdot I + V_0$$

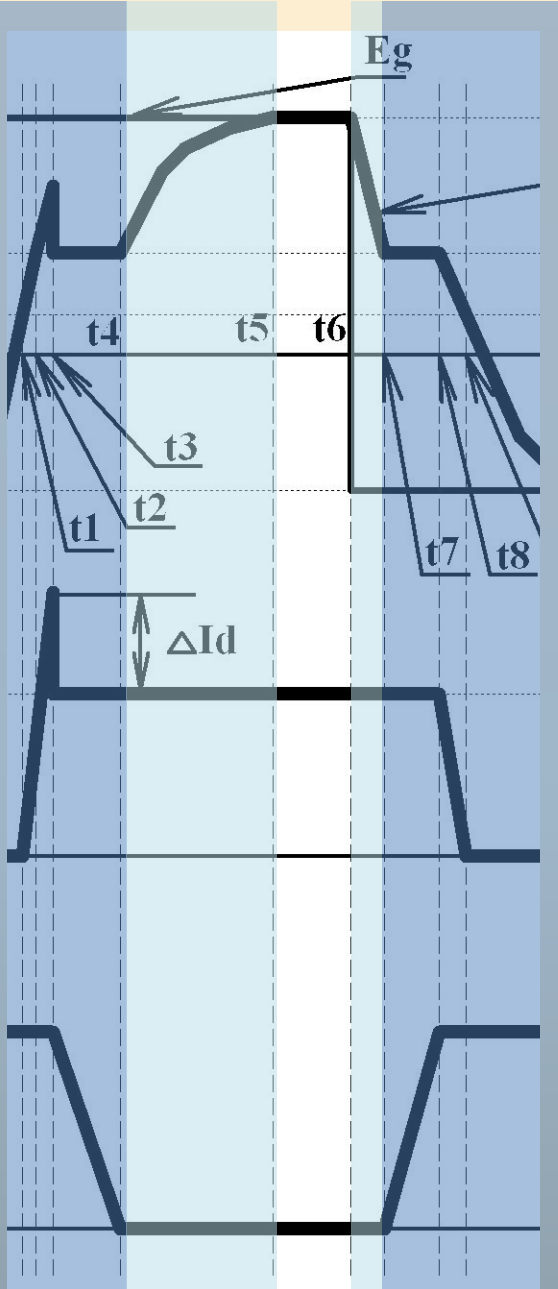


$$R_{dif} = \frac{\Delta u}{\Delta i}$$



# Потери мощности на интервале

## t5-t6



**Более общий**

$$U_{ce}(I) = R_{dif} \cdot I + V_0$$

Аналогично вычисляется энергия потерь

$$P_{пр} = \frac{1}{T} \cdot W_{пр} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t5}^{t6} U_{ce}(t) \cdot I(t) dt =$$

$$= R_{dif} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_{t5}^{t6} I(t)^2 dt + V_0 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_{t5}^{t6} I(t) dt$$

Удобно использовать действующий и средний ток стока:

$$IVT_D = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t5}^{t6} I(t)^2 dt}$$

$$IVT_{CP} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t5}^{t6} I(t) dt$$

$$P_{пр} = R_{dif} \cdot IVT_D^2 + V_0 \cdot IVT_{CP}$$

# Суммарные потери

## Включени

е:

$$P_{\text{вкл}} = \frac{1}{T} \cdot W_{i_+} + \frac{1}{T} \cdot W_{H_+}$$

Часто верно,  $W_{i_+} \ll W_{H_+}$

что

$$P_{\text{вкл}} \approx \frac{1}{T} \cdot W_{H_+} = \frac{1}{T} \cdot \frac{J \cdot E}{2} \cdot t_{H_+}$$

## Выключени

е:

$$P_{\text{выкл}} = \frac{1}{T} \cdot W_{i_-} + \frac{1}{T} \cdot W_{H_-}$$

Часто верно,  $W_{i_-} \ll W_{H_-}$

$$P_{\text{выкл}} \approx \frac{1}{T} \cdot W_{H_-} = \frac{1}{T} \cdot \frac{J \cdot E}{2} \cdot t_{H_-}$$

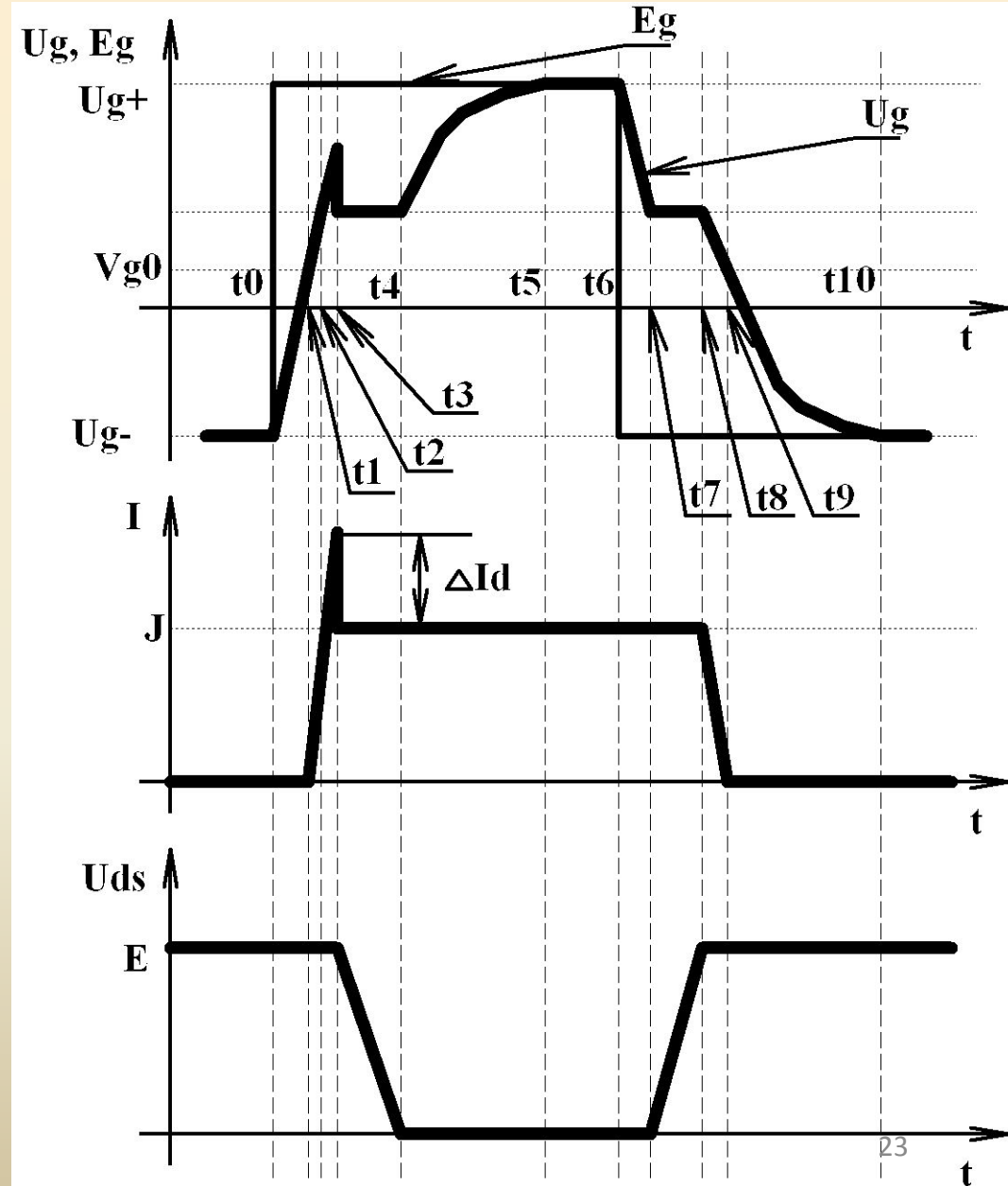
## Динамические

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{вкл}} + P_{\text{выкл}}$$

## Суммарные

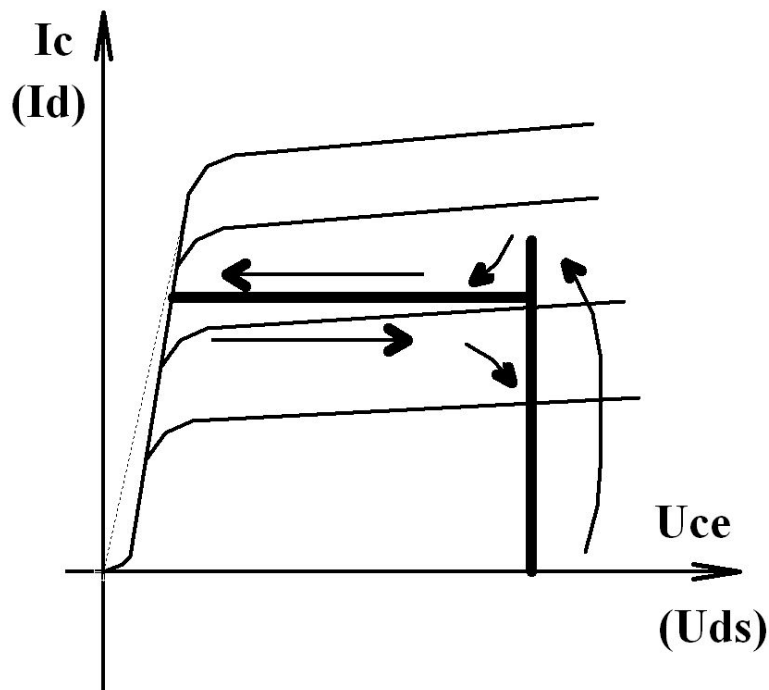
потери:

$$P_{VT} = P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}}$$



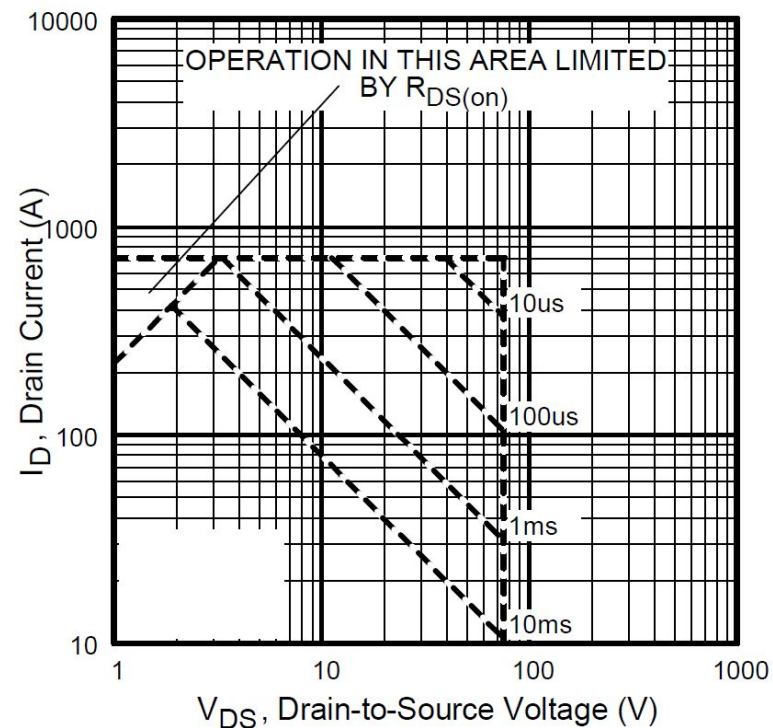
# Область безопасной работы

Траектория рабочей точки:  
точки:



ОБР

(Maximum Safe Operating Area)



Maximum Safe Operating Area



# Расчет режима работы транзисторного ключа

В итоге, из сказанного выше следует, что для расчета режима работы

транзистора, примененного в качестве силового ключа, необходимо знать:  
Действующий ток ключа (стока или коллектора):

$I_{VTД}$

Средний ток ключа (стока или коллектора):

$I_{VTСР}$

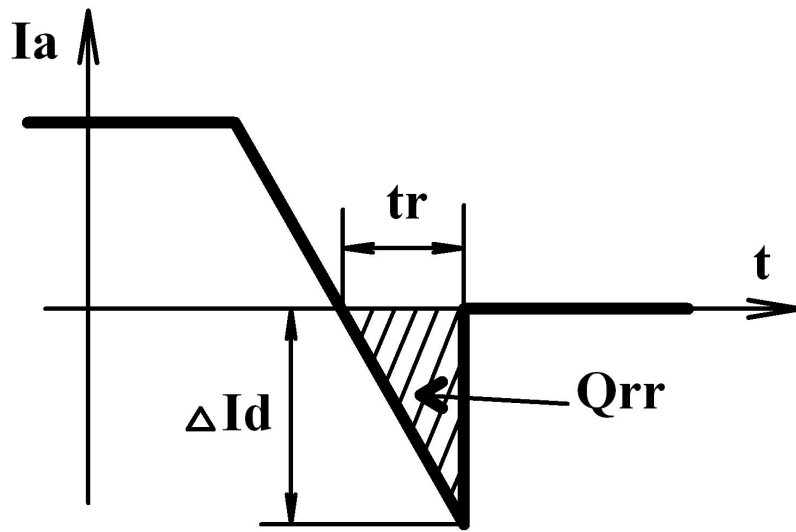
Коммутируемый ток и напряжение:

$J, E$  (возможно, различные для включения и выключения)

Параметры самого транзистора:

$S, V_{g0}, C_{gs}, C_{dg}, C_{ds}$

# Пояснение: восстановление блокирующей способности диода



$I_a$  – ток анода

$Q_{rr}$  – заряд, который  
выводится  
из диода (“reverse recovery”)  
 $t_r$  – время обратного

восстановления

$\Delta I_d$  – максимальный обратный  
ток  
диода

Если (например, из справочника) известен заряд  $Q_{rr}$  и скорость  
изме <sup>$\frac{d I_a}{d t}$</sup> нения  
тока  <sup>$\frac{d I_a}{d t}$</sup> , то можно найти максимальный обр

$$Q_{rr} = \frac{\Delta I_d \cdot t_r}{2} = \Delta I_d \cdot \frac{\Delta I_d}{2 \cdot \frac{d I_a}{d t}}$$

следовательно

$$\Delta I_d = \sqrt{\frac{Q_{rr}}{2 \cdot \frac{d I_a}{d t}}}$$

Скорость изменения тока можно в данном случае найти из формулы  
для  $I(t)$  для интервала  $t_1$ - $t_3$ .