

АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ ЗАПАЛЮВАННЯ

доц. Бороденко Ю.М.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ ЗАПАЛЮВАННЯ

4.1 Аналіз технічних рішень систем запалювання

- 4.1.1 Класифікація електричних систем запалювання за принципом дії
- 4.1.2. Загальна характеристика та вимоги до систем запалювання автомобільних ДВЗ.
- 4.1.3. Структурний наліз автомобільних систем запалювання
- 4.1.4. Склад систем та критерії вибору елементів.
- 4.1.5. Порівняльний аналіз робочих характеристик систем запалювання.

4.2. Моделювання фізичних процесів в колах системи запалювання

- 4.2.1. Аналіз процесів робочого циклу ідеалізованої системи з накопиченням енергії в котушці запалювання.
- 4.2.2. Урахування електромагнітних втрат в контурах системи з реальними параметрами.
- 4.2.3. Аналіз процесів у колах транзисторної системи.
- 4.2.4. Особливості робочого циклу в конденсаторних системах запалювання.

4.3. Синтез транзисторних систем запалювання

- 4.3.1. Критерії вибору типу виконавчого транзистору.
- 4.3.2. Оцінка параметрів керуючого сигналу датчиків безконтактних систем.
- 4.3.3. Способи підвищення швидкодії комутуючого пристрою.
- 4.3.4. Заходи, щодо захисту виконавчого транзистору.

4..4. Способи поліпшення робочих характеристик електронних систем запалювання.

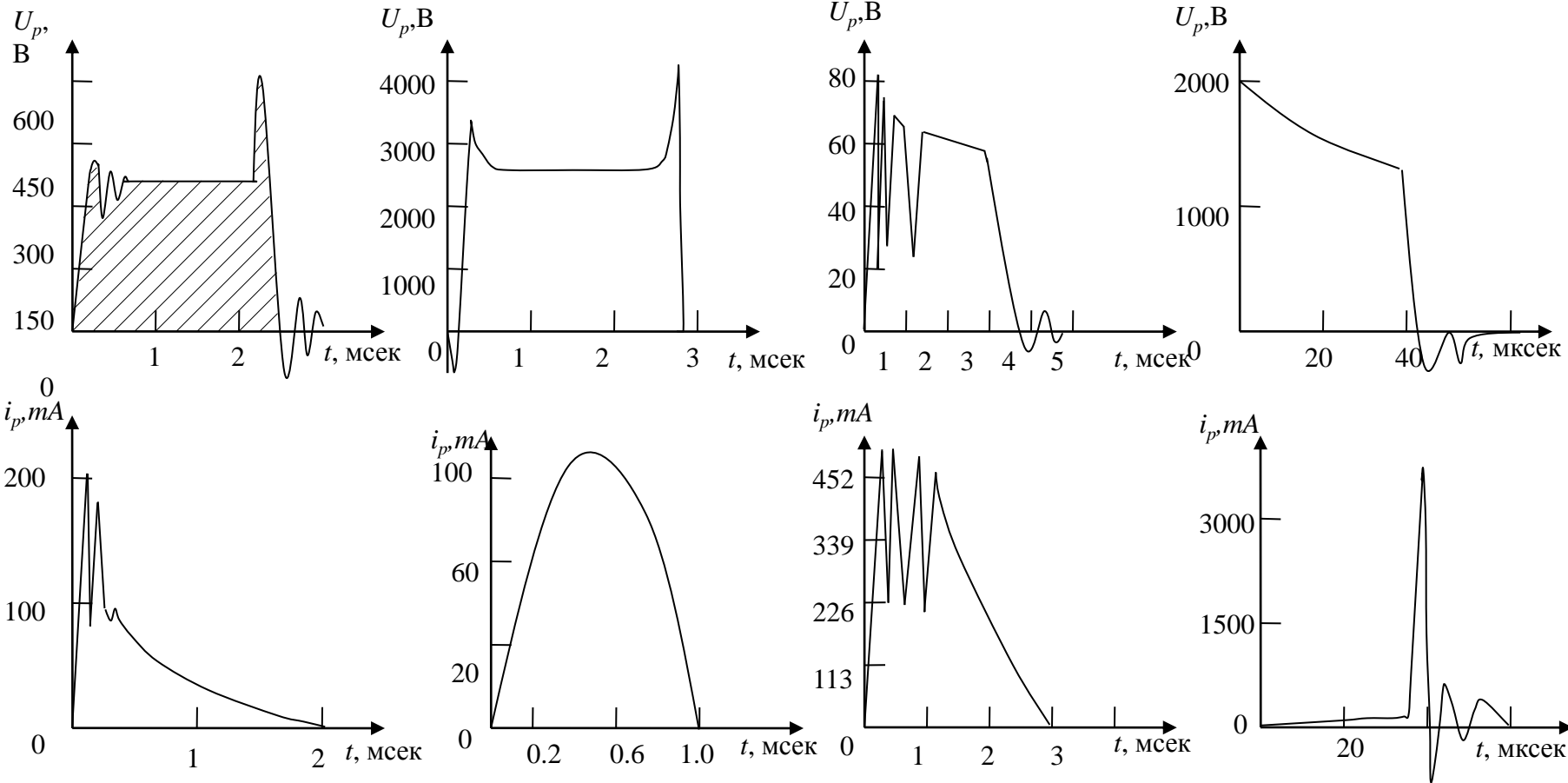
- 4.4.1. Тиристорна комутація струму первинного кола.
- 4.4.2. Електронні автомати випередження запалювання.
- 4.4.3. Програмні й адаптивні регулятори часу накопичення.
- 4.4.4. Цифрові й мікропроцесорні системи запалювання.
- 4.4.5. Статичний розподіл вторинної напруги

4.1.1. Класифікація систем запалювання за принципом дії



Критерії вибору: характеристики двигуна (режим подачі та тип палива), умови експлуатації, вимоги до ваги і габаритів, собівартість, експлуатаційні витрати.

Часові характеристики електричного розряду на свічах запалювання



**Іскровий
батарейна**

**іскро-дуговий
змінного струму**

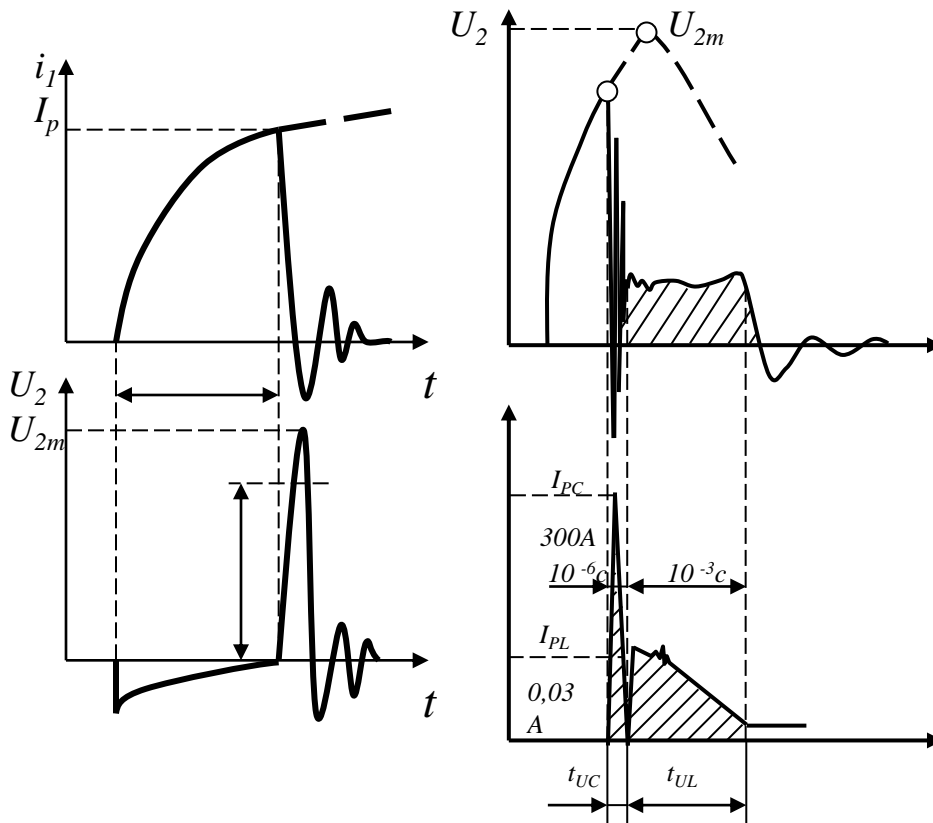
**ерозійна свіча
L – фаза**

**НП свіча
C - фаза**

4.1.2. Загальна характеристика та вимоги до СЗ

Вимоги до системи

- достатню U_{2m} для пробую іскрового проміжку - безперервне іскроутворювання на всіх режимах роботи двигуна;
- іскра повинна мати достатню енергію й тривалість для спалаху;
- оптимальний момент запалювання;
- надійність при високих температурах та механічних впливів;
- ерозійна стійкість свічок запалювання.



Параметри системи (держстандарт)

- фактична U_{2m} , що порівнюється з $U_{пр}$ визначає придатність системи;
- струм розриву I_p , визначає $W_{кз}$ й термін служби комутуючих пристроїв;
- середній струм споживання $I(n)$, для аналізу зарядного балансу АКБ;
- напруга U_{ip} й струм I_{ip} іскрового розряду, для розрахунку W_{ip} ;
- тривалість іскрового розряду t_{ip} визначає здатність запалення при граничних характеристиках паливної суміші й величини ерозії електродів свічки;
- максимальний індуктивний струм розряду I_{pL} ;
- енергія індуктивної складової іскрового розряду W_L визначає здатність до спалаху іскри, та якість згоряння паливної суміші, потужність ДВЗ, ККД, рівень токсичності;
- час t_2 наростання U_{2m} , характеризує допустиме навантаження нагаром;
- напруга U_{1m} індукована в первинній обмотці котушки для визначення навантаження комутуючого елемента;
- граничне навантаження R_n нагару при якому U_{2m} знижується до 15 кВ.

$U_{пр}$ визначається величиною іскрового зазору, формою, матеріалом та розташуванням електродів, потужності заряду та швидкості зростання напруги, тиску та температури в камері згоряння, складу робочої суміші, характеру та швидкості її руху).

Мета проектування СЗ

**підвищення надійності та компактності;
зниження собівартості виготовлення та експлуатаційних витрат;
поліпшення параметрів розряду та ефективності спалахування;
зниження потужності, що потребується;
поліпшення функціональних показників керування.**

Формулювання ТЗ

Синтезувати СЗ для нового ДВЗ

Адоптувати нову СЗ для ДВЗ, що існує

Замінити окремі елементи СЗ на сучасні (змінити промислову структуру)

Поліпшити робочі характеристики СЗ згідно завдання

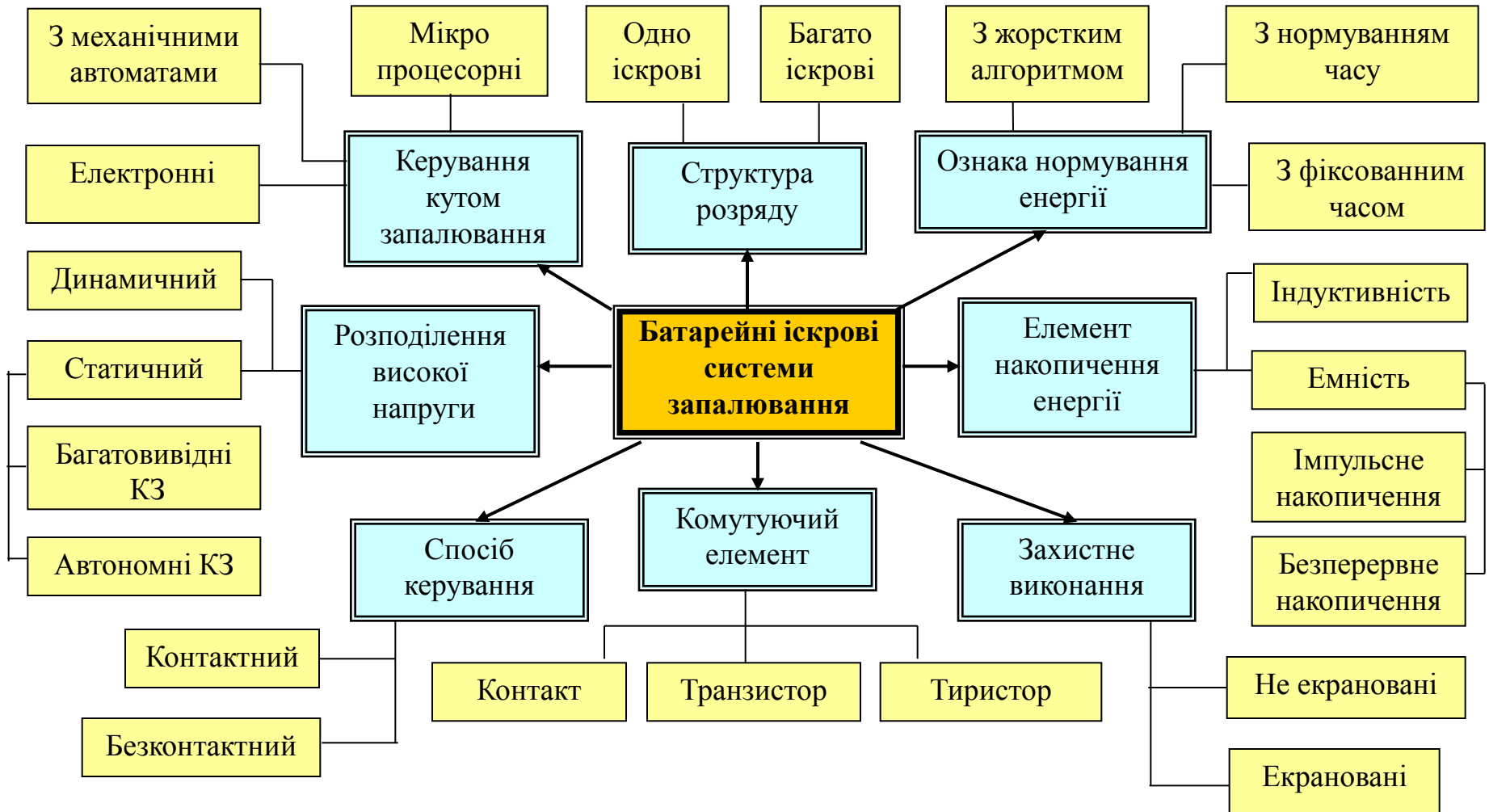
Розробити новий (модифікований) апарат (пристрій) СЗ.

Розробити комутатор струму для визначеної силової частини системи

Адаптувати програмне забезпечення МП СЗ (чіп-тюнінг)

4.1.3. Структурний аналіз автомобільних систем запалювання

Класифікація систем запалювання за загальними ознаками

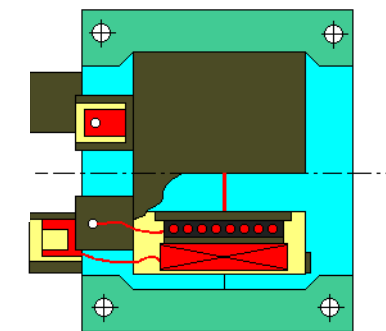
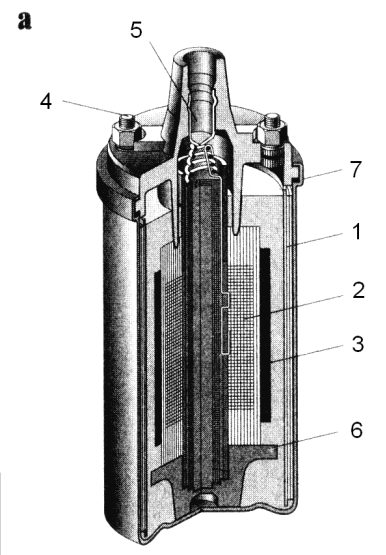
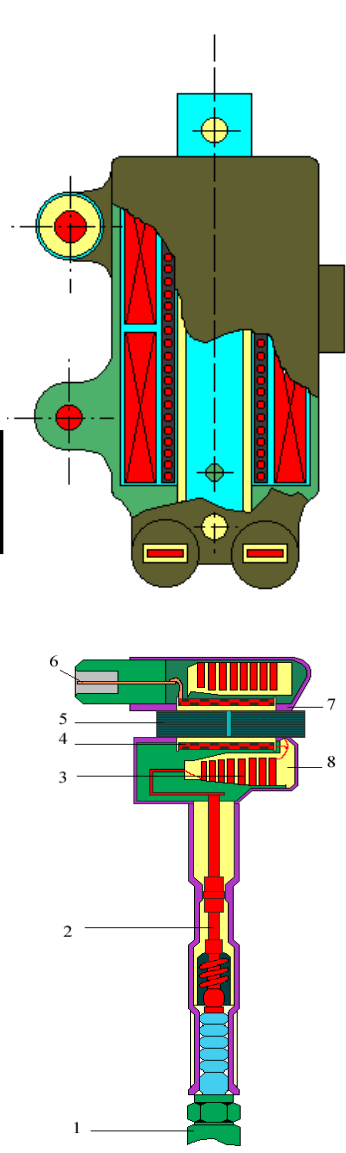
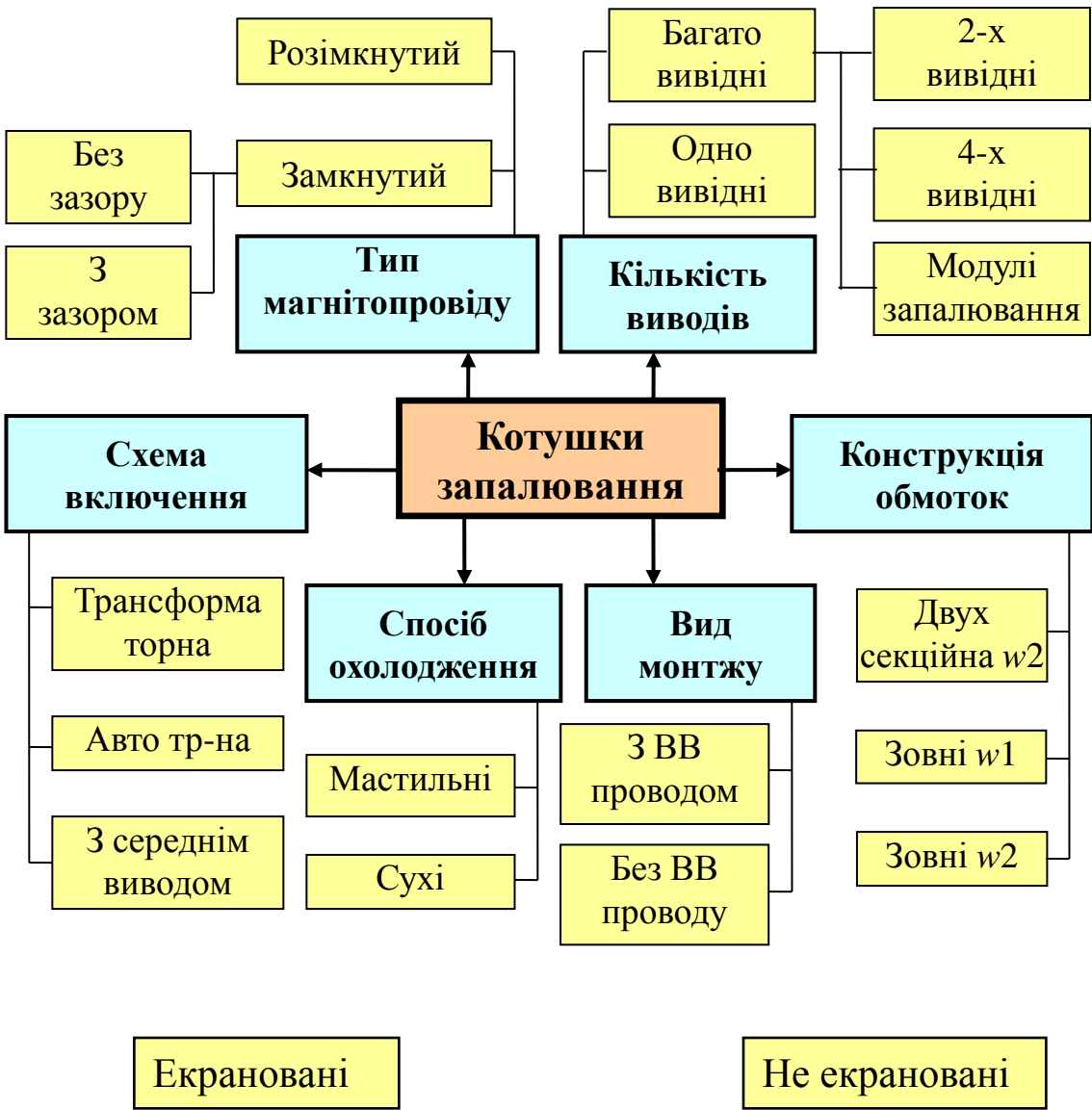


Класифікація систем запалювання за промисловою ознакою

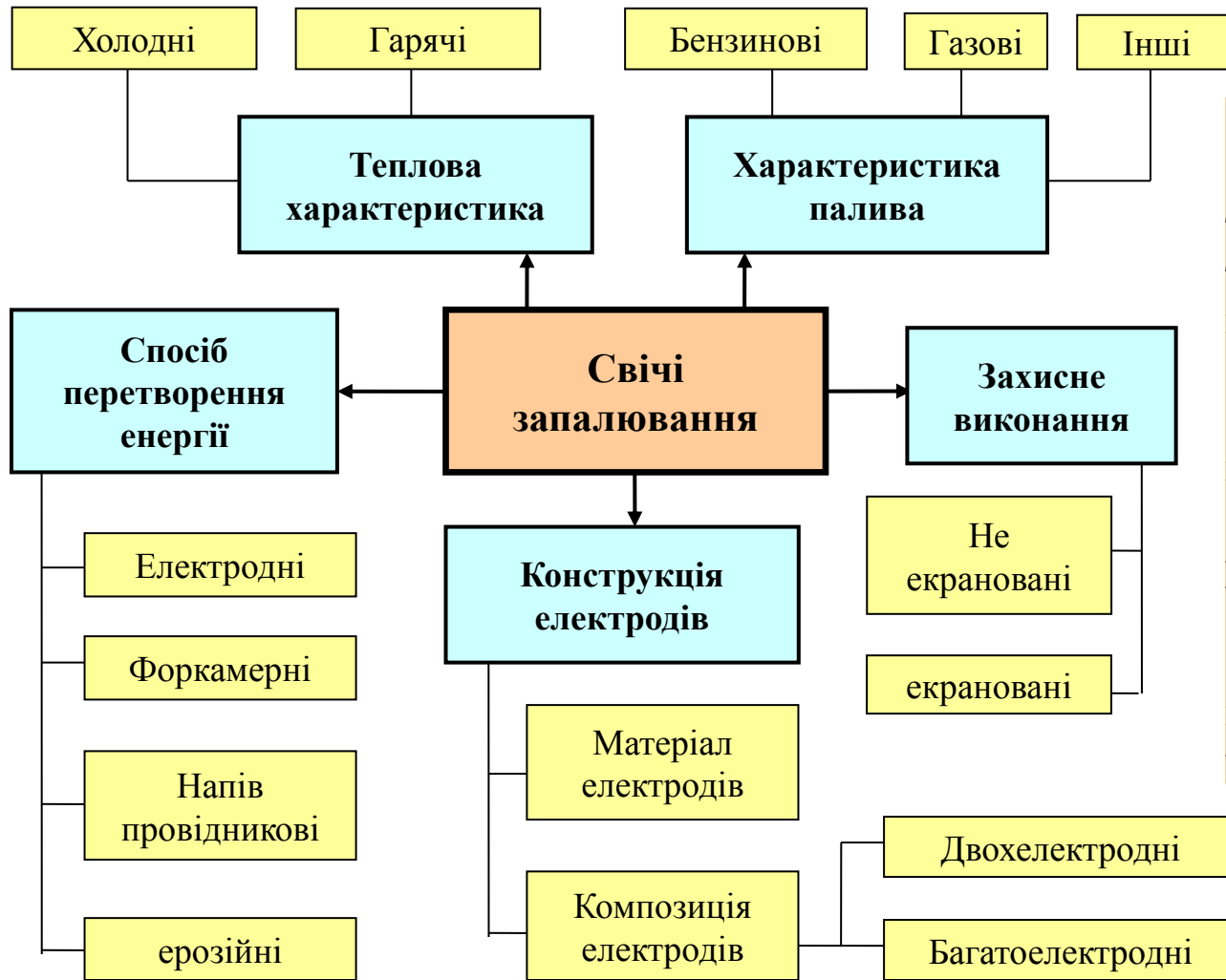
- контактна з механічним переривником і котушкою запалювання;
- контактна-транзисторна;
- контактна-тиристорна з накопиченням енергії в ємності;
- безконтактна-тиристорна з накопиченням енергії в ємності й індукційним датчиком;
- транзисторна з накопиченням енергії в ємності з датчиком Холлу;
- безконтактна-тиристорна з накопиченням енергії в ємності з датчиком Холу;
- безконтактна-транзисторна з накопиченням енергії в індуктивності й індукційним датчиком;
- безконтактна-транзисторна з накопиченням енергії в індуктивності з датчиком Холу;
- безконтактна цифрова з механічним розподільником;
- цифрова зі статичним розподільником;
- мікропроцесорна система керування автомобільним двигуном.

4.1.4. Склад систем та критерії вибору елементів

Структурна класифікація котушок запалювання



Структурна класифікація свічок запалювання



Проблеми дослідження

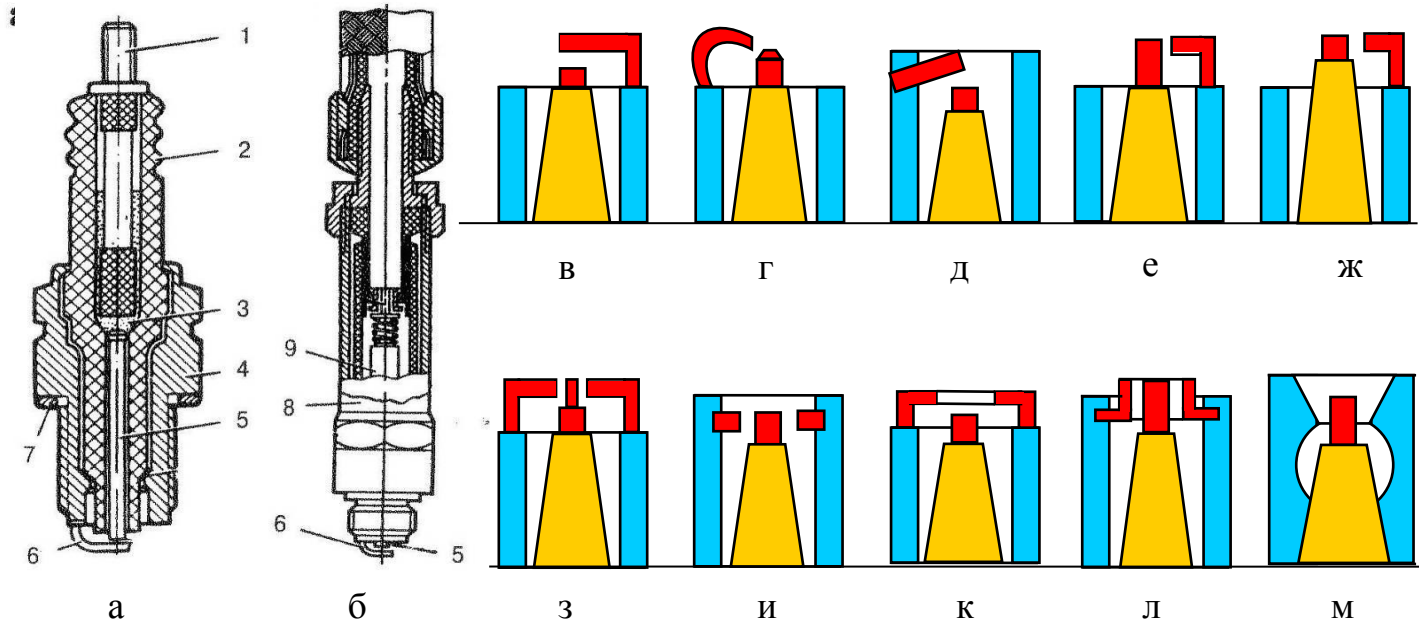
термохімічні та термодинамічні процеси в камері згорання,
фізичні та хімічні властивості конструкційних матеріалів,
розподіл напруженості електричного поля,
процеси іонізації та утворення плазми.

калільне число свічки
(8, 11, 14, 17, 20, 23, 26)

«гарячі»

«холодні»

Конструкція свічок запалювання



Масовий електрод:
торцевий
гакоподібний,
парний сплющений,
поглиблені бокові,
кольцеві
тангенціальний
підковоподібний
боковий

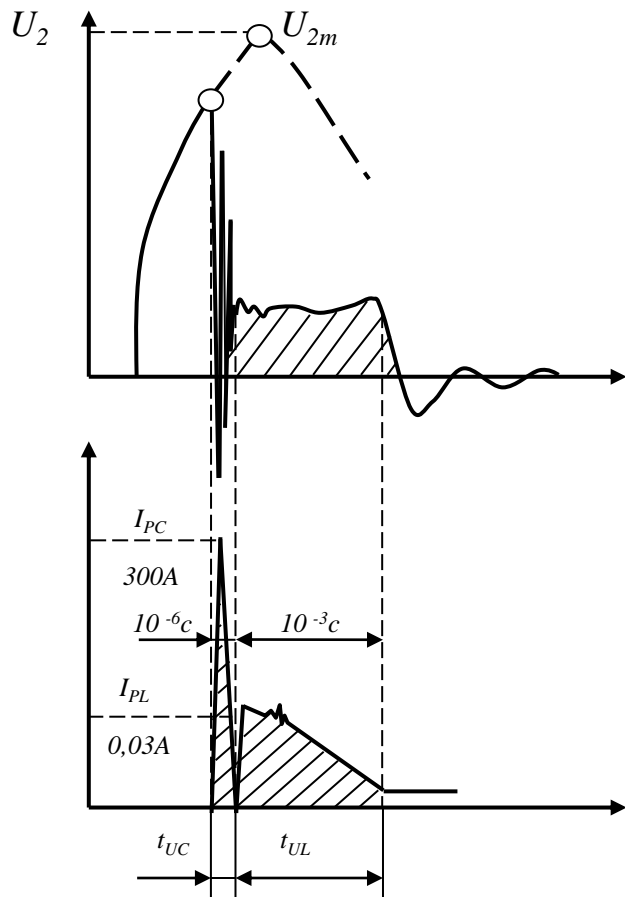
Центральний електрод:
сплав 13X25T
ніхром Х20Н80,
мідний з покриттям
срібляний
платиновий

Параметри свічок:
Посадочні розміри (різьба)
Робочий зазор,
Калільне число
Опір ізоляції

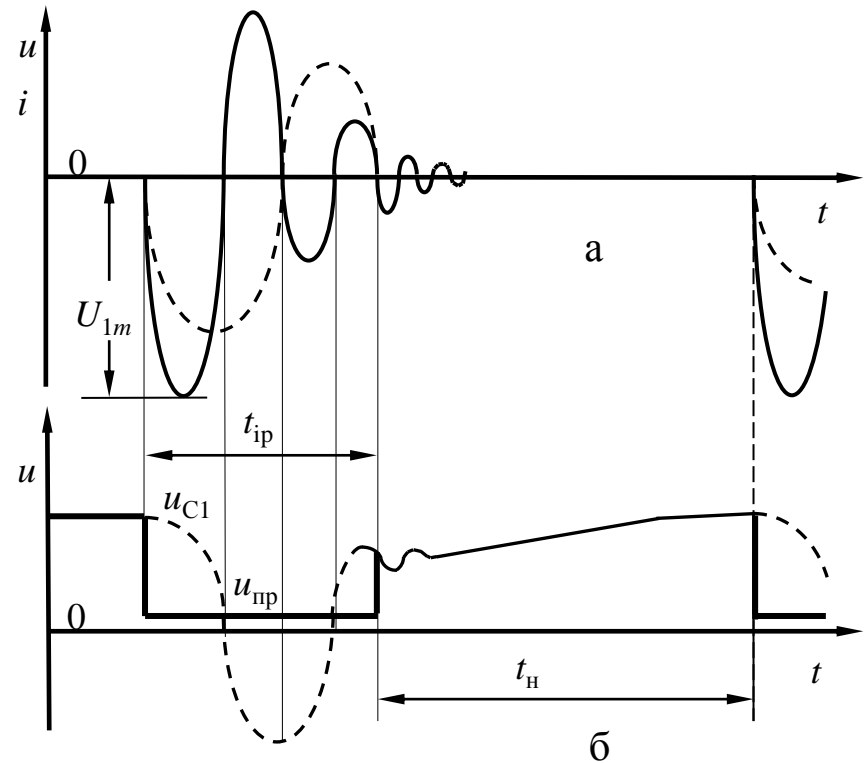
**Гальванічні,
З розподіленням резистом,
Екрановані**

4.1.5. Порівняльний аналіз робочих характеристик систем запалювання

Розрядні процеси в колах систем запалювання

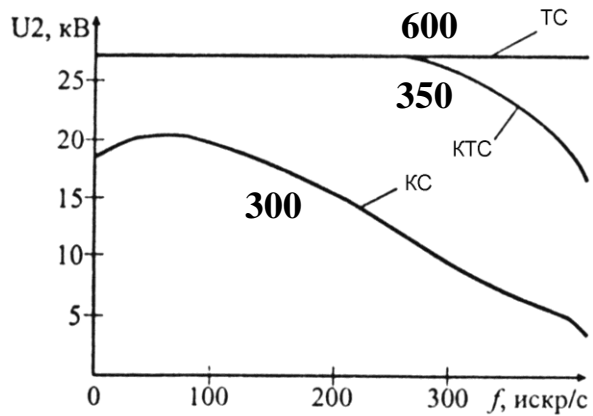


З накопиченням в L

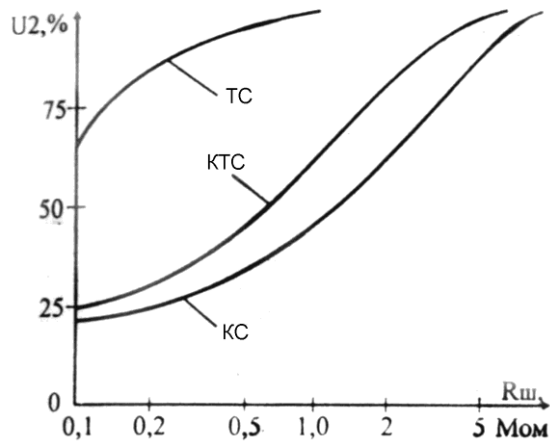
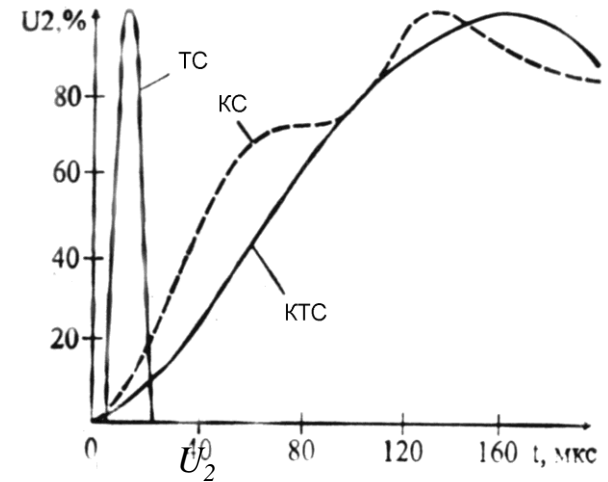


З накопиченням в C

Робочі характеристики систем запалювання



$$f_{IP} = \frac{nz_{\Pi}}{30z_T}$$

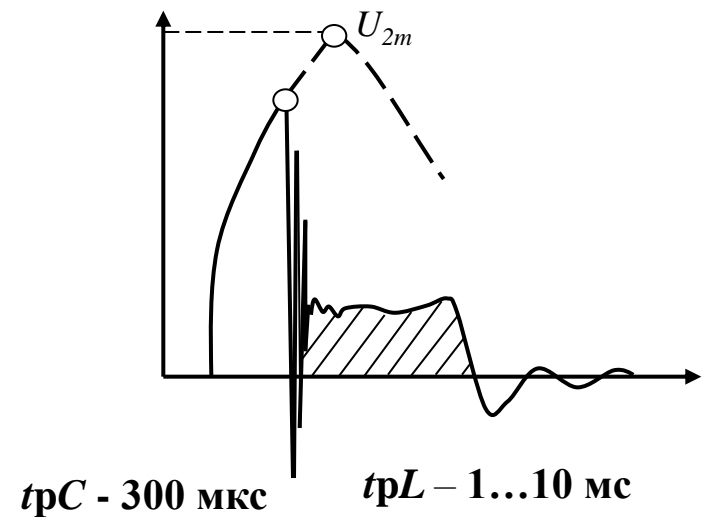


КС - 20...10ВТ

КТС - 60...40ВТ

ТСІ - 5...30ВТ

ТСБ - 20...30ВТ



Тема 4.2 Моделювання фізичних процесів в колах системи запалювання

4.2.1. Аналіз процесів робочого циклу ідеалізованої системи з накопиченням енергії в котушці запалювання

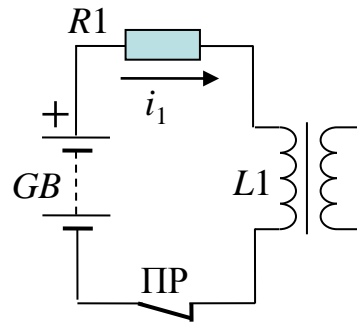
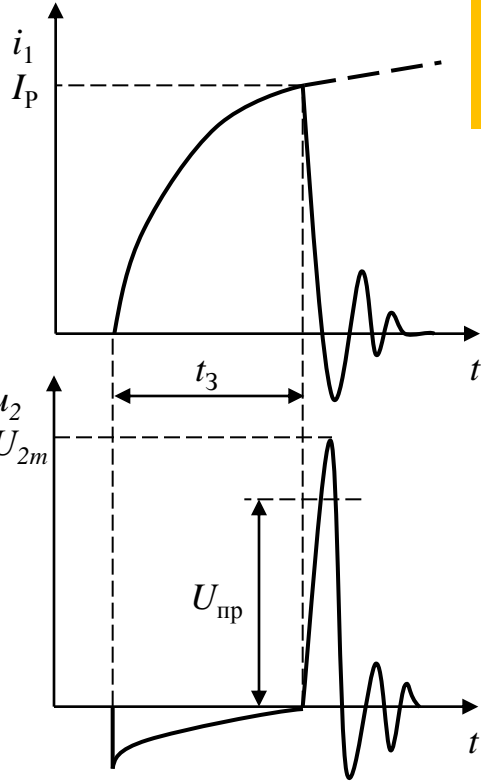
Не враховуються витрати енергії на комутуючому елементі, іскровому проміжку розподільника, сталі котушки запалювання, на нагарі свічки.

Перший етап

$$U_B = i_1 R_1 - e_1 = i_1 R_1 - L_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$i_1 = \frac{U_B}{R_1} \left[1 - \exp\left(-t \frac{R_1}{L_1}\right) \right]$$

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt} = -\frac{M}{L_1} U_B \exp\left(-t \frac{R_1}{L_1}\right) \quad M = L_1 k_T$$



$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_3} [i_1 t]^2 dt}$$

$$\gamma_3 = \frac{t_3}{(t_3 + t_p)} = \frac{\alpha_3}{(\alpha_3 + \alpha_p)}$$

$$I_p = \frac{U_1}{R_1} \left[1 - \exp\left(-t_3 \frac{R_1}{L_1}\right) \right] = \frac{U_1}{R_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_1 \cdot 120\gamma}{L_1 \cdot z_n}\right) \right]$$

$$P_1 = I_1^2 R_1$$

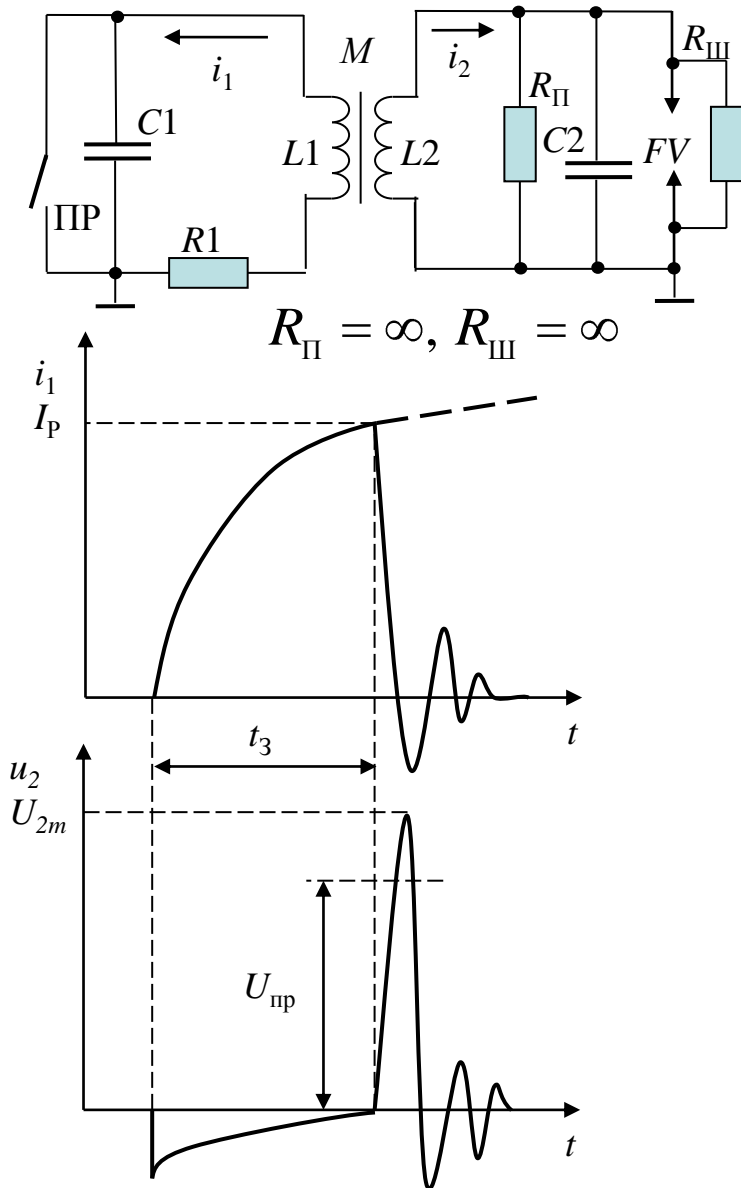
$$W_{EM} = 0,5 L_1 I_p^2 = 0,5 L_1 \left(\frac{U_B}{R_1} \right)^2 \left[1 - 2 \exp(-a) + \exp(-2a) \right]$$

$$T = t_3 + t_p = \frac{120}{z_{\text{ц}} n}$$

$$a = t_3 R_1 / L_1 = 1,256$$

$$L_{1, \text{опт}} = \frac{t_3 R_1}{1,256} = 95,54 \frac{\gamma R_1}{z_{\text{ц}} n}$$

Другой этап рабочего процессу СЗ



$$W_{EM} = 0,5I^2L = 0,5U^2C$$

$$U_{1m} = \frac{U_{2m}}{k_T}$$

$$L_1 I_P^2 = C_1 U_{1m}^2 + C_2 U_{2m}^2$$

$$U_{2m} = I_P k_T \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 k_T^2}} = I_P \sqrt{\frac{L_1}{C_1 1/k_T^2 + C_2}}$$

$$I_P = \frac{U_1}{R_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_1 \cdot 120\gamma}{L_1 z n}\right) \right]$$

$$U_{2m} = \frac{U_B}{R_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{120\gamma R_1}{z L_1 n}\right) \right] \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 k_T^2}}$$

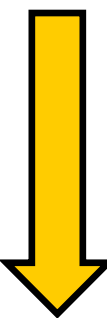
Третій етап робочого процесу

$$R_D = 0, R_0 = 0, G_0 = 0$$

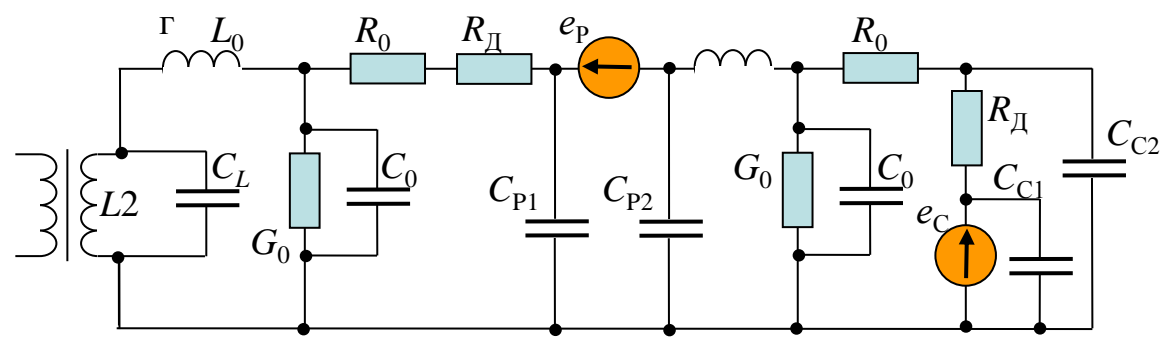
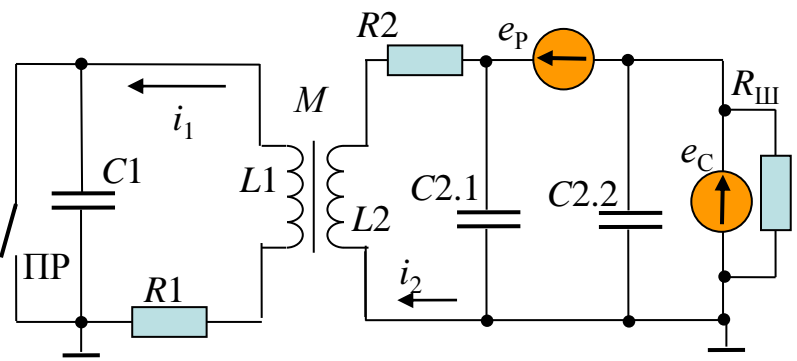
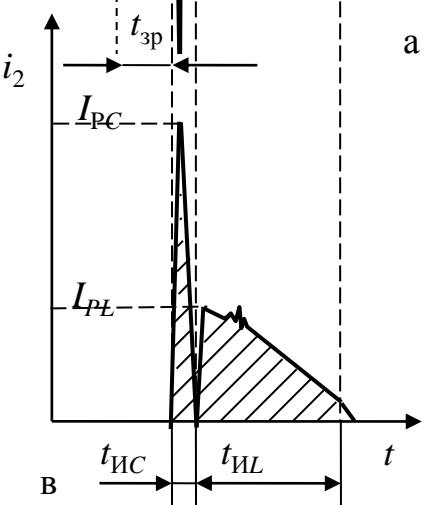
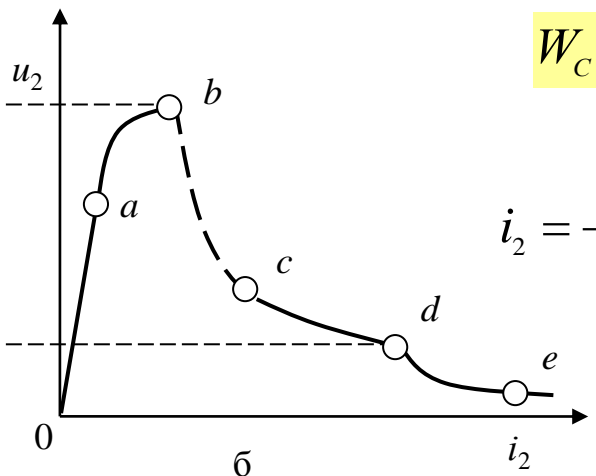
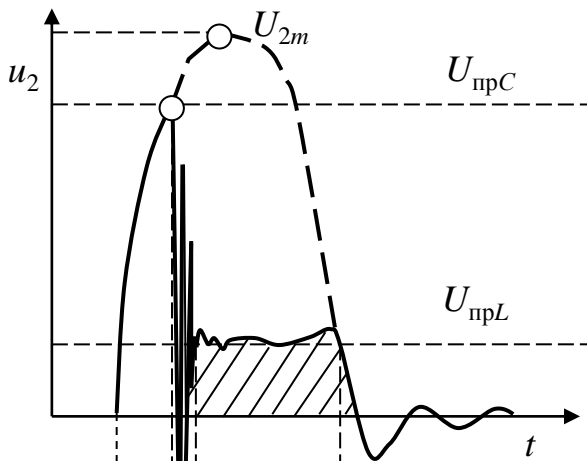
$$W_C = 0,5U_{np.C}^2 (C_L + C_P + C_0 + C_C)$$

$$i_2 = -\frac{U_{PL}}{R_2} + \left(\frac{M}{L_2} I_P + \frac{U_{PL}}{R_2} \right) \exp\left(-t \frac{R_2}{L_2}\right)$$

$$R_{III} = \infty, U_{PL} = const$$



$$t_{IL} = \frac{L_2}{R_2} \cdot \ln \left(\frac{I_P \frac{M}{L_2} + \frac{U_{PL}}{R_2}}{\frac{U_{PL}}{R_2} + I_{2.kp}} \right)$$



$$W_L = \int_0^{t_{IL}} u_2(t) \cdot i_2(t) dt \approx 0,5 U_{PL} I_{PL} t_{IL}$$

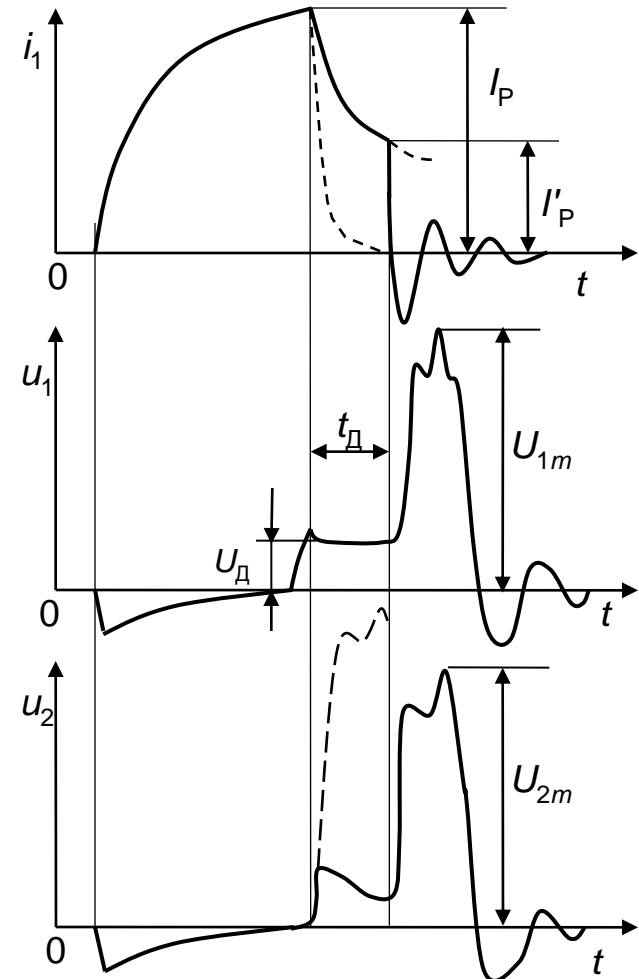
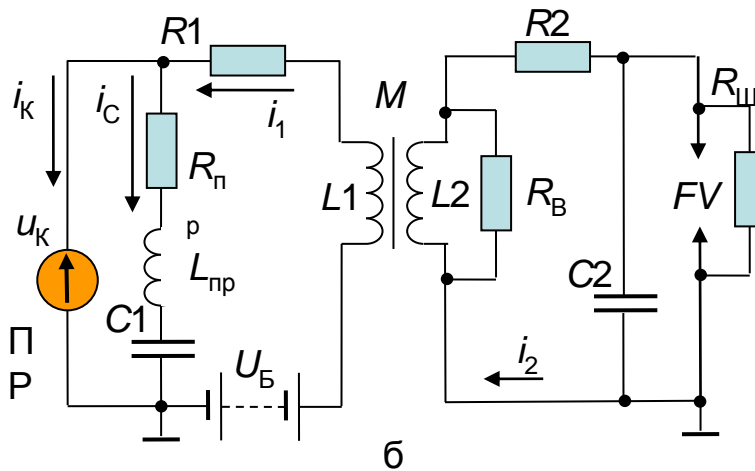
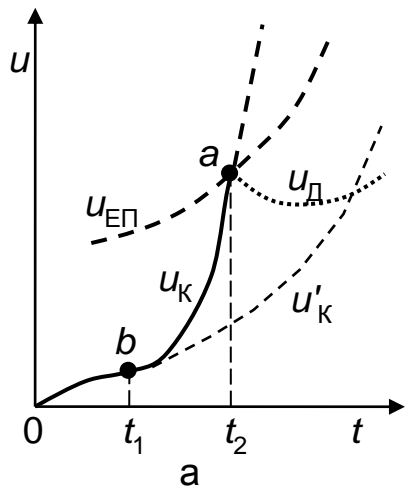
4.2.2. Урахування електромагнітних втрат в СЗ

$$C_e = C_1 + C_2 k_T^2 \quad \eta = \exp\left(-\frac{\arctg \sqrt{4R_e^2 C_e / L_1 - 1}}{\sqrt{4R_e^2 C_e / L_1 - 1}}\right)$$

$$t_D = \frac{L_1}{R_1} \ln \left(\frac{I_P + U_D - U_B / R_1}{I'_P + U_D - U_B / R_1} \right)$$

$$R_e = R_B R_{III} / [k_T^2 (R_B + R_{III})] \quad U_{2m} = I_P k_T \eta \sqrt{\frac{L_1}{C_e}}$$

$$U_2(t) = e_2(t) = -M \frac{R_1}{L_1} \left(I_P + \frac{U_D - U_B}{R_1} \right) \exp -tR_1 / L_1$$



$$\Delta W_D = 0,5 L_1 I_P^2 - I'_P^2$$

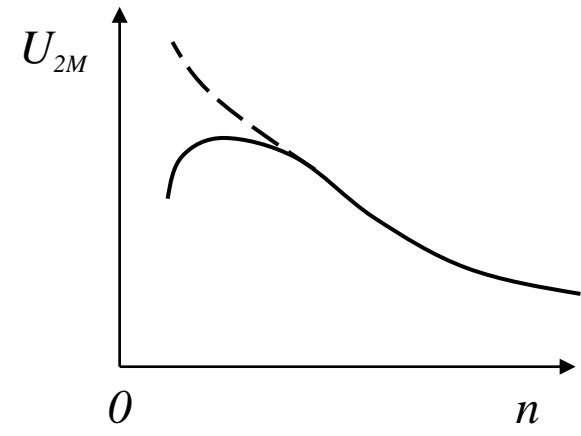
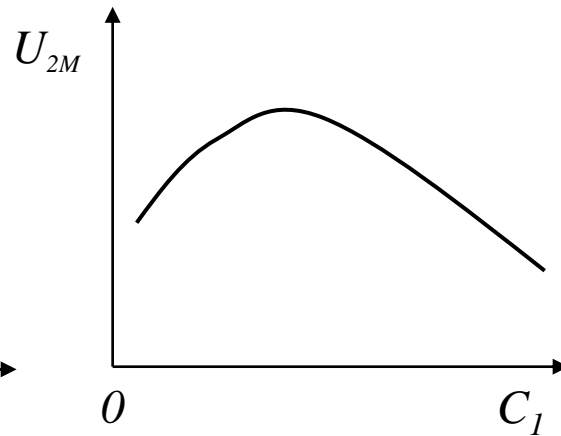
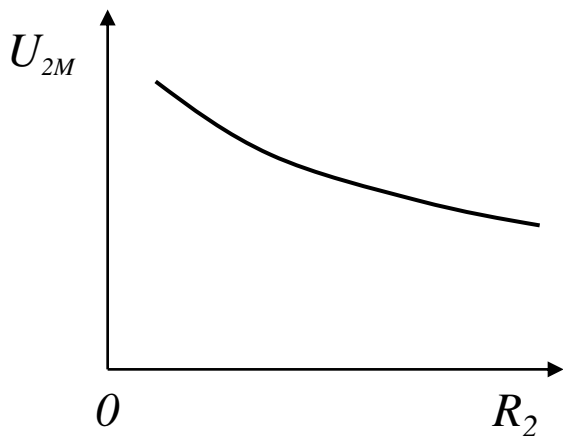
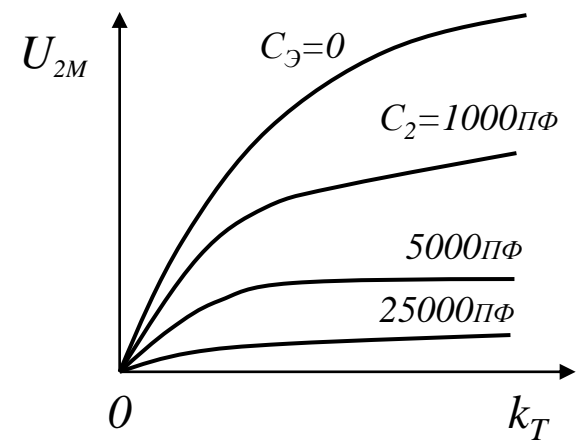
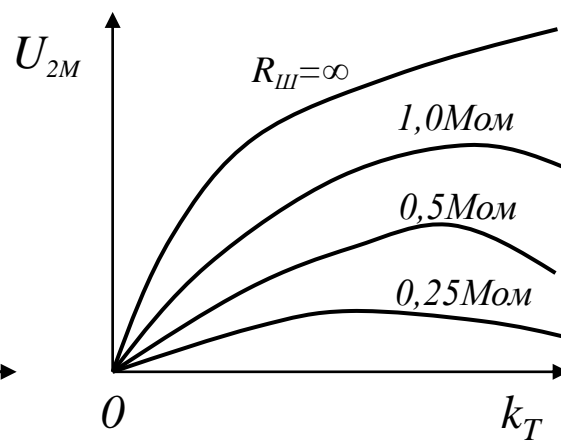
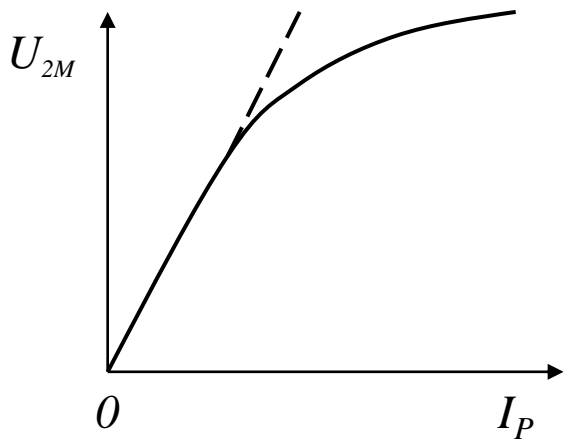
$$W_P = \frac{\delta_P W_L + W_C}{\delta_P + \delta_C}$$

Вплив параметрів СЗ на рівень вторинної напруги

$$U_{2m} = \frac{U_B}{R_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{120\gamma R_1}{zL_1 n}\right) \right] k_L k_D k_T \eta \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 k_T^2}}$$

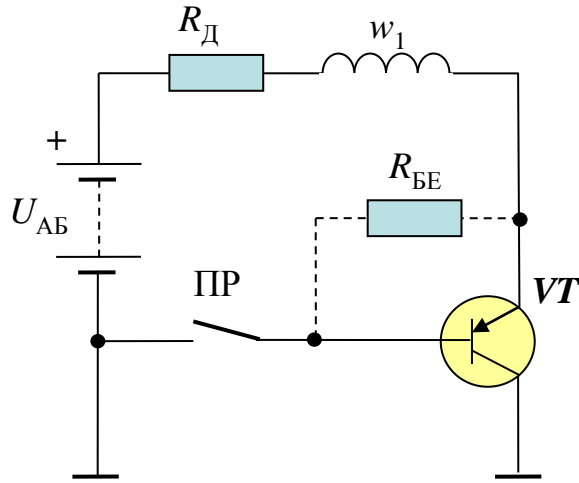
$$L_2 C_2 / L_1 C_1 = 1 / (1 - k_L^2)$$

$$(U_{2m})_{\max} = I_P \sqrt{L_1 / C_2}$$



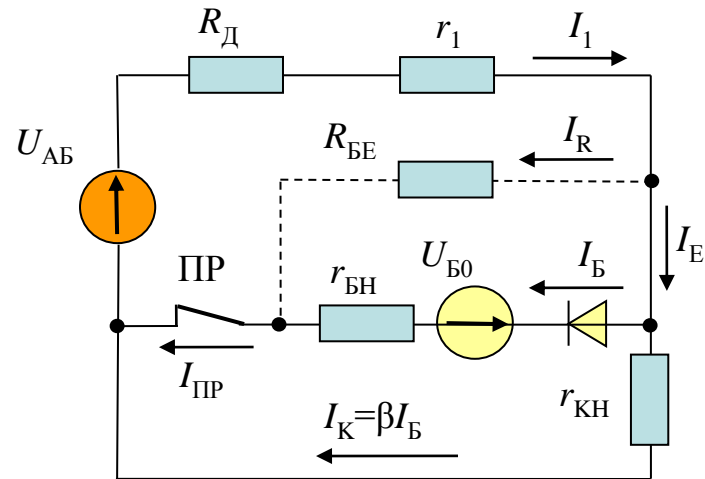
4.2.3. Аналіз процесів у колах транзисторної системи

Перший етап робочого циклу



$$I_E = \frac{U_{AB}}{R_D + r_1 + r_{KH}} \left(1 + \frac{1}{\beta_C} \right)$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta_C + 1}$$



$$I_K = I_E - I_B$$

$$I_{IP} = I_B + I_R = I_B + \frac{U_{BE}}{R_{BE}} = I_B + \frac{U_{B0} + I_B r_{BH}}{R_{BE}}$$

$$I_1 = I_E + I_R = I_E + \frac{U_{B0} + I_B r_{BH}}{R_{BE}}$$

$$K_I = \frac{I_1}{I_{IP}}$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_{AB} - U_{BE}}{I_E + I_R}$$

$$e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} = -U_B \exp\left(-t \frac{R_1}{L_1}\right)$$

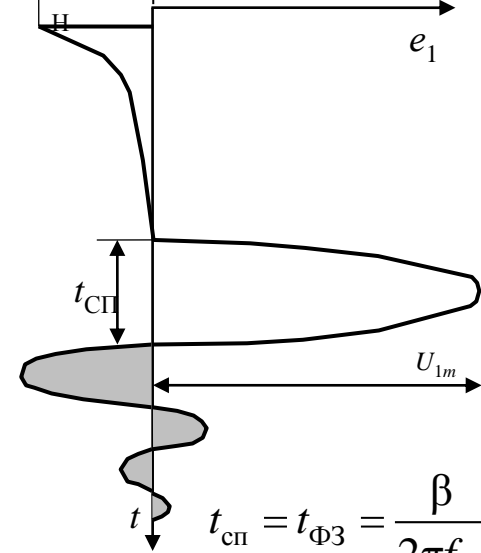
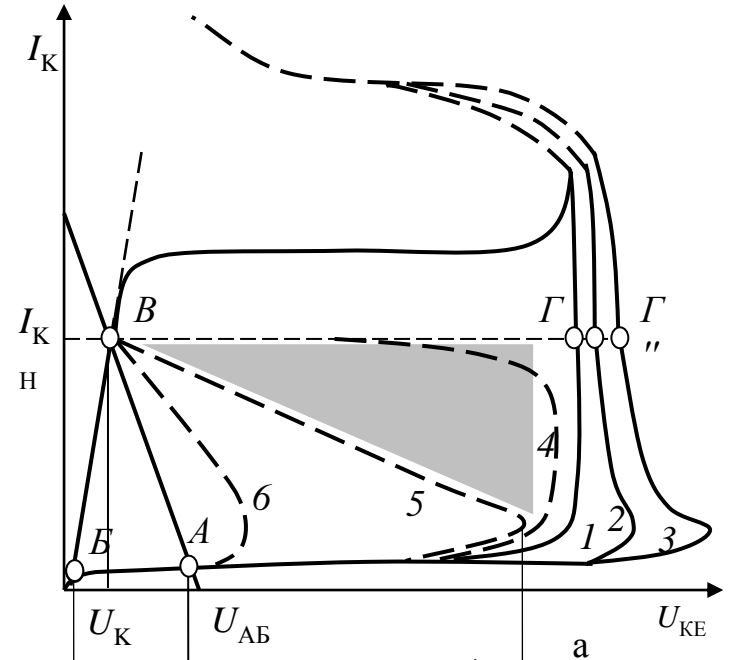
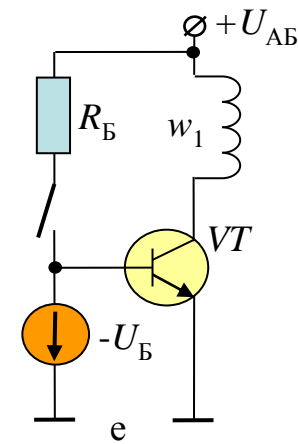
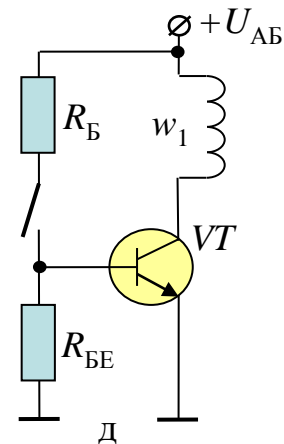
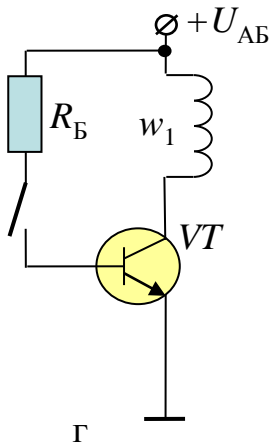
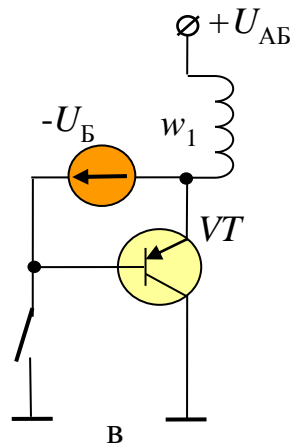
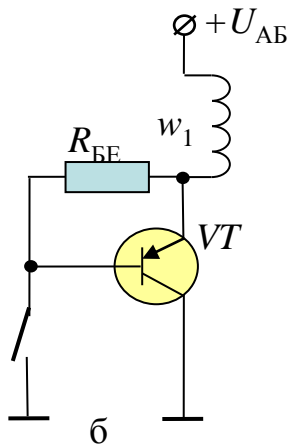
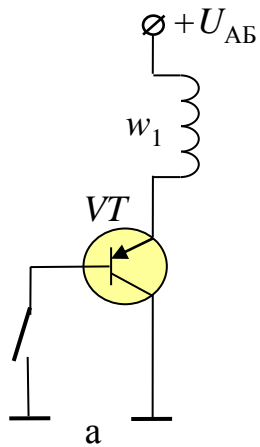
$$i_1 = I_1 \left[1 - \exp\left(-t \frac{R_1}{L_1}\right) \right]$$

Другой этап рабочего цикла в транзисторных СЗ

$$R_1 = R_{\text{Д}} + r_{w_1} + r_{\text{КН}}$$

$$I_{\text{P}} = \frac{U_1}{R_1} \left[1 - \exp\left(-t_3 \frac{R_1}{L_1}\right) \right]$$

$$U_{1m} = \frac{U_{2m}}{k_T} = I_{\text{P}} \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 k_T}}$$

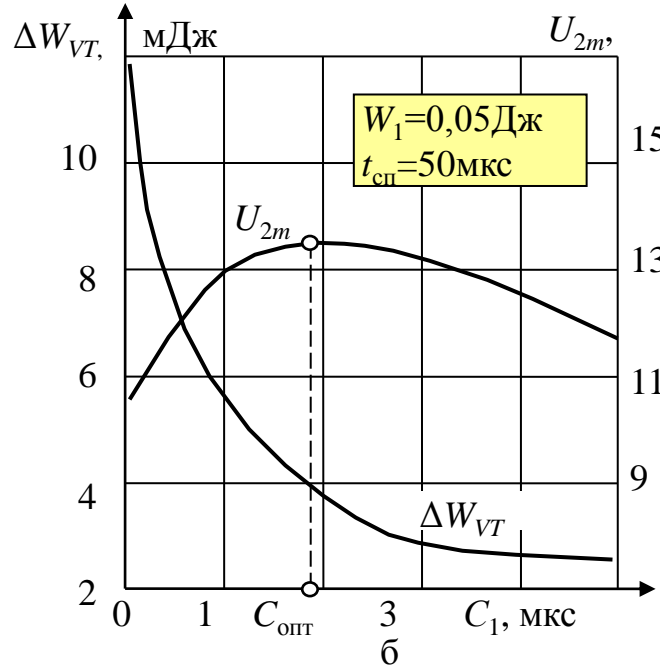
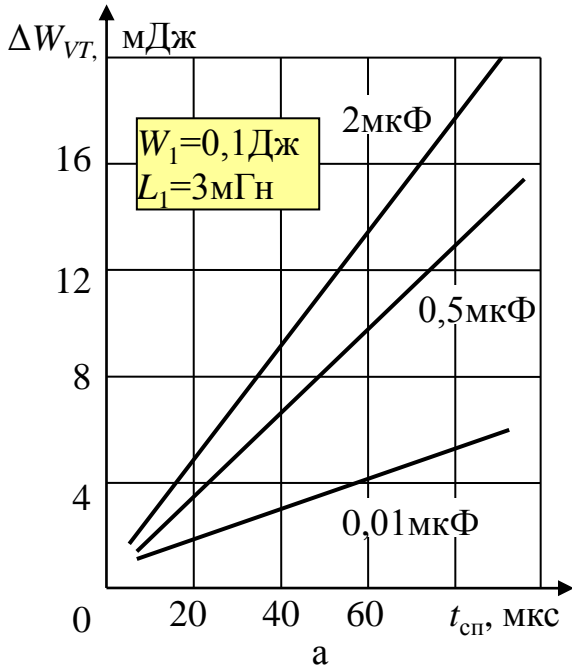


$$t_{\text{СП}} = t_{\Phi 3} = \frac{\beta}{2\pi f_{\text{гр}}} \cdot \ln\left(\frac{I_{\text{БН}} - I_{\text{БР}}}{I_{\text{БР}}}\right)$$

Реалізація транзисторних комутаторів

Результати експериментальних досліджень

Вимоги до комутаторів



- $I_{max} > I_{P.max}$
- $U_{max} > U_{1m}$
- $t_{\Phi 3} \rightarrow \min$
- $\Delta P \rightarrow \min$
- $\Delta t^o \rightarrow \max$
- $\Delta n_{ДВЗ} \rightarrow \max$
- $\Delta U_{Ж} \rightarrow \max$
- $I_{K.max}$
- $U_{KE.max}$
- $f_{гр} \quad t_{сп}$
- $\sum \Delta W_{VT}$
- $\pm t_{max}^o$
- L_1, C_1
- $W_1 \quad I_P$

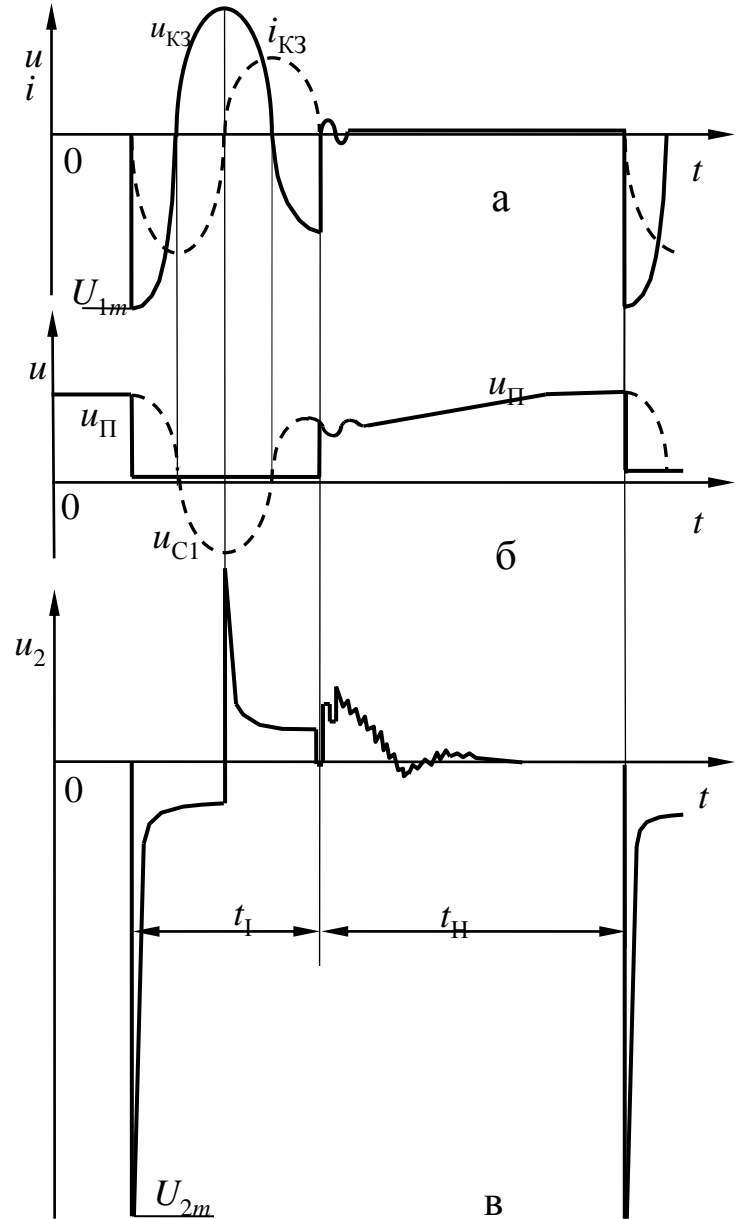
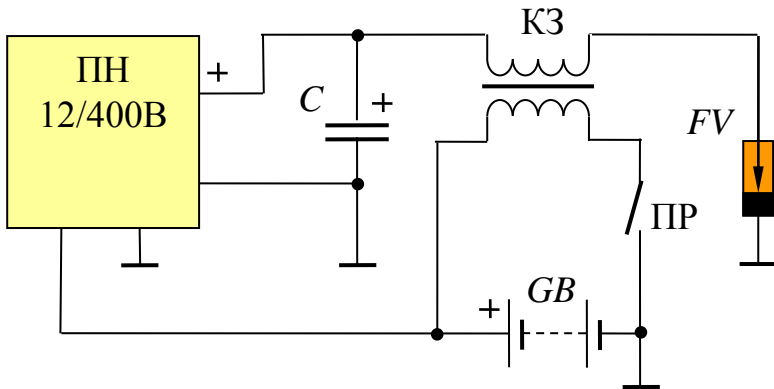
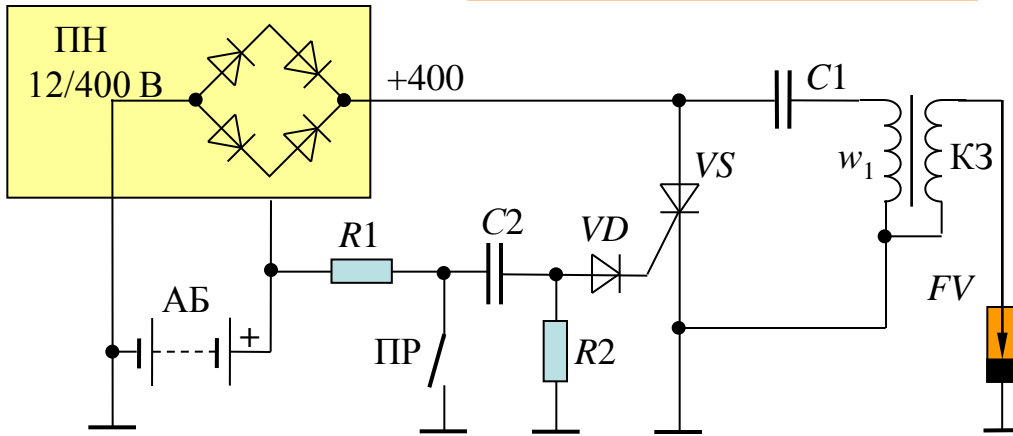
$$\Delta W_{VT} = \int_0^{t_{сп}} u_{BE} i_{i_B} u dt + \int_0^{t_{сп}} u_{KB} i_{i_K} u dt \approx \int_0^{t_{сп}} u_{KE} i_{i_E} u dt$$

$$t_{сп} = t_{\Phi 3} = \frac{\beta}{2\pi f_{гр}} \cdot \ln \left(\frac{I_{BH} - I_{BP}}{I_{BP}} \right)$$

$$\Delta W_{VT} = f \quad t_{сп} \rightarrow ВЧ \quad f_{гр} \quad VT$$

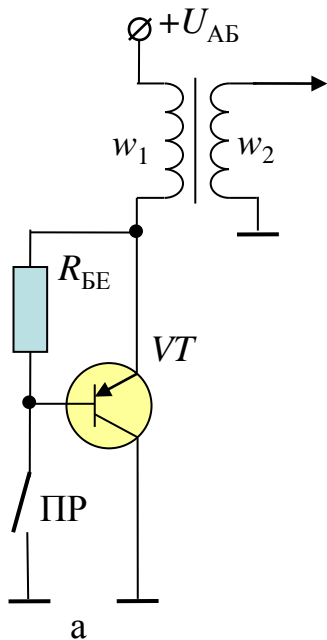
4.2.4. Робочий цикл в СЗ з накопиченням в ємності

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt$$



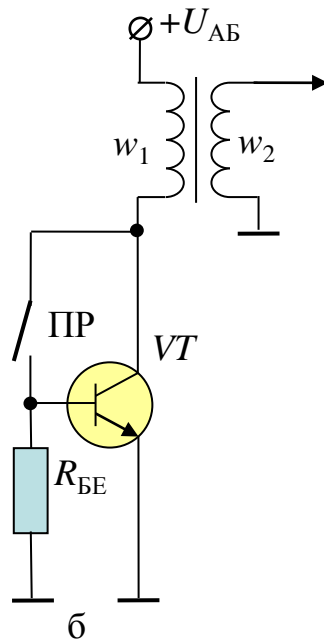
Матеріал	$t C \max$	$U_{ке \max}$	$\beta(-t C)$	$r_{кн}$	C	\perp
Германієві	-	-	+	+	+	+
Кремнієві	+	+	-	-	-	-

Реалізація контактної-транзисторної СЗ



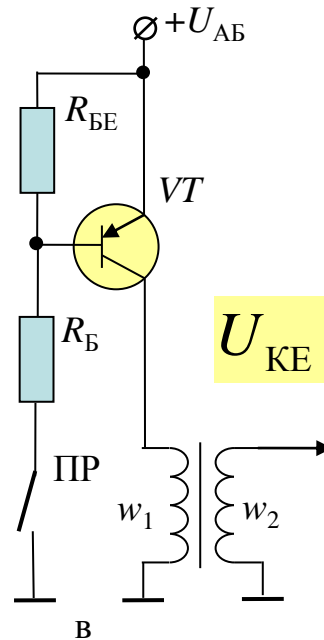
$$I_1 = I_K + I_B + I_{BE}$$

$$U_{ПП} = U_{AB} + U_{1m}$$



$$I_1 = I_K$$

$$U_{ПП} = U_{AB}$$

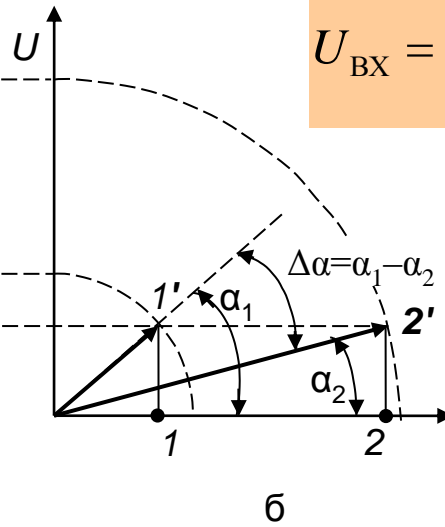
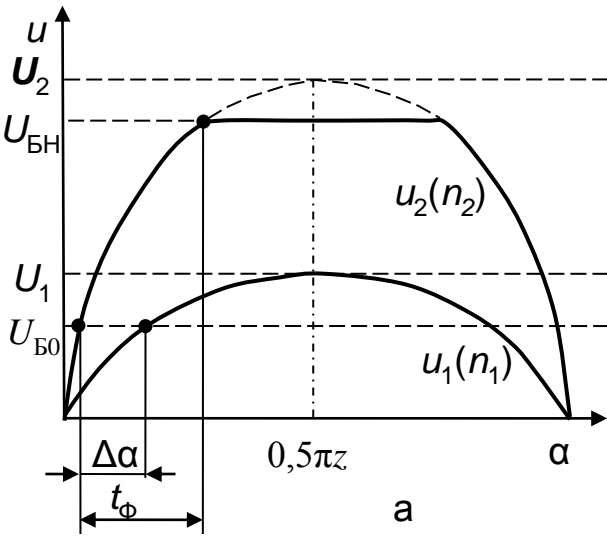


$$R_{BE} = \frac{U_{B0}}{2I_{K0}}$$

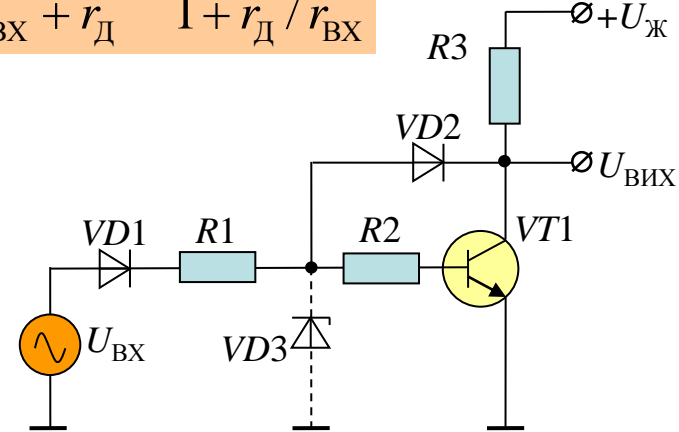
$$U_{KE} = U_{2m} / k_T + U_{AB} < U_{KE.max}$$

$$k_T = \frac{U_{2m \max}}{U_{KE.max} - U_{AB}}$$

4.3.2. Оцінка параметрів сигнала датчика СЗ



$$U_{\text{ВХ}} = r_{\text{ВХ}} \frac{C_{\text{Д}} n_{\text{Д}}}{r_{\text{ВХ}} + r_{\text{Д}}} = \frac{C_{\text{Д}} n_{\text{Д}}}{1 + r_{\text{Д}} / r_{\text{ВХ}}}$$



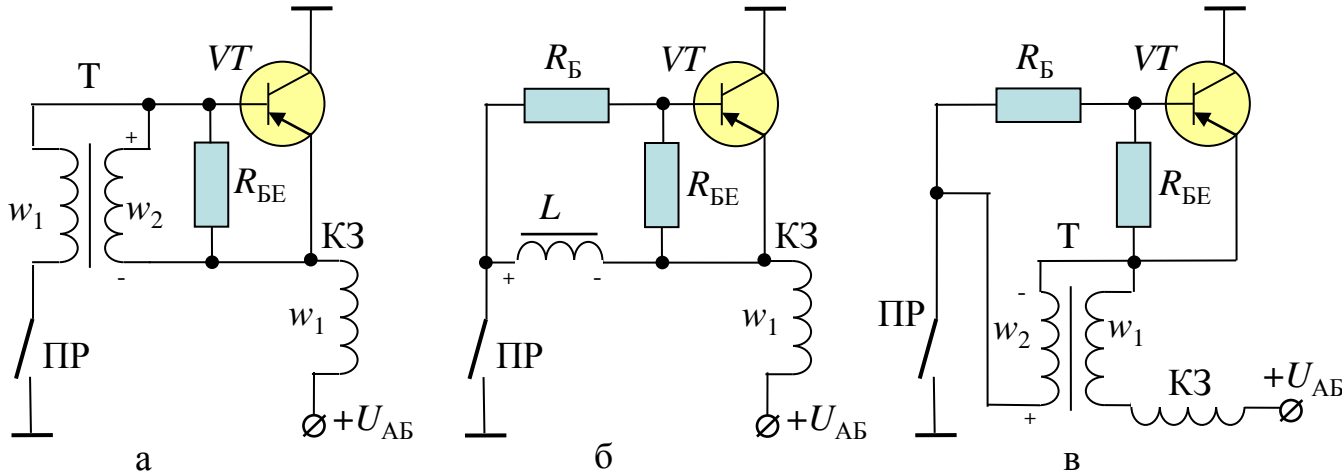
$$\Delta\alpha = \arcsin \frac{U_{\text{Б0}}}{U_1} - \arcsin \frac{U_{\text{Б0}}}{U_2} = \arcsin \left[\frac{U_{\text{Б0}} (U_2 - U_1)}{U_1 U_2} \right] \longrightarrow \Delta\alpha = \arcsin \left[\frac{U_{\text{Б0}} (n_2 - n_1) \cdot (1 + r_{\text{Д}} / r_{\text{ВХ}})}{C_{\text{Д}} n_1 n_2} \right]$$

$$\alpha_{\text{СЗ}} n = \alpha_{\text{АВ}} n - \alpha_{\text{Д}} n = \alpha_{\text{АВ}} n - \arcsin \left[\frac{U_{\text{Б0}} (1 + r_{\text{Д}} / r_{\text{ВХ}})}{n k_{\text{ПД}} C_{\text{Д}}} \right]$$

$$\omega = \pi z_{\text{Ц}} n_{\text{Д}} / 30$$

$$t_{\Phi}(n_{\text{Д}}) = \frac{30}{\pi z n_{\text{Д}}} \arcsin \left[\frac{U_{\text{БН}} - U_{\text{Б0}} \cdot (1 + r_{\text{Д}} / r_{\text{ВХ}})}{C_{\text{Д}} n_{\text{Д}}} \right] \longleftarrow U_{\text{БН}} - U_{\text{Б0}} \approx U_2 \sin(\omega t_{\Phi})$$

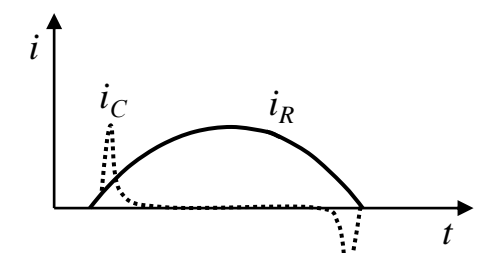
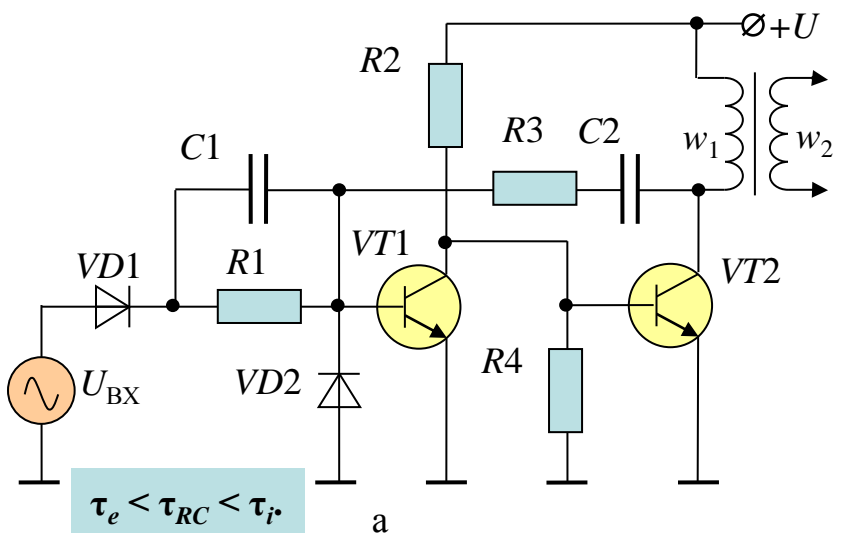
4.3.3. Способи підвищення швидкодії виконавчого транзистора СЗ



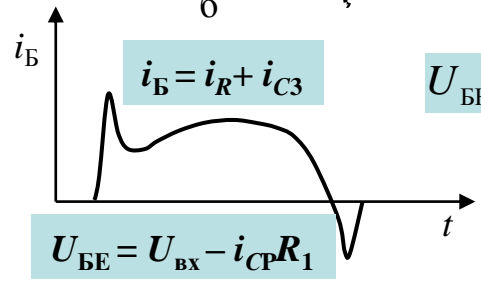
$$\tau_{RC} = RC$$

$$C_1 \leq \frac{\tau_i}{3 r_D + r_{BX}}$$

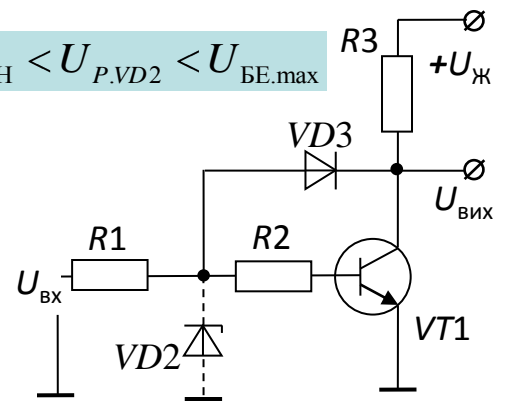
$$C_1 \geq \frac{\tau_e}{r_D + r_{BX}}$$



$$I_{CT.max} > U_{BX.max} - U_{P.VD2} / R_1$$



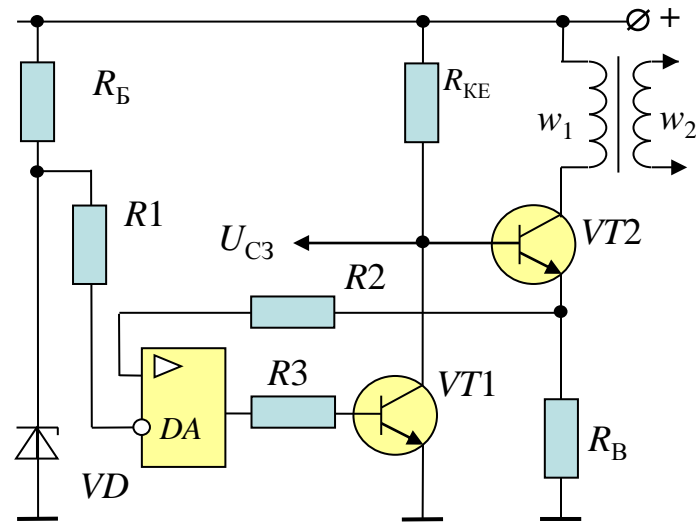
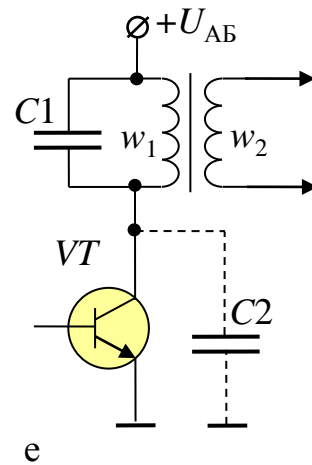
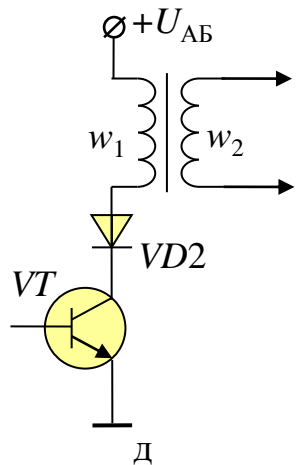
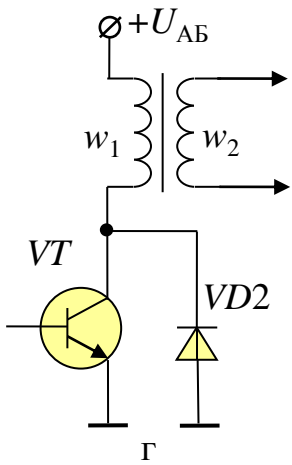
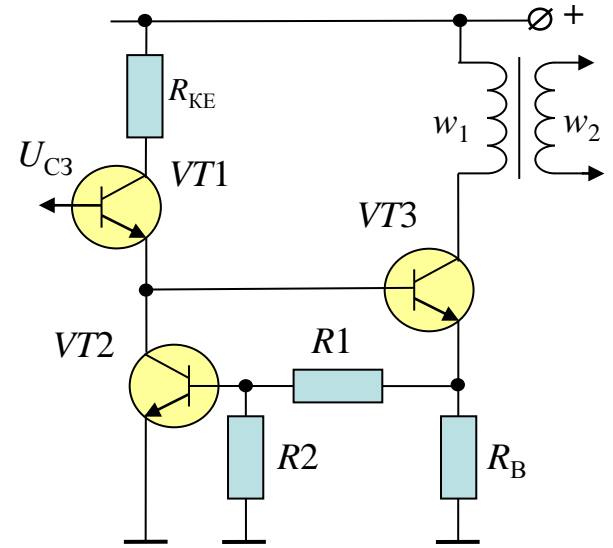
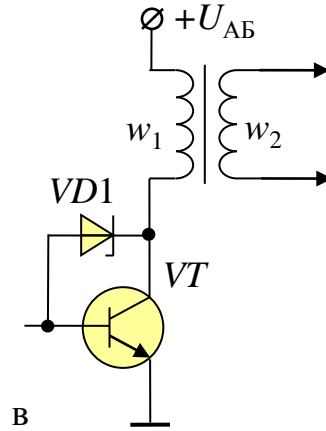
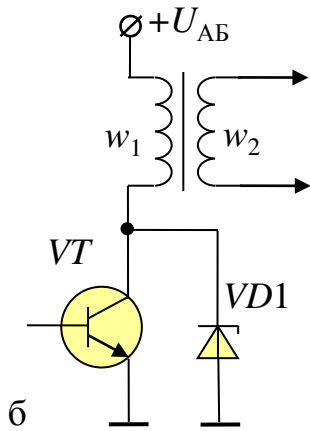
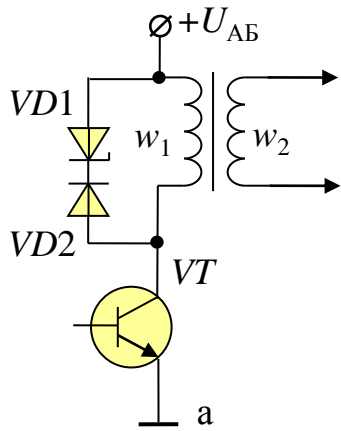
$$U_{BH} < U_{P.VD2} < U_{BE.max}$$



одновібратор, компаратор, тригер

$$\tau_e < \tau_{RC} < \tau_i$$

4.3.4. Захист та стабілізація режиму виконавчого транзистора СЗ



$$U_{cr} = U_{KE,max} - U_D - U_{AB}$$

$$U_{cm} = U_{KE,max}$$

$$U_{cr} = U_{KE,max} - U_{B0}$$

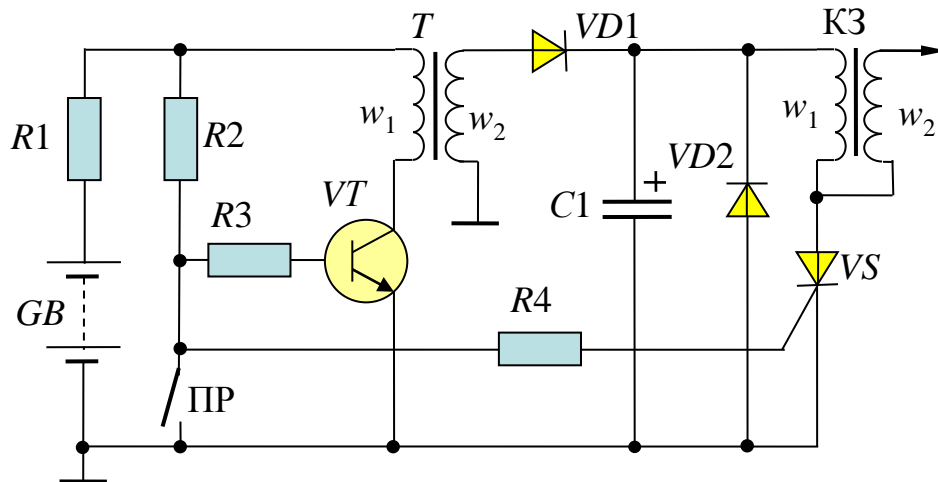
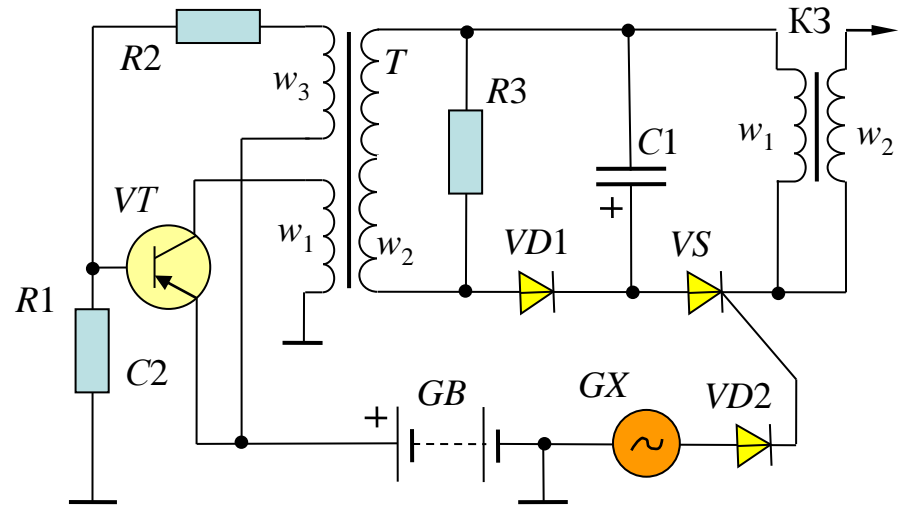
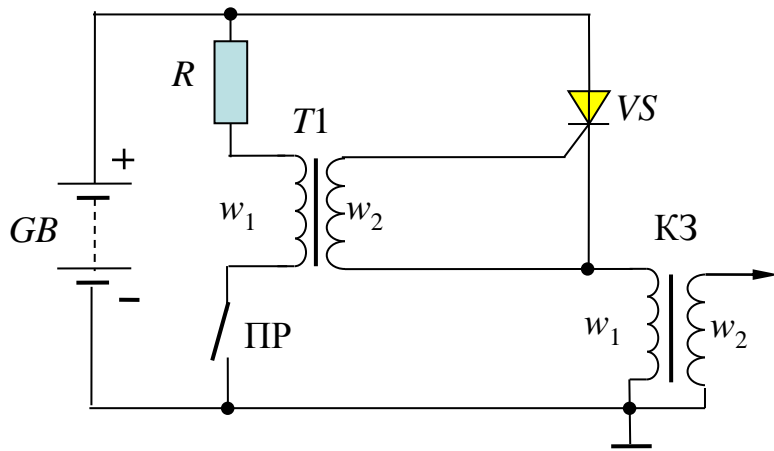
$$U_{1m} = \frac{2I_P}{t_{сп} C_1}$$



$$C_1 = \frac{2I_P}{t_{сп} U_{II}}$$

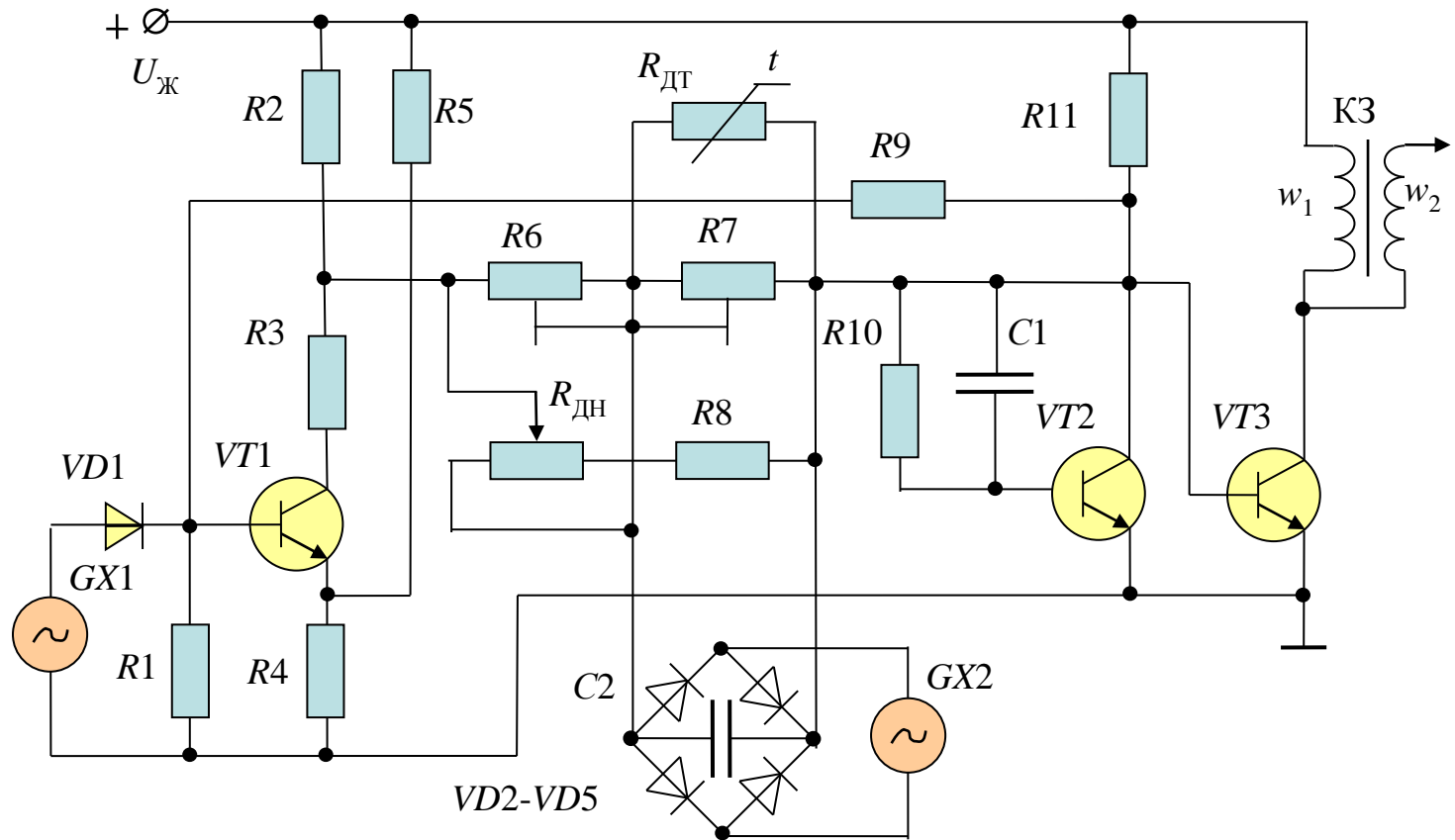
Тема 4.4

4.4.1. Застосування тиристорної комутації струму

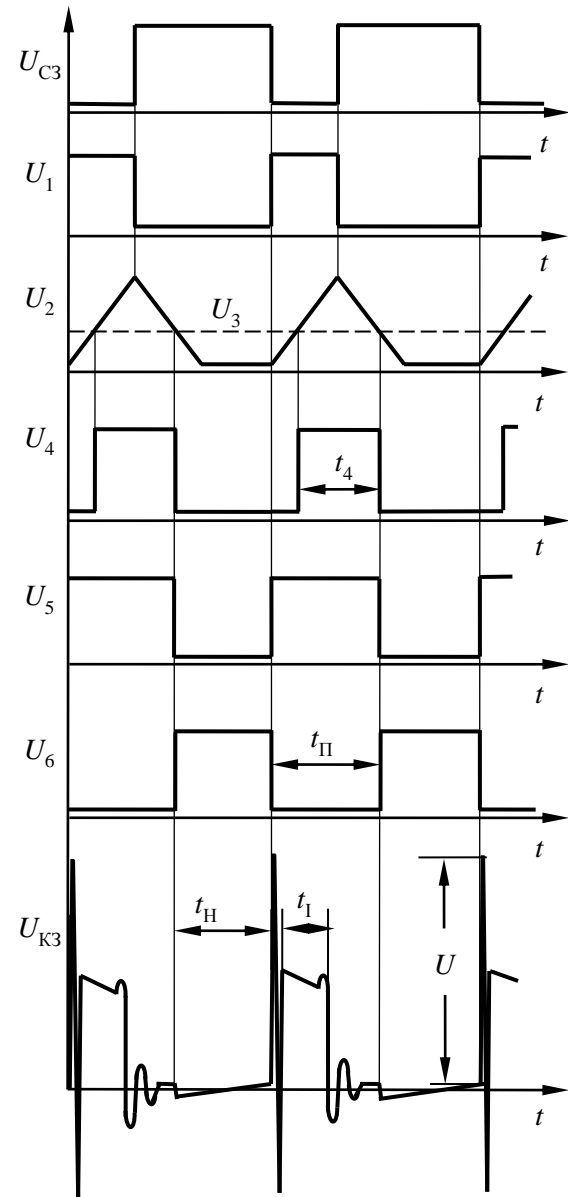
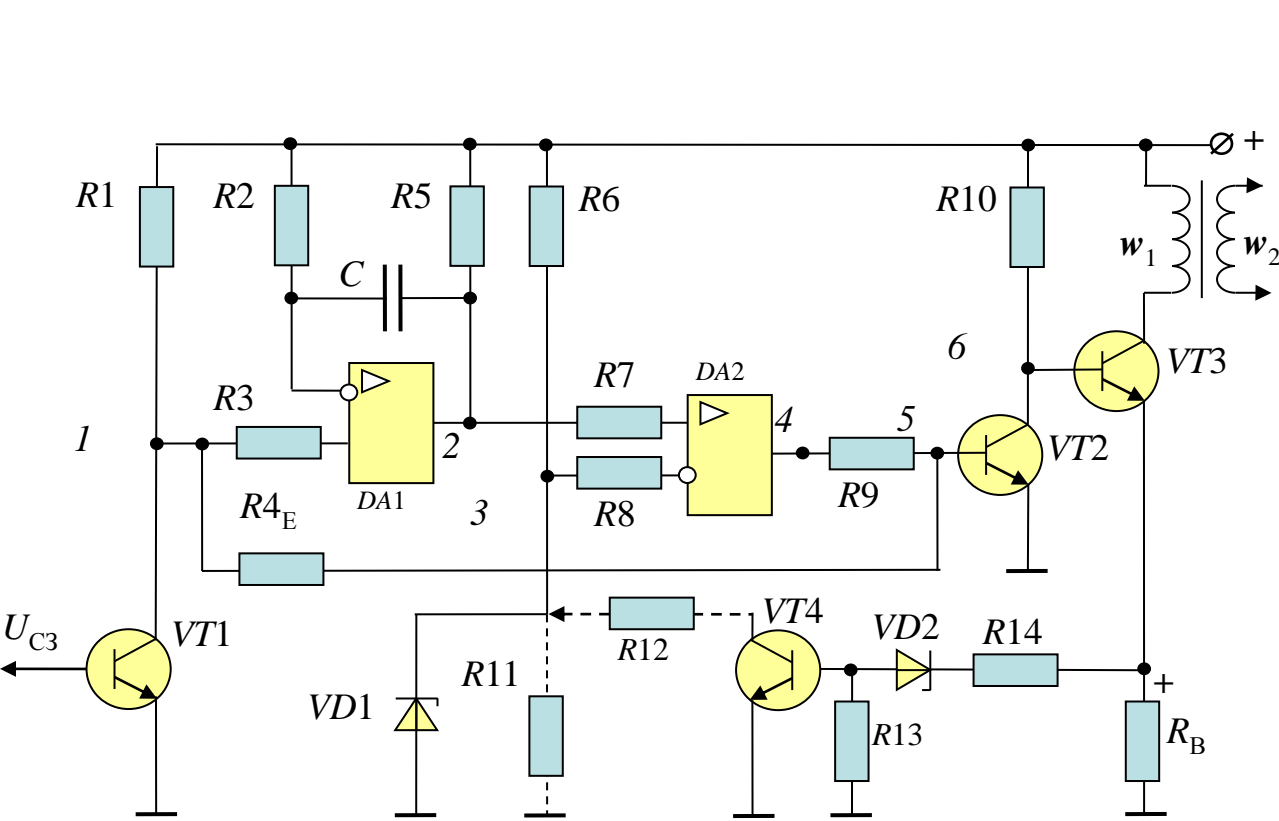


4.4.2. Електронне керування моментом запалювання

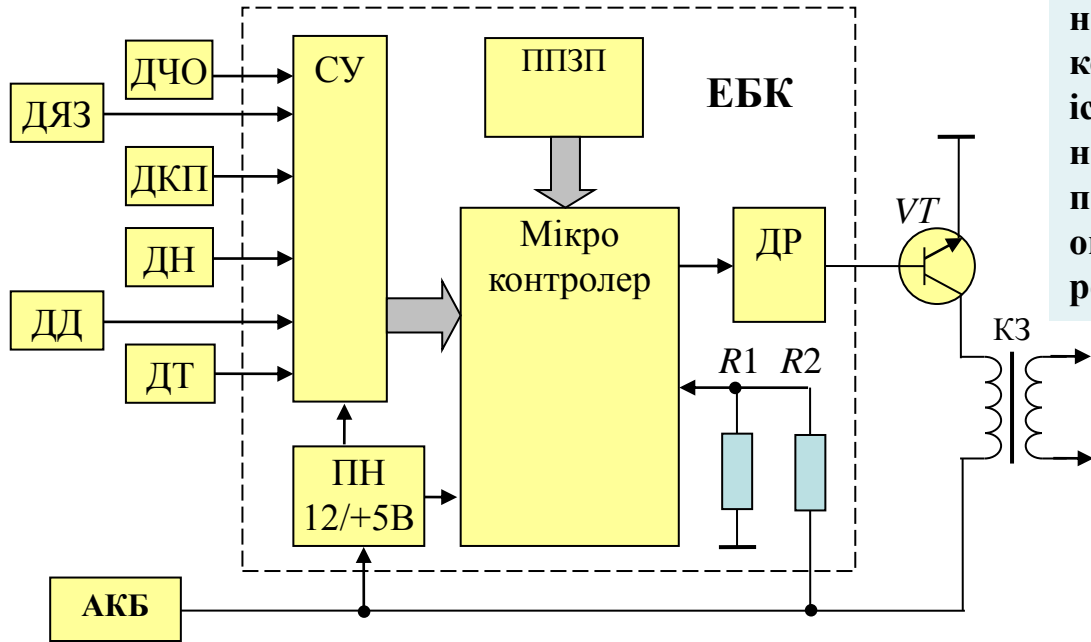
Електронний автомат випередження запалювання



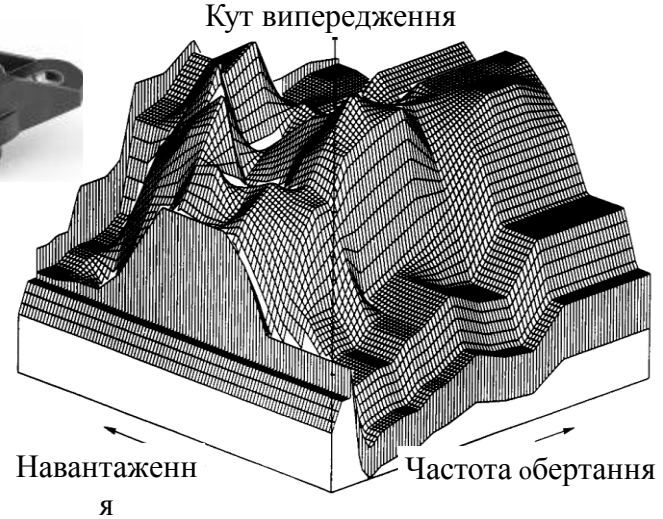
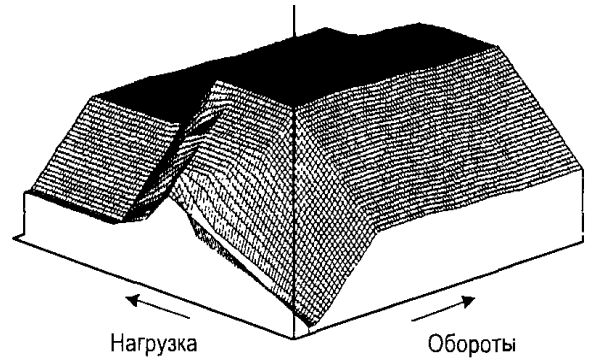
4.4.3. Нормування часу накопичення енергії



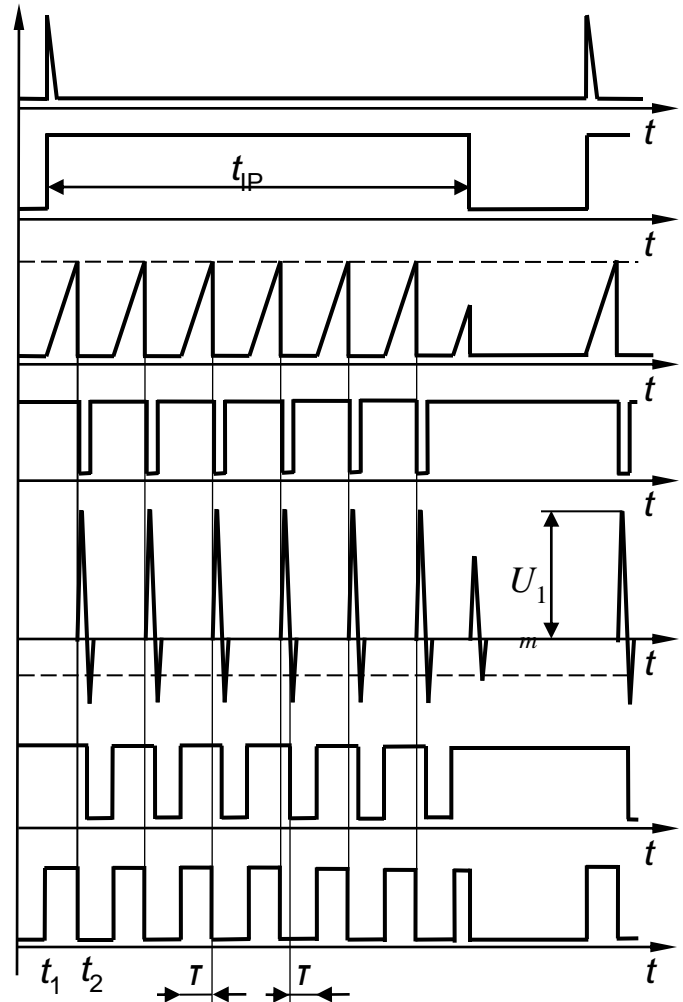
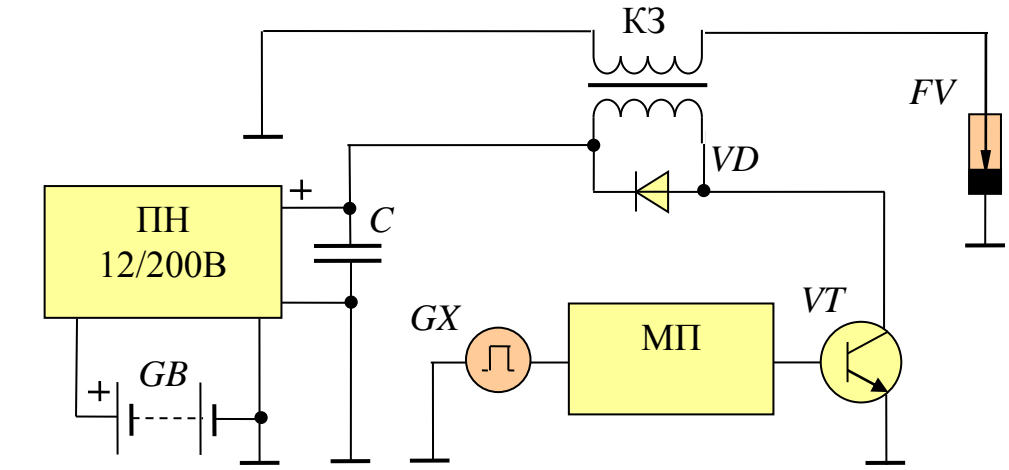
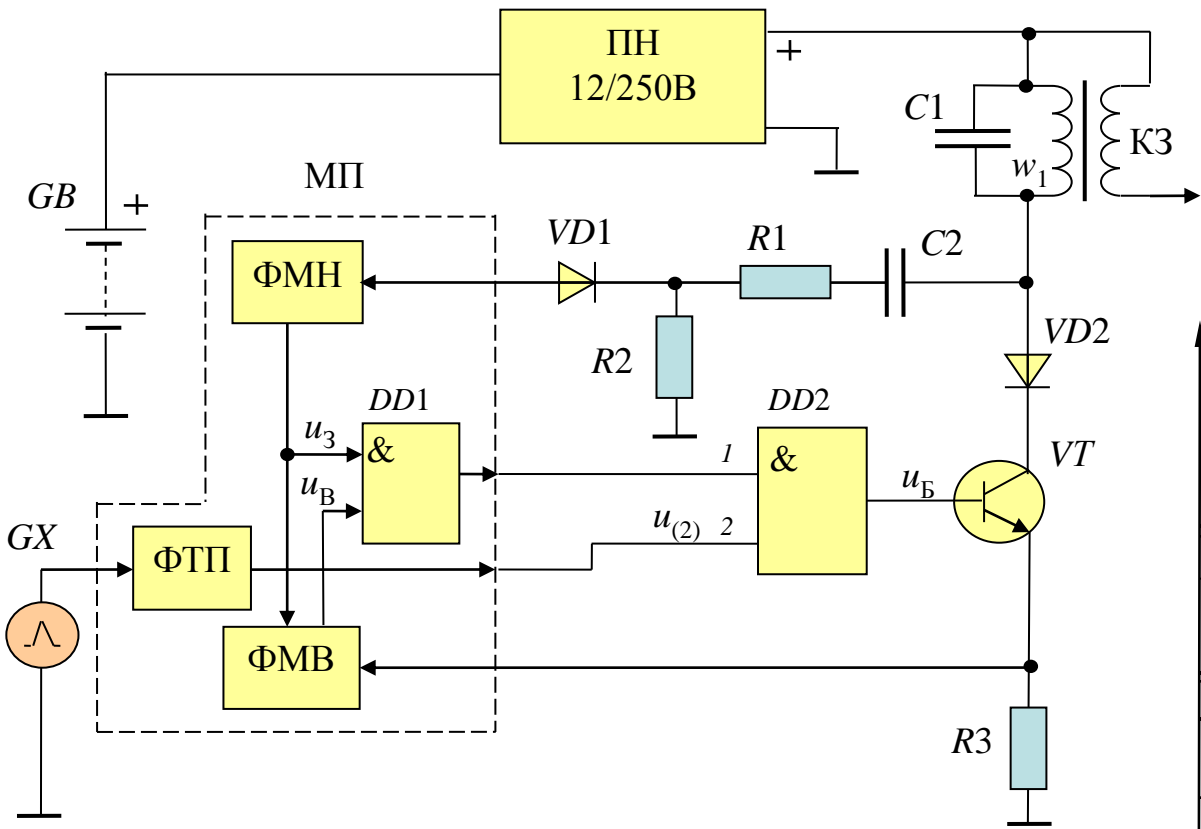
4.4.4. Оптимізація параметрів на мікропроцесорному рівні



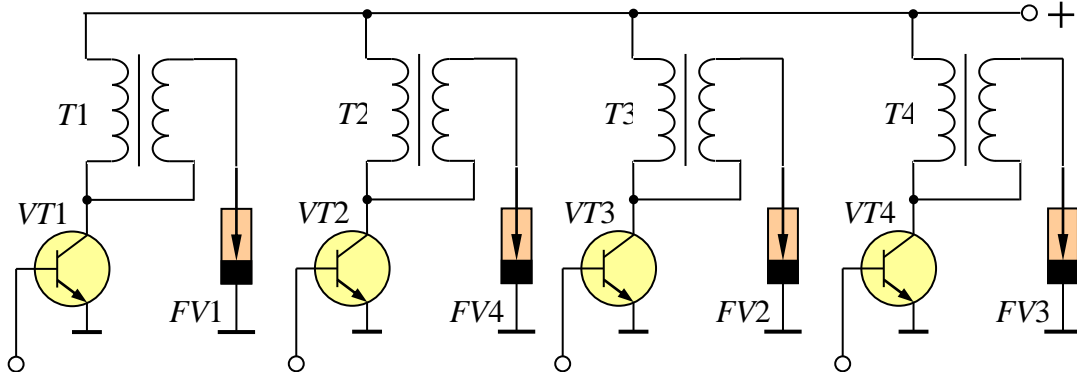
оптимізація моменту запалювання;
нормування часу накопичення енергії;
керування параметрами та структурою іскрового розряду;
низьковольтний розподіл запалювання по циліндрах;
оптимізації кількості робочих циліндрів.
реалізація адаптаційних алгоритмів



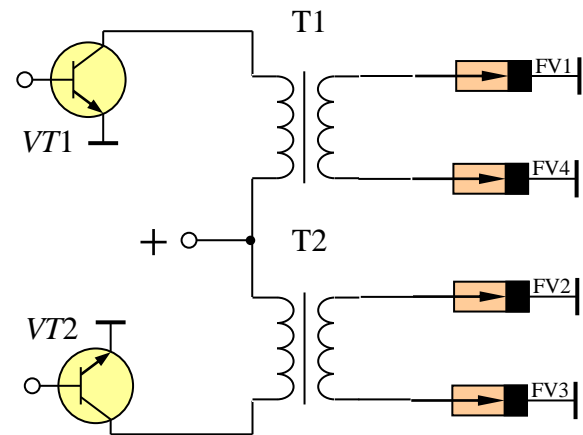
Багато іскрові системи запалювання



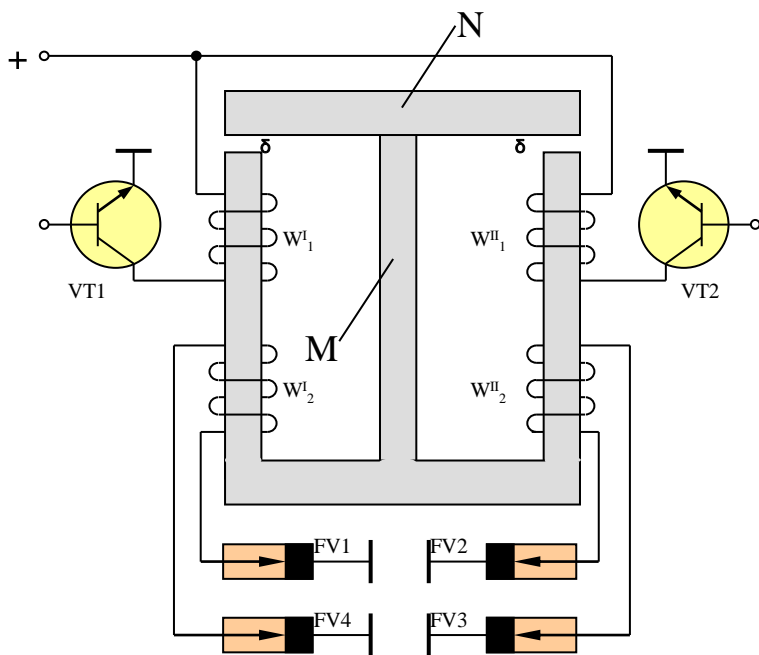
4.4.5. Застосування статичного розподілу вторинної напруги



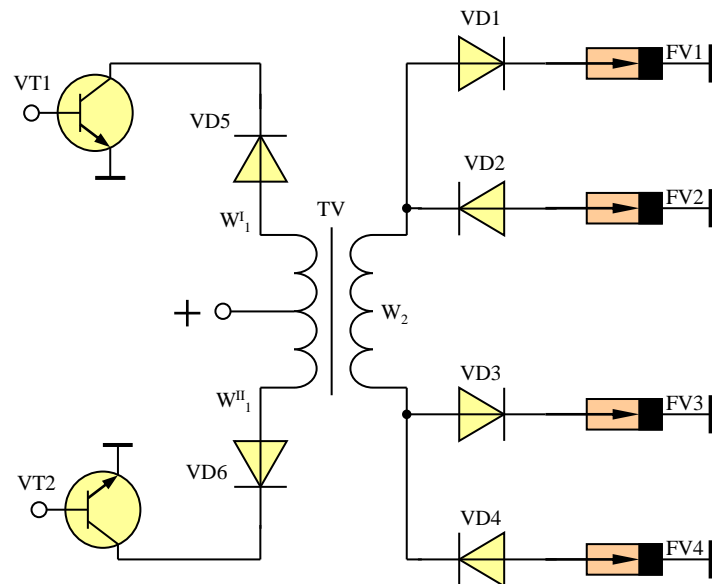
Система з автономними котушками запалювання



Система з "холостою" іскрою



Чотирьох вивідна КЗ з двома повітряними зазорами



Чотирьох вивідна КЗ з діодною розв'язкою