

4.2. Моделювання фізичних процесів в колах системи запалювання

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

Дослідження процесів у колах системи запалювання за допомогою математичних моделей на етапі попереднього проектування (вирішення задачі з незамкненими умовами) проводяться з метою оптимізації її структурних параметрів. На етапі перевірного розрахунку (вирішення прямої задачі з замкненими умовами) результати моделювання дозволяють визначити робочі характеристики системи, яка проектується.

Під ідеалізованою слід розуміти систему запалювання в якій не враховуються витрати енергії на комутуючому елементі (дугу на контактах переривника, розсіювання потужності на виконавчому транзисторі), іскровому проміжку розподільника, в сталі котушки запалювання та на нагарі свічки.

В робочому циклі системи запалювання розглядають три етапи проходження електромагнітних процесів – процес накопичення електромагнітної енергії, утворення ЕРС високої напруги, пробій іскрового проміжку.

Перший етап відбувається в період замкненого стану t_3 комутуючого елементу (контактів переривника, відчиненого транзистору або тиристорю). В період підключення первинної обмотки котушки запалювання до джерела напруги (АКБ) відбувається зростання первинного струму i_1 й накопичення електромагнітної енергії в полі котушки запалювання. На цьому етапі вторинне коло практично не впливає на процес зростання первинного струму й при розрахунках його можна вважати розімкнутим, а конденсатор первинного кола замкнутим через контакти переривника (рис. 4.2.1, а).

Процес зростання струму в первинному колі системи (рис. 4.2.1, б) описується диференціальним рівнянням (1.52) яке має рішення відносно миттєвого значення струму i_1 (1.53). У вторинній обмотці котушки запалювання, на цей період, індукується ЕРС взаємодукції (рис. 4.2.1, г)

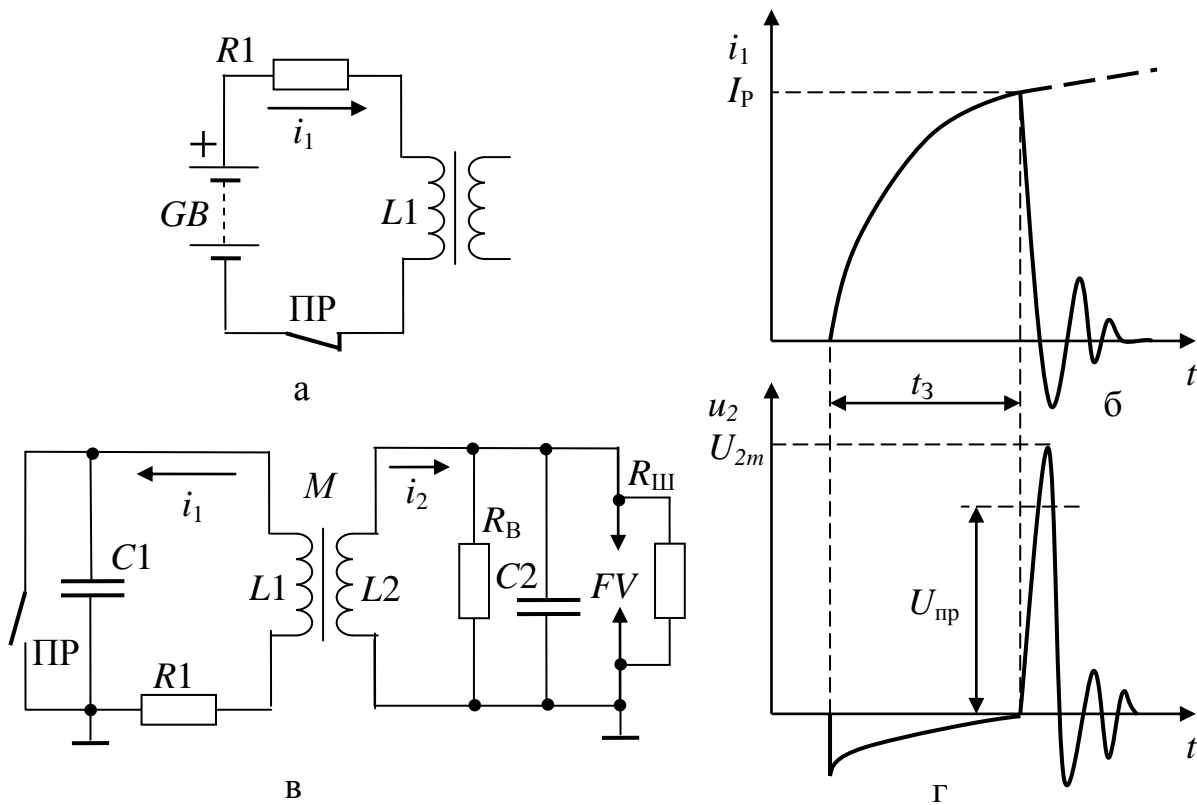


Рис. 4.2.1. Процес накопичення енергії в котушці запалювання та утворення ЕРС високої напруги: а, в – схеми заміщення; б, г – часові діаграми

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt} = -\frac{M}{L_1} U_{AB} \exp\left(-t \frac{R_1}{L_1}\right), \quad (4.2.1)$$

де $M=L_1k_T$ – взаємоіндукція між обмотками;

k_T – коефіцієнт трансформації котушки запалювання.

До моменту розмикання контактів, величина струму розриву визначається часом замкнутого стану контактів переривника t_3 .

$$I_p = \frac{U_{AB}}{R_1} \left[1 - \exp\left(-t_3 \frac{R_1}{L_1}\right) \right] = \frac{U_{AB}}{R_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_1 \cdot 120\gamma_3}{L_1 z_{ц} n}\right) \right], \quad (4.2.2)$$

де n - частота обертання колінчастого вала;

$z_{ц}$ - число циліндрів ДВЗ;

$$\gamma_3 = \frac{t_3}{(t_3 + t_p)} = \frac{\alpha_3}{(\alpha_3 + \alpha_p)} - \text{відносний час (кут) замкнутого стану.}$$

Параметр γ визначається профілем кулачка переривника або конструкцією датчика сигналу запалювання чи алгоритмом нормування часу накопичення (залежно від типу системи).

На основі (1.50) з урахуванням (4.2.2) можна записати формулу для визначення електромагнітної енергії, яка накопичується в магнітному полі котушки запалювання за час t_3 ,

$$W_{EM} = 0,5L_1I_p^2 = 0,5L_1 \left(\frac{U_{AB}}{R_1} \right)^2 (1 - 2\exp(-a) + \exp(-2a)) , \quad (4.2.3)$$

де $a = t_3R_1 / L_1$ - параметр, що характеризує конструкцію та режим первинного кола.

Аналізуючи (4.2.3) можна зазначити, що з одного боку збільшення L_1 веде до підвищення енергії, яка накопичується в ній, з другого – до зменшення енергії за обмежений час зростання струму. Диференціювання виразу (4.2.3) по L_1 дозволяє визначити значення параметра $a=1,256$ при якому одержують найбільшу енергію в первинній обмотці w_1 від джерела постійного струму з напругою U_{AB} [2, 6, 20]. Рішення зворотної задачі дозволяє визначити оптимальне значення індуктивності для визначеної частоти обертання валу ДВЗ

$$L_{1,опт} = \frac{t_3R_1}{1,256} = 95,54 \frac{\gamma_3 R_1}{z_{ц} n} . \quad (4.2.4)$$

Підтримка оптимального значення $L_{1,опт}$ для систем запалювання з жорстким керуванням не можлива, тому що оберти ДВЗ n (та відповідно і час замкненого стану t_3) в процесі експлуатації змінюються в широкому діапазоні. Тому при розрахунках котушок запалювання обирають значення L_1 яке задовольняє максимальним обертам двигуна. При цьому забезпечується працездатність системи запалювання у всьому швидкісному діапазоні. Як наслідок, в діапазоні малих і середніх частот обертання ДВЗ (при більших значеннях t_3) струм у первинному колі системи запалювання досягає сталого значення і нагріває обмотку котушки запалювання й додатковий резистор. Потужність теплових втрат в первинному колі при цьому визначається через середньоквадратичне значення струму (1.21)

$$P_1 = I_1^2 R_1, \quad I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_3} [i_1 \ t]^2 dt}, \quad (4.2.5)$$

де $T = t_3 + t_p = \frac{120}{z_{\text{ц}} n}$ - період циклу переривника.

Враховуючи, що струм первинного кола при заданих обертах ДВЗ досягає значень розриву (4.2.2), потужність теплових втрат можна визначити через параметри первинного кола системи запалювання та швидкісний режим ДВЗ

$$P_1 n = \frac{\gamma_3 U_{\text{AB}}^2}{R_1} \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{L_1 z_{\text{ц}} n}{240 R_1 \gamma_3} \left[\exp\left(-\frac{120 \gamma_3 R_1}{z_{\text{ц}} n L_1}\right) - 3 \right] \times \\ \times \left[\exp\left(-\frac{120 \gamma_3 R_1}{z_{\text{ц}} n L_1}\right) - 1 \right] \end{array} \right\}. \quad (4.2.6)$$

Нагрівання котушки запалювання поряд з втратами енергії веде до погіршення її діелектричної стійкості, надійності та довговічності. Щоб уникнути цих недоліків, згідно (4.2.6) треба підвищувати активну складову R_1 , або нормувати час накопичення енергії за рахунок зміни шпаруватості γ_3 (можливо тільки в електронних системах). На момент розмикання контактів переривника електромагнітна енергія, запасена в котушці, перетворюється в енергію електричного поля ємностей C_1 і C_2 і частково витрачається на тепло. Величину максимальної вторинної напруги розраховують на основі балансу енергії в контурах системи. Без врахування втрат рівняння балансу на час розриву контактів має вигляд [2, 20]

$$L_1 I_p^2 = C_1 U_{1m}^2 + C_2 U_{2m}^2, \quad (4.2.7)$$

де C_1, C_2 - еквівалентні ємності первинного й вторинного кіл;

U_{1m}, U_{2m} - максимальні значення ЕРС самоіндукції в первинній обмотці й ЕРС та взаємоіндукції у вторинній обмотці котушки запалювання.

Напруги U_{1m}, U_{2m} пов'язані через коефіцієнт трансформації котушки запалювання k_T . Підставляючи $U_{1m} = U_{2m} / k_T$ рівняння (4.2.7)

вирішується відносно максимальної величини вторинної напруги (для ідеалізованої системи запалювання)

$$U_{2m} = I_P k_T \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 k_T^2}} = I_P \sqrt{\frac{L_1}{C_1 \frac{1}{k_T^2} + C_2}} \quad (4.2.8)$$

Часові діаграми первинного струму i_1 і вторинної напруги u_2 при $i_2=0$ показані на рис. 4.2.1, б, г.

Електричний розряд в газовому проміжку характеризується певною залежністю напруги між електродами та розрядним струмом (рис. 4.2.2, б) [2, 20].

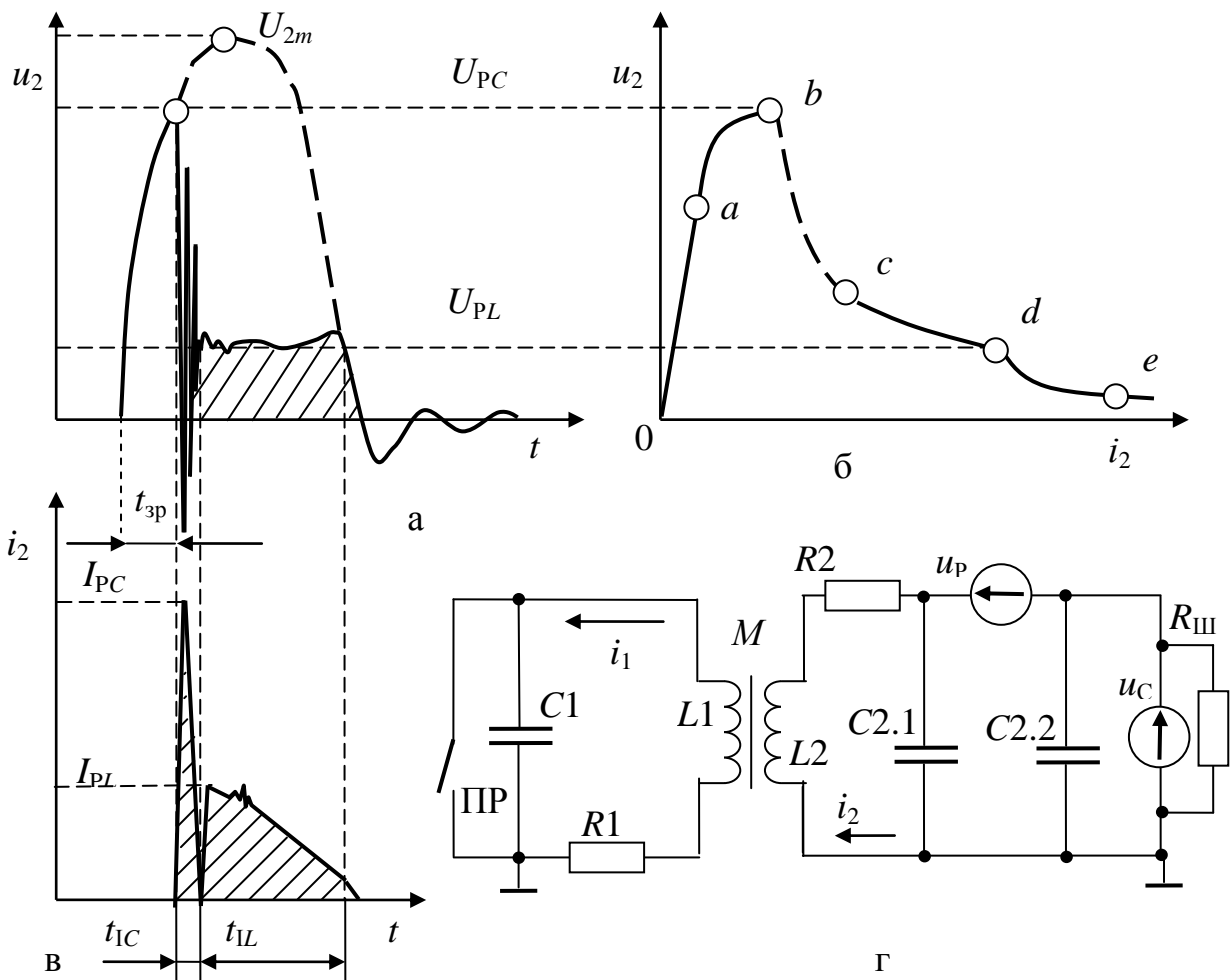


Рис. 4.2.2. Процес пробую в іскровому проміжку: а, в – часові діаграми вторинної напруги та струму; б – ампер-вольтова характеристика електричного розряду; г – схема заміщення системи запалювання під час індуктивної фази розряду

Ділянка Oa на ампер-вольтовій характеристиці відповідає несамостійному розряду. Напруга зростає, а незначний струм залишається практично незмінним. При подальшому збільшенні напруги швидкість руху іонів у напрямку до електродів збільшується. При певній напрузі (точка a) починається ударна іонізація. Якщо поле рівномірне, процес поляризації відразу переростає в пробій газового проміжку. Якщо поле нерівномірне, спочатку виникає місцевий пробій газу біля електродів у місцях з найбільшою напруженістю електричного поля. Такий тип розряду називається короною й відповідає стійкій частині характеристики (ділянка ab). При подальшому підвищенні напруги корона захоплює нові області міжелектродного простору поки не виникне іскровий пробій (точка b). Пробій відбувається при досягненні напругою пробивної величини $U_{пр}$.

Іскра, що виникає, створює сильно нагрітий й іонізований канал між електродами. Опір каналу визначається величиною струму, який утворюється через нього. Тому подальший процес залежить не тільки від параметрів газового проміжку, а й від потужності джерела енергії. Може мати місце тліючий розряд (ділянка cd), коли струми малі або дуговий (ділянка de) коли струми великі внаслідок великої потужності джерела струму й малого опору кола. Обидва розряди є самостійними і відповідають стійким ділянкам характеристики. Тліючий розряд характеризується струмами $10^{-5} \dots 10^{-3} \text{ А}$ й практично незмінною напругою. Дуговий розряд – значними струмами при відносно низькій напрузі між електродами.

Електричний розряд в іскровому проміжку системи запалювання являє розряд зарядженої лінії з розподіленими та зосередженими параметрами. В іскровому розряді системи розрізняють ємнісну й індуктивну складові (фази). Під час ємнісної фази відбувається швидкий розряд розподілених ємностей вторинного кола системи. На цей період, при аналізі електричних процесів, розглядають ускладнену схему заміщення вторинного кола (рис. 4.2.3) [2].

До розподілених параметрів вторинного кола відносять ємність C_0 , індуктивність L_0 , опір R_0 , провідність витoku G_0 проводів. До зосереджених – ємності вторинної обмотки котушки C_L , розподільника C_p й свічі C_C , резистори, що демпфірують, R_d . Іскрові проміжки розподільника та свічки запалювання заміщують відповідними джерелами напруги u_p , u_C , які діють назустріч.

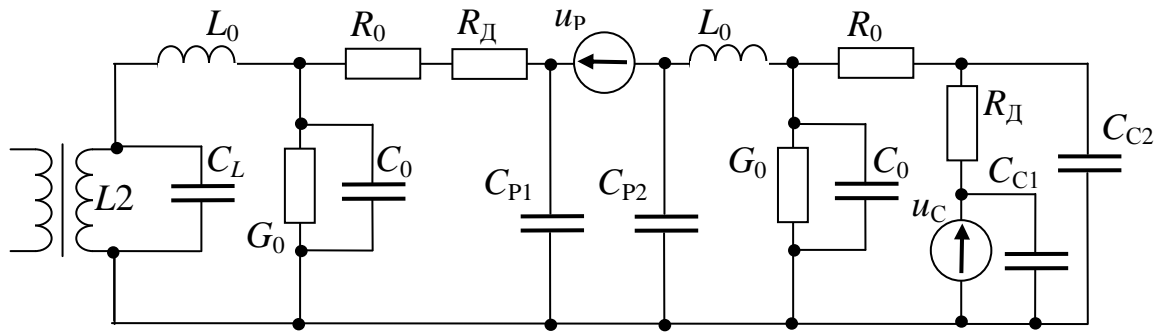


Рис. 4.2.3. Схема заміщення системи запалювання під час ємнісної фази розряду

Якщо активного обмеження у вторинному контурі немає (опір $R_D=0$) частота верхніх гармонік хвильових процесів розряду досягає тисячі мегагерц. Амплітуда імпульсу ємнісного розряду I_{PC} при $R_0=0$ становить сотні ампер, а тривалість t_{IC} – доли мікросекунди. В реальних системах активний опір подавляючого резистора становить $R_D=5\dots 20$ кОм і коливальний процес стає аперіодичним, амплітуда струму обмежується на рівні кількох ампер (при незмінній тривалості t_{IC}). Часові діаграми напруги й струму в іскровому проміжку вторинного кола при розряді показані на рис. 4.2.2, а, в.

За обмежений час ємнісної фази розряду (малої енергії) спалахування паливної суміші в циліндрах ДВЗ відбувається не завжди ефективно. Енергія ємнісного розряду може бути визначена згідно схемі (рис. 4.2.3) за спрощеною формулою [6]

$$W_C = \frac{U_{PC}^2}{2} \left(\frac{R_{PC} C_L}{R_D + R_{PC}} + C_0 + C_C \right), \quad (4.2.9)$$

де $R_{PC} = U_{PC} / I_{PC}$ - опір розрядного проміжку.

Оскільки іскровий розряд відбувається раніше ніж вторинна напруга досягне максимального значення U_{2m} , на ємнісній фазі витрачається лише невелика частина накопиченої енергії. Частина енергії, що залишилася, виділяється в індуктивній фазі розряду. Індуктивний розряд завжди відбувається на стійкій частині ампер-вольтової характеристики, що відповідає тліючому розряду. Максимальні значення струмів розряду індуктивної фази I_{PL} становлять десятки міліампер, а тривалість розряду t_{IL} , підраховується в мілісекундах.

При індуктивному розряді розрахункова схема заміщення системи запалювання має вигляд, показаний на рис . 4.2.2, г. У цей період розряду розподілені параметри не впливають на процеси в колі, а вплив первинного кола необхідно враховувати. При незмінній напрузі на іскрових проміжках $u_c + u_p = U_{PL}$, впливом ємностей $C_{2.1}$, $C_{2.2}$ і опору, що шунтує R_{III} , можна зневажити. При цих умовах можна визначити функцію струму індуктивної фази (без врахування складової затухаючого коливання) через струм розриву (4.2.2) та параметри вторинного кола [6]

$$i_2 = -\frac{U_{PL}}{R_2} + \left(\frac{M}{L_2} I_p + \frac{U_{PL}}{R_2} \right) \cdot \exp\left(-t \frac{R_2}{L_2} \right), \quad (4.2.10)$$

На основі наведеного виразу визначають тривалість індуктивної фази розряду

$$t_{IL} = \frac{L_2}{R_2} \cdot \ln \left(\frac{I_p \frac{M}{L_2} + \frac{U_{PL}}{R_2}}{\frac{U_{PL}}{R_2} + I_{2.кр}} \right), \quad (4.2.11)$$

де $I_{2.кр}$ – критичне значення струму припинення розряду.

При нормальному тиску в циліндрі величина струму $I_{2.кр}$ не перевищує 10 мА.

Таким чином енергію індуктивної фази розряду в іскровому проміжку свічі можна визначити через функції напруги і струму у вторинному колі або в першому наближенні через їх максимальні значення

$$W_L = \int_0^{t_{IL}} u_2(t) \cdot i_2(t) dt \approx 0,5 U_{PL} I_{PL} t_{IL} . \quad (4.2.12)$$

Для класичних автомобільних систем запалювання величина енергії іскрового розряду становить $W_L=20...30$ мДж. В сучасних безконтактних системах – $W_L=40...120$ мДж. Підвищення енергії W_L та тривалості іскрового розряду t_{IL} на свічці запалювання забезпечує зниження витрат палива та токсичних викидів в відпрацьованих газах при експлуатації автомобіля.

4.2.2. Урахування електромагнітних втрат в контурах системи з реальними параметрами

Енергетичні показники проекрованої системи оцінюються з урахуванням втрат потужності, які мають місце в реальних системах запалювання [2].

Втрати на вихрові струми й гістерезис у сталі магнітопроводу котушки запалювання значні й впливають на величину вторинної напруги U_{2m} . Нагар, який шунтує свічку запалювання також приводить до зниження U_{2m} і зменшення енергії іскри при пробі іскрового проміжку. З метою урахування перерахованих втрат у розрахункові схеми заміщення вторинного кола системи вводять опір втрат R_B і опір нагару, що шунтує свічку R_{III} (див. схему рис. 4.2.1, в) та аналітично визначають еквівалентні параметри системи

$$R_e = R_B R_{III} / [k_T^2 (R_B + R_{III})], \quad C_e = C_1 + C_2 k_T^2. \quad (4.2.13)$$

Зниження вторинної напруги обумовлене означеними втратами враховують через коефіцієнт втрат [2, 6, 18]

$$\eta = \exp\left(-\frac{\arctg\varphi}{\varphi}\right). \quad (4.2.14)$$

де $\varphi = \sqrt{4R_e^2 C_e / L_1 - 1}$ – коефіцієнт затухання.

Тоді формула для вторинної напруги (4.2.8) набуває вигляду

$$U_{2m} = I_p k_T \eta \sqrt{\frac{L_1}{C_e}} = I_p k_T \exp\left(-\frac{\arctg\sqrt{4R_e^2 C_e / L_1 - 1}}{\sqrt{4R_e^2 C_e / L_1 - 1}}\right) \sqrt{\frac{L_1}{C_e}}. \quad (4.2.15)$$

Для контактних батарейних систем запалювання коефіцієнт втрат зазвичай становить $\eta=0,75\dots0,85$.

Процес комутації струму в первинному колі контактної системи запалювання супроводжується утворенням дуги на контактах переривника під дією ЕРС самоіндукції, яка індукується в первинній обмотці котушки запалювання. Аналіз електричних процесів у колах системи запалювання під час утворення дуги, проводять за

часовою діаграмою напруги на контактах переривника з використанням схеми заміщення (рис. 4.2.4).

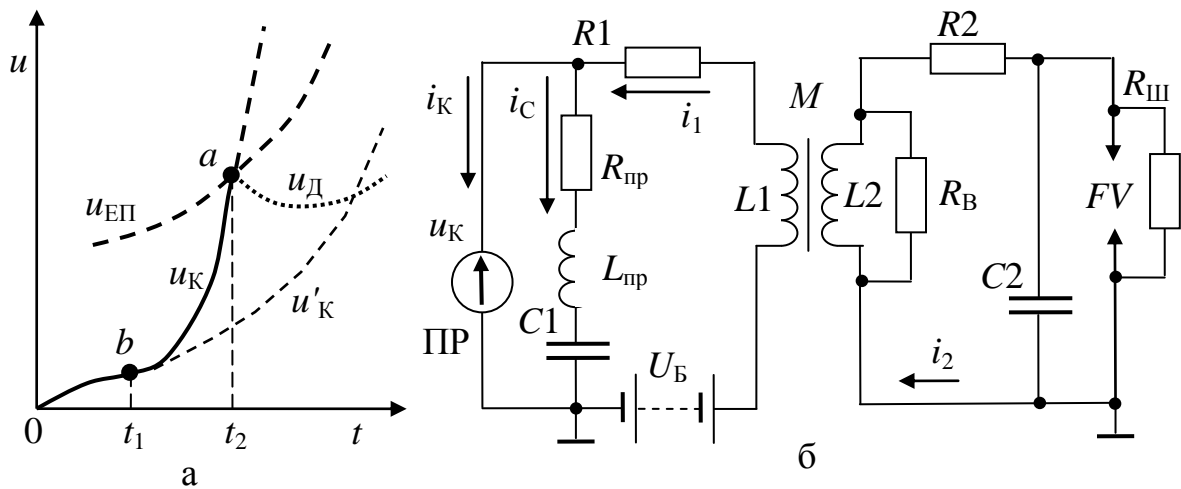


Рис. 4.2.4. Процес утворення дуги на контактах переривника:
а – крива зміни напруги на контактах; б – схема заміщення системи

У початковий момент після розмикання між контактами виникають містки з іонів матеріалу анода, що проводять струм. По мірі розбіжності контактів (з часом) місток розтягується, провідність його знижується, а напруга на ньому зростає й може досягти декількох вольтів (рис. 4.2.4, а, точка b). Іонні містки носять перехідний характер не являючись дугами. На момент часу t_1 місток вибухає утворюючи гарячі пари металу й іони стають "запалом" для виникнення дуги. Напруга на контактах u_K швидко зростає (ділянка ba) за рахунок ЕРС самоіндукції первинної обмотки.

Після розриву містка, поряд зі зростанням напруги u_K , що обумовлена ЕРС самоіндукції, збільшується відстань між контактами (підвищується електрична міцність проміжку яка оцінюється напругою електричного пробою u_{EP}). Перетинання кривих u_K й u_{EP} (точка a , момент t_2) відповідає початку виникнення дуги під напругою u_D . Якщо криві u'_K й u_{EP} не перетинаються (внаслідок великої ємності C_1 або малого запасу електромагнітної енергії) дуга не виникає [2].

На рис. 4.2.4, б показана схема заміщення системи запалювання в період розмикання контактів переривника. Незважаючи на малі величини $L_{пр}$ й $R_{пр}$ (індуктивність й опір проводу підключення конденсатору C_1) їх вплив на виникнення дуги значний тому що процес розмикання вимірюється мікросекундами. Розподілені пара-

метри проводу $L_{\text{пр}}$, $R_{\text{пр}}$ перешкоджають зростанню струму i_C заряду конденсатора C_1 (зменшенню i_K , u_K) під дією ЕРС первинної обмотки, а отже сприяють виникненню дуги.

Стійкість контактів переривника проти утворення дуги залежить від матеріалу контактів, стану контактної поверхні та швидкості розмикання. Для вольфрамових контактів середня напруга дуги становить $U_D=16...20\text{В}$. Закон зменшення первинного струму в процесі розмикання контактів порушується при деякому значенні I'_p , коли дуга нестійка й гасне (рис. 4.2.5).

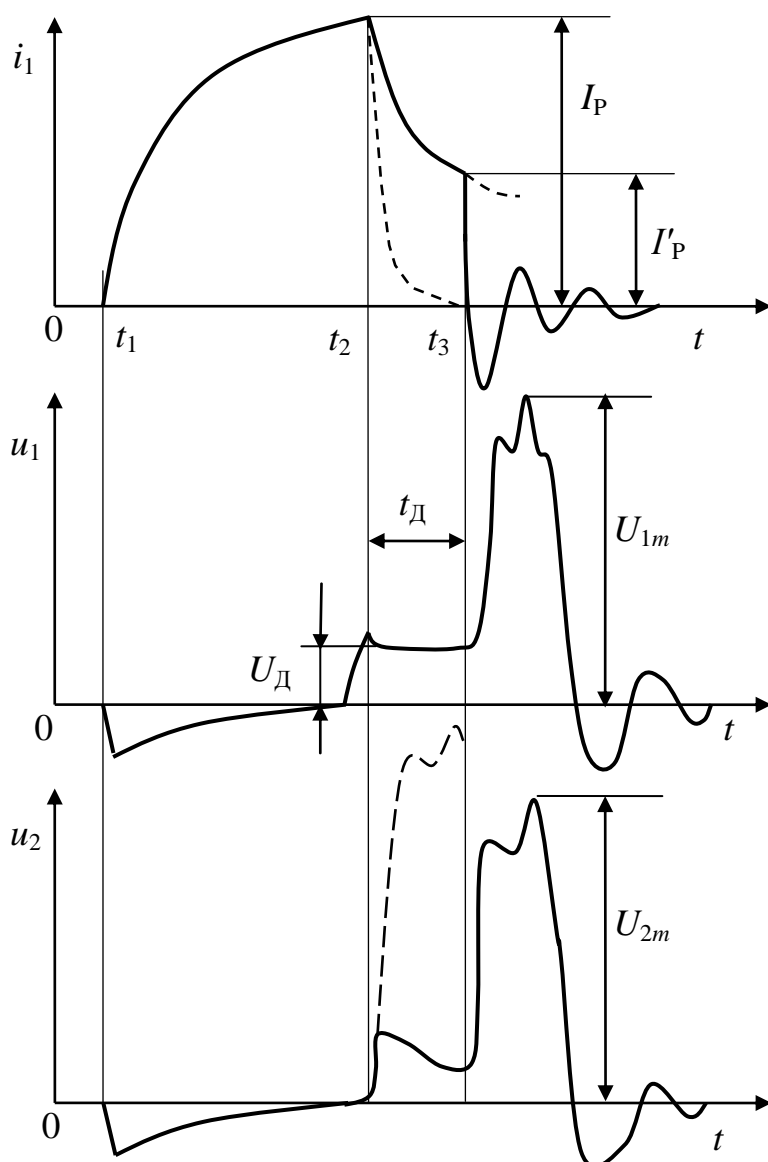


Рис. 4.2.5. Часові діаграми струму та напруги при наявності дуги на контактах переривника

Час горіння дуги згідно рис. 4.2.5 визначається за результатами аналізу процесів, які відбуваються в схемі (рис. 4.2.4, б)

$$t_{\text{д}} = \frac{L_1}{R_1} \ln \left[\frac{I_{\text{п}} + \frac{U_{\text{д}} - U_{\text{АБ}}}{R_1}}{I'_{\text{п}} + \frac{U_{\text{д}} - U_{\text{АБ}}}{R_1}} \right]. \quad (4.2.16)$$

Вторинна напруга за час горіння дуги змінюється за законом експоненти [2]

$$u_2(t) = M \frac{di}{dt} = -M \frac{R_1}{L_1} \left(I_{\text{п}} + \frac{U_{\text{д}} - U_{\text{АБ}}}{R_1} \right) \exp \left(-\frac{tR_1}{L_1} \right). \quad (4.2.17)$$

Внаслідок малої швидкості зменшення первинного струму вторинна напруга має незначну величину (період часу $t_2 \dots t_3$). Після зникнення (обриву) дуги процеси протікають за відомими законами. У результаті втрат на дугу максимум вторинної напруги зменшується (рис. 4.2.5). Втрати енергії на дугу в первинному контурі визначають через різницю струмів розриву

$$\Delta W_{\text{д}} = 0,5L_1 (I_{\text{п}}^2 - I'_{\text{п}}^2). \quad (4.2.18)$$

Чим більше ємність конденсатора C_1 та швидкість розмикання контактів, тим скоріше дуга гасне. На практиці зменшення напруги U_{2m} внаслідок втрат на дугу враховують через коефіцієнт дуги $k_{\text{д}}$, який визначають на підставі емпіричних залежностей.

Енергія розряду в іскровому розподільнику вторинного кола не використовується для запалювання суміші і тому розглядається як втрати. На малих обертах ротору n_{min} і при значному перекритті електродів бігунка й кришки розподільника іскровий зазор (довжина іскри) на момент електричного розряду змінюється несуттєво. На підвищених обертах n_{max} , шнур іскрового розряду в розподільнику збільшується, що викликає наприкінці розряду зростання розрядної напруги на ньому й зменшення розрядного струму у вторинному колі. При цьому напруга на основному іскровому проміжку свічі залишається незмінною. У результаті такого процесу знижуються тривалість й енергія іскри в іскрових проміжках.

В першому наближенні втрати енергії в іскровому розподільнику враховують через співвідношення іскрових зазорів свічки δ_c та розподільника δ_p

$$W_p = \frac{\delta_p W_L + W_c}{\delta_p + \delta_c}. \quad (4.2.19)$$

Підставивши (4.2.2) в (4.2.8) з урахуванням втрат на котушці запалювання (4.2.14) та контактах переривника (k_d), отримаємо математичну модель контактної системи запалювання як джерела вторинної напруги

$$U_{2m} = \frac{U_{AB}}{R_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{120\gamma_3 R_1}{z_c L_1 n}\right) \right] k_L k_d k_T \eta \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 k_T^2}}. \quad (4.2.20)$$

де k_L – коефіцієнт магнітного зв'язку (1.65), величина якого визначається особливостями конструкції котушки запалювання.

Результати аналізу математичної моделі та експериментальних досліджень можна представити у вигляді функціональних залежностей та робочих характеристик системи (рис. 4.2.6).

Згідно (4.2.8) вторинна напруга U_{2m} збільшується пропорційно струму розриву I_p . (рис. 4.2.6, а, пунктирна лінія). При врахуванні втрат потужності згідно (4.2.20), залежність $U_{2m} = f(I_p)$ стає нелінійною (рис. 4.2.6, а, суцільна лінія). Нелінійність спостерігається при більших значеннях I_p внаслідок втрат на дугу, на витокі струму й корону у вторинному колі. При певних значеннях I_p зріст U_{2m} практично припиняється. Зв'язок між U_{2m} й іншими параметрами більш складний.

Ступінь впливу k_T на величину U_{2m} залежить від значень R_{III} (стану розрядника). При відсутності витоків ($R_{III} = \infty$) величина U_{2m} зростає зі збільшенням k_T . При наявності витоків (зниження значень R_{III}) залежність $U_{2m} = f(k_T)$ більш складна. Для кожного значення R_{III} є оптимальна величина $k_{T,опт}$, при якій напруга U_{2m} досягає максимального значення (рис. 4.2.6, б).

Найбільше значення амплітуди імпульсів вторинної напруги, так званий «абсолютний максимум» буде досягатися у випадку, якщо вся електромагнітна енергія, запасена в первинному колі котушки на момент розмикання контактів повністю перетвориться

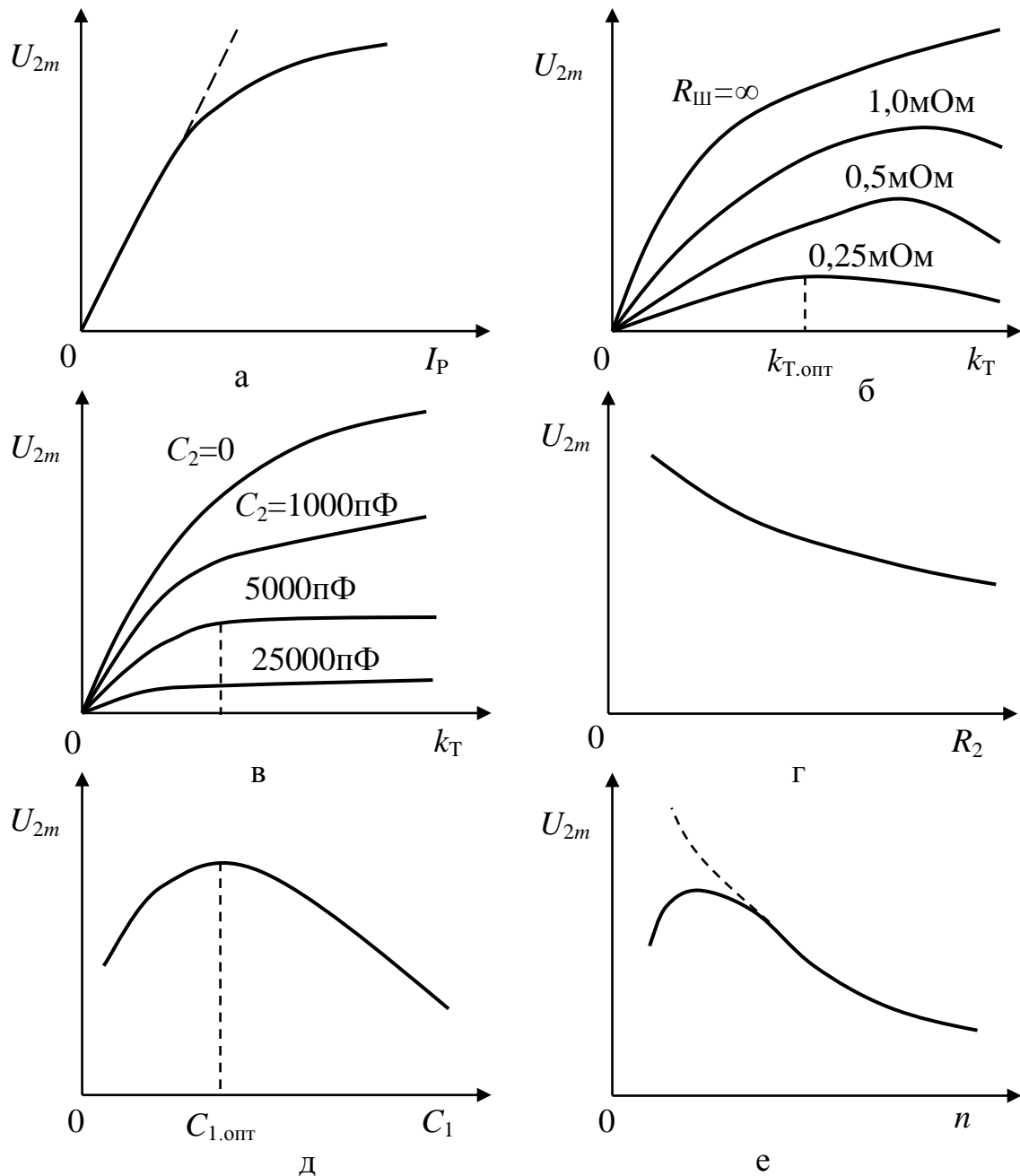


Рис. 4.2.6. Вплив параметрів кіл системи запалювання на амплітуду імпульсів вторинної напруги

в електростатичну енергію заряду ємності вторинного кола [2, 6]

$$(U_{2m})_{\max} = I_P \sqrt{L_1 / C_2} . \quad (4.2.21)$$

Ця умова виконується для певних співвідношень частот високочастотних і низькочастотної складових напруги при певному настроюванні контурів $L_2 C_2 / L_1 C_1 = 1 / (1 - k_L^2)$. Настроювання системи на "абсолютний максимум" не завжди можливо й доцільно. Пара-

метри первинного кола L_1 і C_1 вибирають за умовою одержання необхідної електромагнітної енергії й роботи контактів без утворення дуги. Коефіцієнт зв'язку k_L визначається конструкцією котушки й близький до одиниці. Значення L_2 вибирають за умовою одержання достатньої вторинної напруги U_{2m} , а ємність вторинного кола C_2 визначається конструкцією та компоновкою елементів вторинного кола системи запалювання.

При значних ємнісних навантаженнях напруга U_{2m} досягає практично граничних значень в котушках з низьким коефіцієнтом k_T (рис. 4.2.6, в). При таких умовах підвищувати число витків вторинної обмотки котушки запалювання w_2 недоцільно.

Величина активного опору вторинного кола R_2 визначає ступінь згасання вторинної напруги (рис. 4.2.6, г). При більших значеннях R_2 та значних ємнісних навантаженнях слід збільшувати число витків w_2 (обирати котушку з більшим k_T). Вплив R_2 на U_{2m} послаблюється при малих значеннях C_2 .

Ємність первинного кола C_1 впливає на рівень U_{2m} негативно (аналогічно ємності C_2). Однак при малих значеннях C_1 (через утворення дуги на контактах переривника) величина U_{2m} знижується. Тому при заданих параметрах системи обирають конденсатор оптимальної ємності $C_{1.опт}$ (рис. 4.2.6, д).

Швидкісний режим системи помітно впливає на рівень напруги U_{2m} . Залежність $U_{2m}=f(n)$ згідно (4.2.2), (4.2.8) носить експоненціальний характер (рис. 4.2.6, е, пунктирна лінія). Реальна крива (суцільна лінія) відрізняється від теоретичної. Ця відмінність виникає в результаті втрат на утворення дуги в контактах переривника при значних струмах розриву та малій швидкості розмикання.

4.2.3. Аналіз процесів у колах транзисторної системи

Процес зростання струму в первинному колі котушки запалювання контактно-транзисторної й безконтактної систем запалювання відбувається за тими же законами, що й для класичної системи [6].

Для прикладу розглянемо варіант контактно-транзисторної системи запалювання в якій транзистор включено за схемою зі спільним колектором (рис. 4.2.7, а).

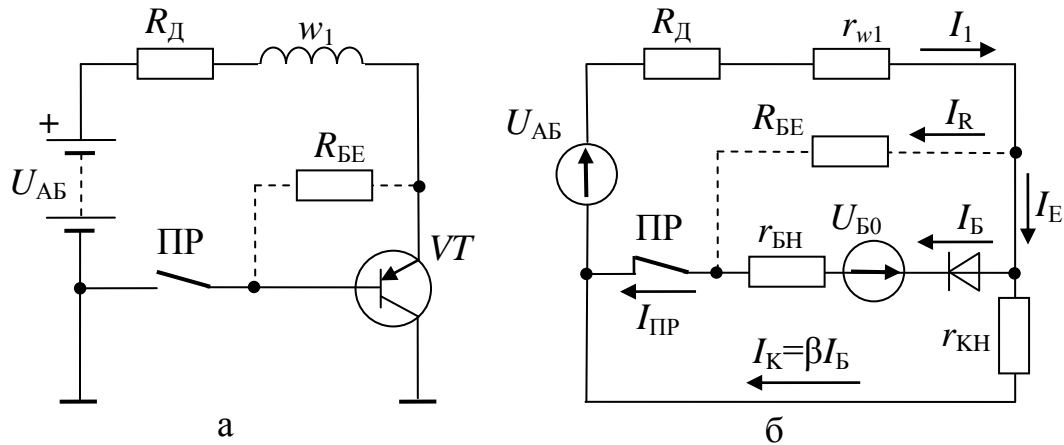


Рис. 4.2.7. Первинне коло контактної-транзисторної системи запалювання: а – схема електрична принципова; б – схема заміщення у сталому режимі

Розрахунок режимів схеми проводять згідно схемі заміщення первинного кола при замкненому переривнику (рис. 4.2.7, б). Транзистор VT заміщено схемою відчиненого ключа (див. рис. 1.2.14, б).

В схемах позначено: R_D – опір додаткового резистору; r_{w1} активний опір первинної обмотки котушки запалювання; R_{BE} – резистор, що шунтує; r_{BH} , r_{KH} – вхідний та вихідний опори транзистора VT в режимі насичення (1.124); U_{B0} – потенційний бар'єр емітерного переходу транзистора; діод в колі бази транзистора імітує вентиляльні якості емітерного $p-n$ переходу транзистора.

На відзнаку від контактної системи еквівалентний опір первинного кола визначається через струми у гілках схеми. Схему заміщення (рис. 4.2.7, б) в статичному режимі, розраховують на підставі законів Ома і Кірхгофа для кіл постійного струму.

Струми через транзистор

$$I_E = \frac{U_{AB}}{R_D + r_{w1} + r_{KH}} \left(1 + \frac{1}{\beta_C} \right), \quad I_B = \frac{I_E}{\beta_C + 1}, \quad I_K = I_E - I_B, \quad (4.2.22)$$

де β_C – статичний коефіцієнт підсилення транзистору (1.124).

Струм через контакти переривника

$$I_{IP} = I_B + I_R = I_B + \frac{U_{BE}}{R_{BE}} = I_B + \frac{U_{B0} + I_B r_{BH}}{R_{BE}}. \quad (4.2.23)$$

Струм первинного кола

$$I_1 = I_E + I_R = I_E + \frac{U_{B0} + I_B r_{BH}}{R_{BE}}. \quad (4.2.24)$$

Еквівалентний активний опір первинного кола

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_{AB} - U_{BE}}{I_E + I_R}. \quad (4.2.25)$$

Коефіцієнт підсилювання струму схеми в статичному режимі

$$K_I = \frac{I_1}{I_{IP}}. \quad (4.2.26)$$

Завдяки підсилювальним властивостям транзистора струм керування I_{IP} , який комутується механічними контактами переривника, обмежується на достатньому рівні. При цьому полегшується робота контактів переривника (не утворюється дуга). Слід зазначити, що значне зниження I_{IP} (менше 0,3А) приводить до збільшення перехідного опору контактів і порушень стабільності їх роботи внаслідок окислювання й забруднення контактних поверхонь (особливо на високих обертах ДВЗ). Тому при високих коефіцієнтах підсилювання транзистору застосування резистору R_{BE} дозволяє підвищити струм через переривник до необхідного рівня.

Процес запирання й відсічки (повного зачинення) транзистора впливає на якість утворення вторинної напруги. Припинення струму керування I_{IP} виконавчого транзистора приводить до його запирання. При синтезуванні синфазного ключового каскаду розглядаються три способи запирання транзистора, який включено за схемою зі спільним колектором (рис. 4.2.8, а, б, в) або зі спільним емітером (рис. 4.2.8, г, д, е).

В схемі (рис. 4.2.8, а) запирання транзистора здійснюється перериванням струму бази $I_B=0$. У схемі (рис. 4.2.8, б) під час переривання струму I_{IP} емітерний перехід залишається шунтованим опором R_{BE} ($U_{BE} \geq 0$), а в схемі (рис. 4.2.8, в) до емітерного переходу підключається джерело напруги, що запирає ($U_{BE} \leq 0$).

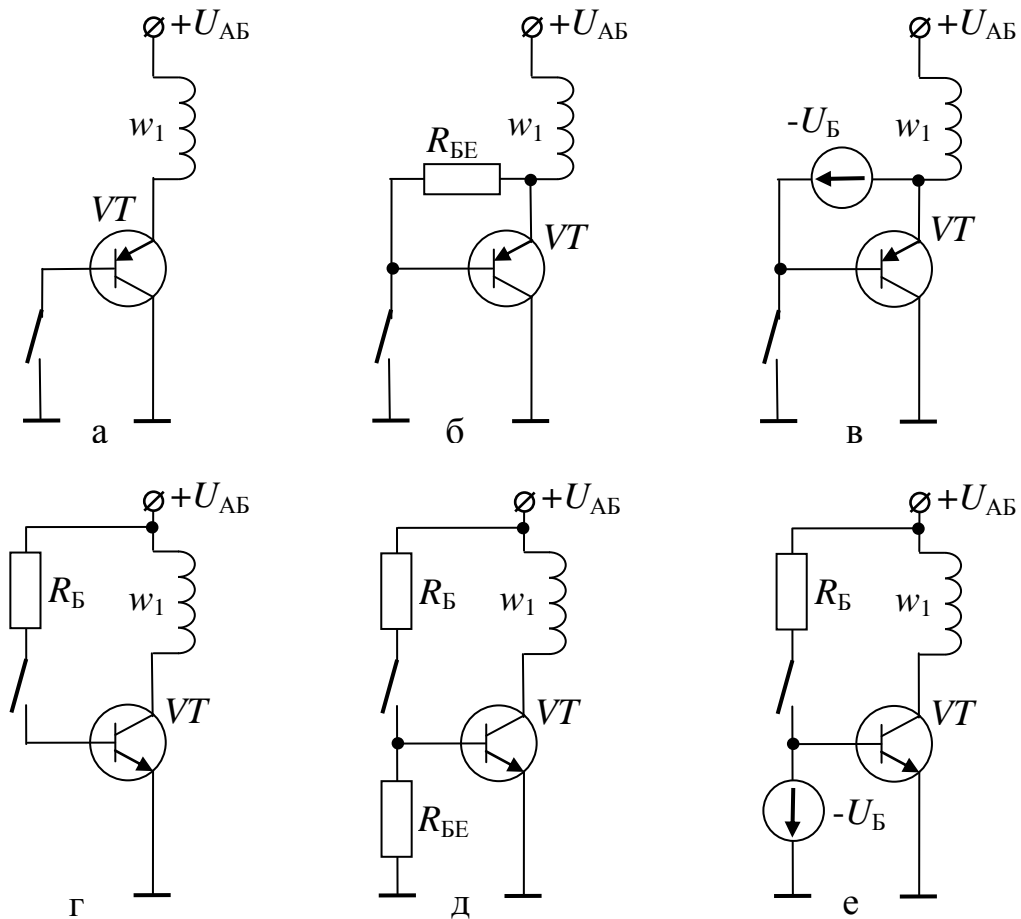


Рис. 4.2.8. Способи запирання транзистора в системі запалювання:
 а, г – розмиканням кола бази; б, д – шунтуванням емітерного переходу при розмиканні кола бази; в, е – активне зачинення напругою зворотного напрямку

Напруга U_{KE} прикладена до зачиненого транзистора (на рівні граничних значень) буде викликати витоки колекторного струму, які можуть довільно збільшуватися та викликати лавинний, а потім і тепловий пробій транзистора (див. рис. 1.2.16). Активне запирання дозволяє підвищити швидкість зачинення транзистора та забезпечити максимальний опір (електричну міцність по виходу) при нарузі, припустимого значення $U_{KE,max}$. Залежно від способу зачинення транзистора процес зростання колекторного струму I_K відбувається по-різному (див. рис. 1.2.15).

Процес запирання транзистору проілюстровано на рис. 4.2.9. Якщо транзистор зачинено пасивним способом (рис. 4.2.8, а, г), струм I_K зі збільшенням напруги U_{KE} виникає згідно кривій 1, а при шунтованому вході (рис. 4.2.8, б, д) – згідно кривій 2.

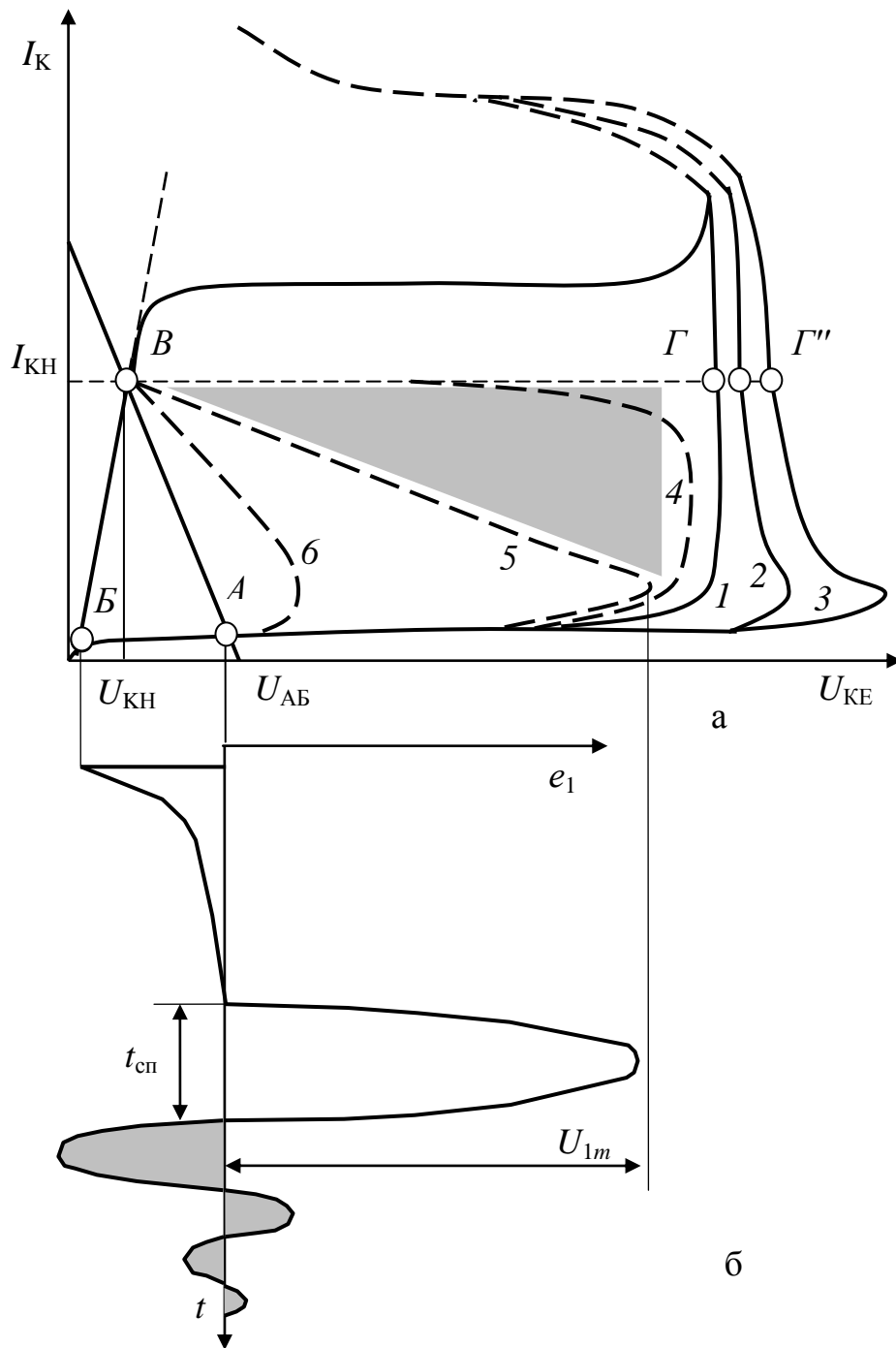


Рис. 4.2.9. До пояснення процесу запирання транзистору під індуктивним навантаженням: а – вихідна характеристика транзистора; б – часова діаграма ЕРС самоіндукції в навантаженні

Активне зачинення транзистора (рис. 4.2.8, в, е) дозволяє збільшити допустиме значення прикладеної напруги (крива 3).

Залежно від структури навантаження транзистора (активного, ємнісного, індуктивного або змішаного) рух його робочої точки в процесі запирання носить різний характер [6]. Включення транзис-

тора під активним навантаженням викликає переміщення робочої точки з позиції A в позицію B через лінійну область робочої характеристики (рис. 4.2.9, а). Припинення струму бази приводить до повернення робочої точки із позиції B в позицію A по навантажувальній прямій.

Індуктивно-активне навантаження при відчиненні транзистора викликає швидке переміщення робочої точки з позиції A в позицію B під дією протидіючої ЕРС на рівні U_{AB} (рис. 4.2.9, б). Далі спостерігається відносно повільне (пропорційно постійній кола L_1/R_1) переміщення робочої точки в позицію B . Робочу точку відчиненого транзистора (U_{KH}, I_{KH}) обирають на границі насичення щоб виключити процес розсмоктування надлишкових носіїв заряду в базі при його подальшому запиранні. Як наслідок цього, момент іскроутворення системи не залежить, від частоти обертання.

Припинення струму бази викликає спад струму через навантаження та переміщення робочої точки під дією ЕРС самоіндукції з позиції B в одну з позицій Γ - Γ'' (залежно від способу зачинення транзистора) й далі відносно повільно по одній із кривих 1, 2, 3 у вихідну точку A . Час спадання струму через транзистор $t_{сп}$ (час руху робочої точки з позиції Γ в позицію A) визначається динамічними якостями та режимом вимикання транзистора на основі (1.127). При активному вимиканні транзистора час спадання струму колектора $t_{сп}$ практично дорівнює часу формування зрізу $t_{\Phi 3}$

$$t_{сп} = t_{\Phi 3} = \frac{\beta}{2\pi f_{гр}} \cdot \ln \left(\frac{I_{BH} - I_{БР}}{I_{БР}} \right). \quad (4.2.27)$$

де I_{BH} - струм бази насичення транзистора (при $U_{KB}=0$);

$I_{БР}$ - струм, що розсмоктує заряди під дією інверсної напруги.

Області великих струмів для кривих 1, 2, 3 (рис. 4.2.9, а) відносяться до лавинного пробою (див. рис. 1.2.15). Якщо при цьому енергія виділена в транзисторі перевищує певну величину, робоча точка може зміститися в область необоротного пробою (пунктирна крива рис. 4.2.9, а) і транзистор вийде з ладу. Щоб виключити ймовірність лавинного пробою транзистора паралельно первинній обмотці котушки запалювання або виходу транзистора включають

конденсатор ємністю $C_1=0,5\dots 2,0$ мкФ (утворюють змішане навантаження транзистора). Необхідна ємність конденсатора, залежить від параметрів транзистора й первинного кола.

Криві 4, 5, 6, (рис. 4.2.9, а) показують рух робочої точки транзистора при його запиранні коли в колі колектора ємність включена паралельно індуктивності (первинній обмотці котушки запалювання). Зі збільшенням ємності робоча точка переміщається по кривих 4, 5 або 6, наближаючись до режиму зачинення під активним навантаженням (пряма AB). Таким чином, включення ємності певного значення дозволяє знизити струм через транзистор під час його запирання й підтримувати достатню ЕРС самоіндукції в навантаженні $e_1 = U_{1m}$. Як наслідок, зменшується енергія, яка розсіюється транзистором під час його запирання.

Після запирання транзистор переходить у режим відсічення й починається процес обміну енергією між магнітним полем котушки запалювання й електричним полем захисного конденсатора (рис. 4.2.9, б). При цьому, робоча точка транзистора зміщується уздовж горизонтальної частини кривих 1, 2, 3 без виходу в область небезпечних струмів. Захисна функція конденсатора полягає у відборі частини енергії в транзисторі під час його запирання (тонована площа на рис. 4.2.9, а) та розсіювання її в тепло після відсічки транзистора (тонована площа на рис. 4.2.9, б).

Витрати енергії в транзисторному ключі протягом часу його запирання погіршують робочі характеристики системи запалювання та в загальному вигляді визначаються через часові функції наруги та струму

$$\Delta W_{VT} = \int_0^{t_{сп}} u_{БЕ} i i_{Б} u dt + \int_0^{t_{сп}} u_{КБ} i i_{К} u dt \approx \int_0^{t_{сп}} u_{КЕ} i i_{Е} u dt, \quad (4.2.28)$$

де $u_{КЕ}(i)$, $i_{Е}(u)$ - миттєві значення напруги й струму в режимі запирання транзистора.

$t_{сп}$ - час спаду струму колектора (емітера) від максимального значення до нуля.

Експериментальні дослідження [6] показують, що зменшення часу спадання струму $t_{сп}$ та застосування конденсатора в первинно-

му колі системи запалювання дозволяє знизити втрати енергії ΔW_{VT} на порядок (рис. 4.2.10).

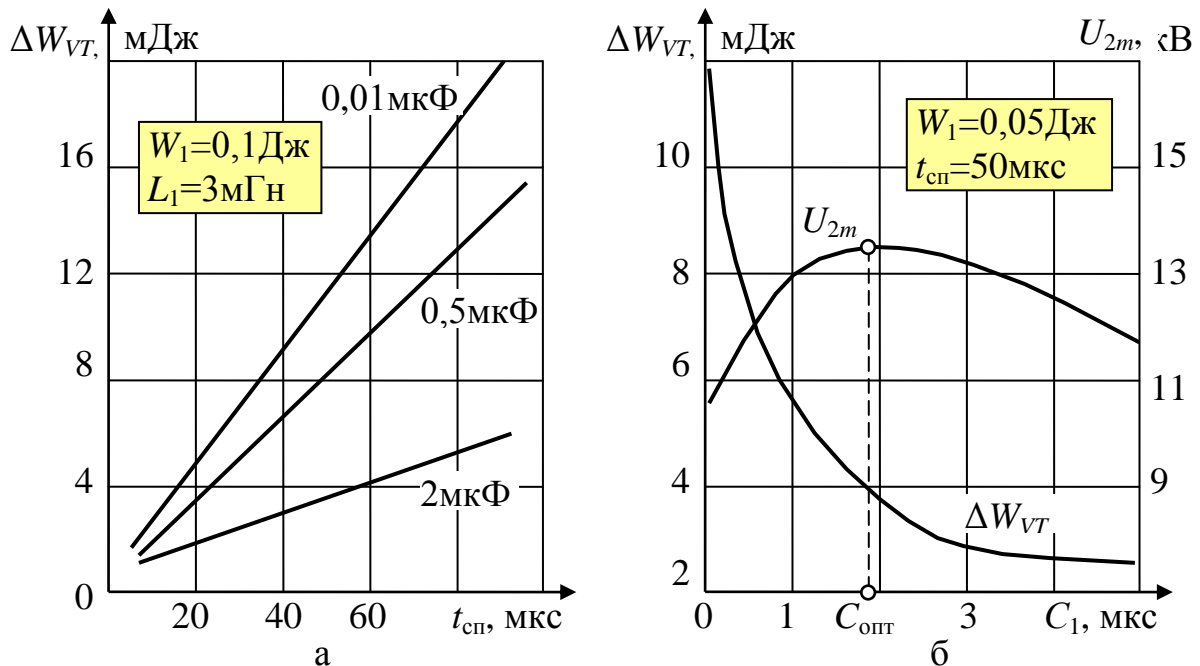


Рис. 4.2.10. Втрати енергії на виконавчому транзисторі системи запалювання: а – в залежності від динамічних характеристик транзистора; б – в залежності від величини ємності, що розвантажує

Наведені характеристики (для системи з накопиченою енергією W_1) показують, що відхилення ємності коливального контуру від оптимальних значень $C_1 > C_{опт}$ поряд зі зменшенням втрат на транзисторі ΔW_{VT} веде до зниження рівня вторинної напруги U_{2m} . (див. рис. 4.2.10, б).

4.2.4. Особливості робочого циклу в системах запалювання з ємнісним накопичувачем енергії

В системах запалювання з накопиченням енергії в ємності (конденсаторі) у якості комутуючого елементу переважно використовують тиристор у якого вихідний опір на порядок нижче чим у транзистора [8, 14]. Тому іноді такі системи запалювання називають тиристорними або конденсаторними.

В системі з безперервним накопиченням енергії в ємності використовується тиристорний комутатор струму, яки складається з

перетворювача напруги (ПН) накопичувальної ємності $C1$, тиристорного ключа VS з колом керування (рис. 4.2.11).

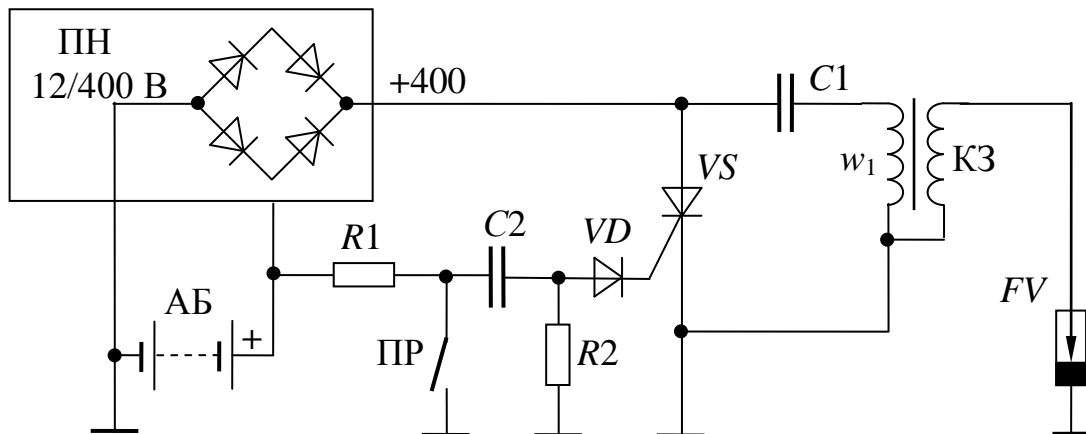


Рис. 4.2.11. Схема тиристорної системи запалювання з накопиченням енергії в ємності

Коли контакти переривника (ПР) замкнуті, коло керування знеструмлене і тиристор VS знаходиться в зачиненому стані. Накопичувальна ємність $C1$ на цей час заряджається підвищеною напругою 400В постійного струму від перетворювача ПН.

Під час розмикання контактів ПР через коло, що диференціює $R1, R2, C2$ формується імпульс струму позитивної полярності, який через діод VD відчиняє тиристорний ключ. Ємність $C1$ розряджається через первинну обмотку w_1 котушки запалювання $K3$ струмом i_{K3} утворюючи ЕРС самоіндукції u_{K3} (рис. 4.2.12, а, б). У вторинній обмотці котушки запалювання на цей час індукується імпульс високої напруги U_{2m} (рис. 4.2.12, в).

Коли розряд конденсатора $C1$ закінчується і стум через тиристор стає нижче струму утримання (див. рис. 2.1.117), тиристор зачиняється, але коливальний процес (перезаряд $C1$) продовжується по колу обмотки w_1 через діоди випрямляючого моста, який підключено на виході ПН (див. рис. 4.2.11). Струм розряду (перезаряду) $C1$ зворотного напрямку індукує повторну ЕРС в обмотках $K3$. Цей процес може викликати повторний електричний розряд (повторну іскру).

Під час розряду та перезаряду t_{ip} конденсатора $C1$ перетворювач напруги опиняється в перенавантаженому стані, що приводить до зупинки генераторної частини ПН (безаварійне відключення).

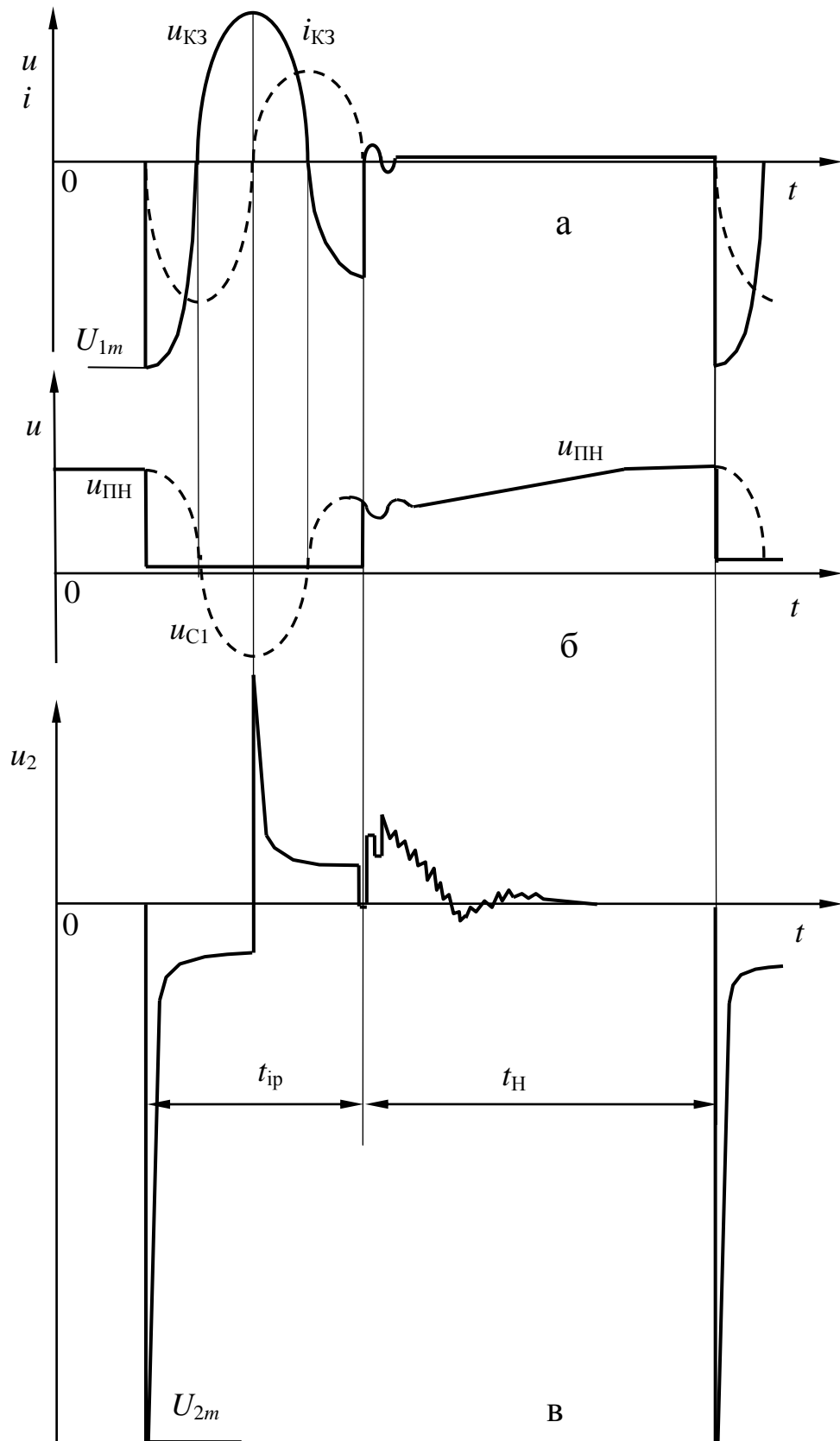


Рис. 4.2.12. Електричні процеси в колах тиристорної системи запалювання

Після закінчення дії зворотної півхвилі перезаряду перетворювач розвантажується та починає функціонувати, заряджаючи накопичувальну ємність C_1 протягом часу t_H .

Під час замикання контактів ПР конденсатор C_2 , попередньо заряджений імпульсом керування, розряджається через резистор R_2 . Далі періодичний процес повторюється з частотою перемикування переривника.

Перехідні процеси в первинному колі системи запалювання аналізують на основі (1.54) для двох RLC контурів (на періоди розряду та перезаряду). В першому контурі (C_1 , VS , w_1) враховують активні опори (тиристора, первинної обмотки K_3 , електричних з'єднань та проводів підключення) та взаємоіндукцію від вторинної обмотки K_3 під час іскроутворення. Як початкова умова при цьому розглядається зарядженість ємності C_1 до номінальної напруги перетворювача. В другому контурі в еквівалентному активному опорі замість тиристора розглядають діоди випрямляча. Напругу на ємності C_1 у зворотному напрямку при цьому вважають рівною амплітудному значенню напруги на K_3 на час коли струм у першому контурі дорівнює нулю.

В іскро-конденсаторних системах запалювання [2] енергія комбінованого електричного розряду накопичується одночасно в індуктивності (іскрова фаза) та ємності (дугова фаза).

На відзнаку від конденсаторних систем процес розряду накопичувальної ємності в іскро-конденсаторній системі запалювання відбувається у вторинному колі котушки запалювання (рис. 4.2.13).

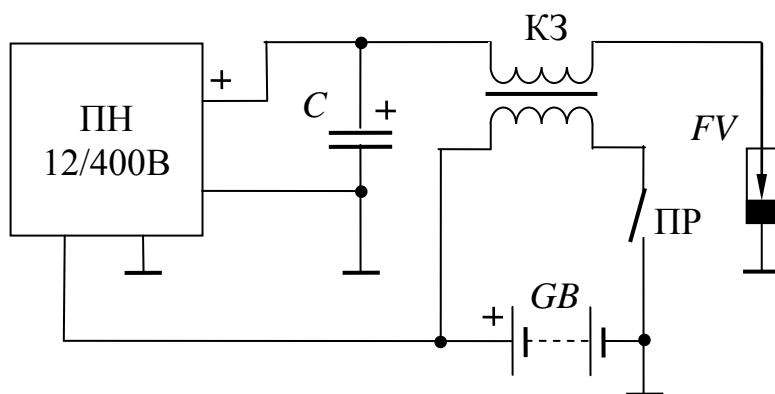


Рис. 4.2.13. Схема іскро-конденсаторної системи запалювання

Процес розряду ємності через іонізований проміжок свічки запалювання аналізують як перехідний процес в нерозгалуженому колі з R , L , C параметрами при зарядженій ємності. При цьому, іскровий проміжок свічки запалювання в розрахунковій схемі заміщують джерелом напруги іскрового розряду, який діє зустрічно струму розряду ємності.