

Розділ 6. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРООБЛАДНЕННЯ

6.1. Загальні принципи розробки електронних пристроїв

6.1.1. Синтез схеми та вибір елементів

Процес розробки електронних пристроїв можна поділити на три основних етапи: синтез схеми та вибір елементної бази; розрахунок параметрів елементів та режимів схеми; розробка конструкції пристрою.

На першому етапі за результатами аналізу технічного завдання розробляють функціональну схему пристрою. Далі визначають елементну базу на якій передбачається реалізація пристрою, та після аналізу конкуруючих схемних рішень окремих функціональних блоків складають структурну схему пристрою. Вихідну (скелетну) схему електричну принципову отримують на підставі структурної схеми шляхом поєднання окремих фрагментів схем структурних блоків та доповнення її елементами термостабілізації режимів, фільтрів живлення, захисту напівпровідникових компонентів, кіл зворотних зв'язків.

Функціональна схема являє блочну структуру з функціональними зв'язками. Назва кожного блоку функціональної схеми відповідає певній функції перетворення (формувавач сигналу, підсилювач струму, генератор опорної частоти, схема порівняння, формувавач опорної напруги, перетворювач частота/напруга, гальванічна розв'язка, вихідний каскад).

На *структурній схемі* уточнюють спосіб реалізації кожного функціонального блоку (схемне рішення та елементну базу). У блоках структурної схеми наводять назву, або фрагмент схеми конкретного функціонального пристрою. Наприклад, формувавач (фронтів, тривалості, амплітуди, полярності) сигналу можна побудувати за різними схемами (бар'єрного обмежувача, випрямляча, транзисторного ключа, компаратору, тригеру, одновібратору, таймеру). При цьому схему можна реалізувати на дискретних компонентах або з використанням функціональних мікросхем.

Схему електричну принципову в кінцевому вигляді (з цілком визначеним переліком елементів) отримують за результатами попереднього та перевірного розрахунків.

Попередній розрахунок виконують з метою уточнення конфігурації схеми, вибору типів активних елементів та визначення параметрів пасивних елементів.

Перевірочний розрахунок полягає у визначенні режимних параметрів кіл синтезованої схеми та параметрів вихідного сигналу пристрою під навантаженням. За результатами перевірного розрахунку, вразі необхідності, корегують параметри обраних елементів схеми з метою отримання заданих параметрів вихідного сигналу.

Попередній розрахунок схеми пристрою у статичному режимі починають з кінця схеми (від навантаження), а закінчують визначенням параметрів керуючого сигналу (сигналу датчика) який треба забезпечити на вході пристрою (див. приклад в додатку). Якщо параметри керуючого сигналу обумовлюються в завданні на проектування (датчик обрано), перший каскад пристрою розглядається як каскад, що узгоджує пристрій з параметрами датчика. Перевірочний розрахунок (апробацію) схеми електронного пристрою в динамічному режимі доцільно виконувати шляхом імітаційного моделювання за допомогою прикладних програм (див. п.п. 1.1.5).

Під час вибору активних елементів схеми як альтернативні розглядають біполярні, польові та комбіновані (IGBT) транзистори, тиристори, інтегральні мікросхеми [7, 13, 14]. Критеріями вибору типу транзистора при синтезі схем електричних принципових є загальна їх характеристика (передаточні функції, вхідний та вихідний опір, температурна стабільність, конструктивне виконання, вартість), потужність та динамічні якості (частотний діапазон). Тип конкретного транзистора, за результатами розрахунку схеми, обирають по параметрах, що наводяться в довідниках та каталогах. Залежно від задачі, яка вирішується, розглядають декілька груп параметрів транзистора:

- параметри малого сигналу характеризують транзистор, який працює в лінійному режимі;

- параметри великого сигналу та постійного струму розглядають при розрахунках ключових режимів (насичення та відсічки), коли транзистор повністю відчинений або зачинений;

- до параметрів допустимих режимів звертаються при виборі транзистора за результатами попереднього розрахунку;
- динамічні параметри враховують при оцінці динамічних якостей синтезованої схеми.

Номінальні опори резисторів в схемах обирають як найближчі до розрахункових значень за рядом номіналів опорів. Наприклад, для резисторів типу МЛТ використовується ряд $E24$: 1; 1.1; 1.2; 1.3; 1.5; 1.6; 1.8; 2.0; 2.2; 2.4; 2.7; 3.0; 3.3; 3.6; 3.9; 4.3; 4.7; 5.1; 6.2; 6.8; 7.5; 8.2; 9.1. Номінальні потужності резисторів $P_{R.н}$ обирають як найближчі більші до розрахункових значень

$$P_{R.н} \geq P_R = RI_R^2. \quad (6.1.1)$$

Схемні позначення потужності резисторів на схемах зображені на рис. 6.1.1.

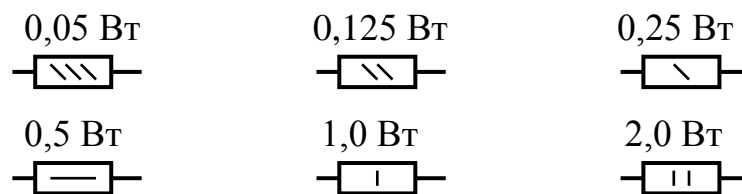


Рис. 6.1.1. Схемні позначення резисторів за шкалою потужностей

Якщо розрахункова потужність резистора перевищує 2 Вт (для резисторів типу МЛТ) використовують паралельне або послідовне підключення декількох резисторів для отримання необхідної еквівалентної потужності та опору.

Більшість транзисторних каскадів в схемах автомобільної електроніки працюють в ключових режимах, а вихідні транзисторні ключі комутують струм в індуктивному навантаженні (дискретне регулювання струму в обмотці збудження, комутація струму в котушці запалювання, вмикання струму в обмотках виконавчих реле автоматичних систем [7, 15]). Транзисторні пристрої автомобільної електроніки, що працюють у ключових режимах, переважно будують за схемою вмикання транзистора зі спільним емітером (див. рис. 1.2.11, б). Попередній розрахунок таких пристроїв виконують на підставі розрахункових схем в яких транзистори заміщають схемними моделями (1.2.14). Таким чином розрахунковий апарат на цьому етапі обмежується законами Ома та Кірхгофа для кіл постій-

ного струму і співвідношеннями параметрів транзистора (1.124). Приклад розрахунку схеми вихідного каскаду, що працює в ключовому режимі наведено в додатку посібника. Вихідні каскади пристроїв зазвичай будують на двох транзисторах (рис. 6.1.2).

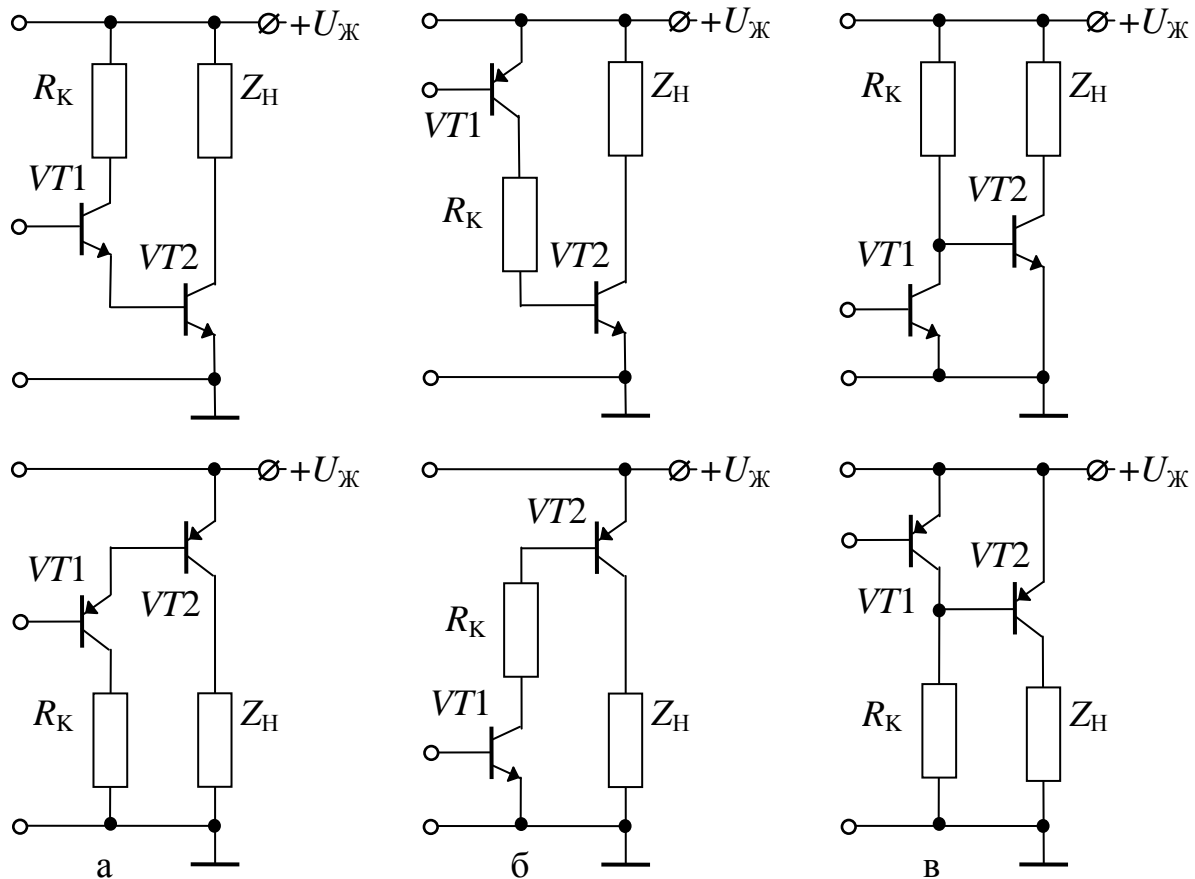


Рис. 6.1.2. Вихідні каскади на біполярних транзисторах:

а – каскадне синфазне включення транзисторів однакової структури; б – каскадне синфазне включення транзисторів різної структури; в – каскадне протифазне включення транзисторів

В синфазних схемах відчинений стан попереднього транзистора викликає відчинення послідуєчого. В протифазних – навпаки, відчинення попереднього викликає зачинення послідуєчого транзистора. Підсилюючий (попередній) транзистор $VT1$ дозволяє підвищити коефіцієнт передачі струму каскаду $\beta = \beta_1\beta_2$ та здійснити потрібний алгоритм вмикання навантаження Z_H .

Під час синтезування схеми електричної принципової ключового підсилювача (див. додаток) додержуються загальних правил:

- напрямок емітерних переходів транзисторів повинен співпадати з напрямком напруги живлення;

- резистори навантаження транзисторів включаються в колекторні кола (для схем включення транзистора зі спільним емітером);
- для синфазних включень, вихідний струм попереднього транзистора (колектора або емітера) складає струм бази послідуєчого транзистора;
- для протифазних включень, вихідна напруга попереднього транзистора складає вхідну напругу послідуєчого транзистора.

6.1.2. Визначення параметрів транзистора у ключових станах

Визначення параметрів великого сигналу транзистора можна робити декількома способами: за довідковими таблицями, на підставі робочих характеристик, шляхом натурального експерименту або віртуального моделювання. У сучасних довідниках не завжди наводяться значення параметрів, які характеризують транзистор в режимі насичення. Більш доступним є спосіб визначення цих параметрів на підставі робочих характеристик транзистора графоаналітичним способом (див. рис. 1.2.13).

При визначенні параметрів великого сигналу шляхом натурального експерименту або віртуального моделювання обраний тип транзистора підключають або моделюють його роботу в програмі згідно зі схемами рис. 6.1.3.

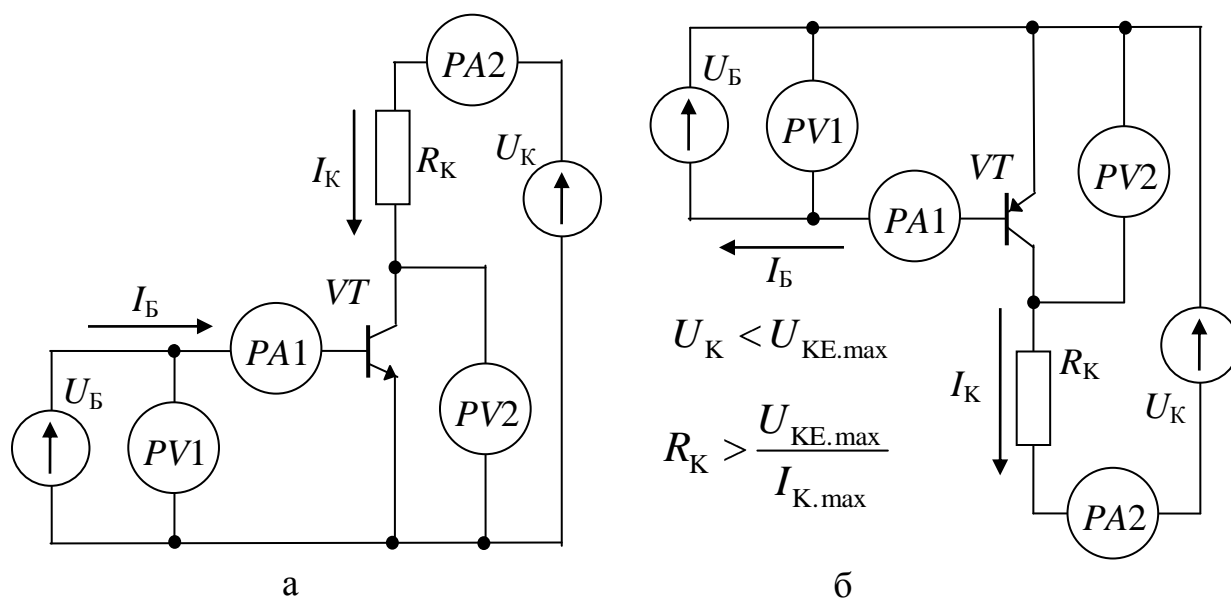


Рис. 6.1.3. Схеми вимірювання параметрів великого сигналу:
 а – транзисторів *n-p-n* структури; б – транзисторів *p-n-p* структури

В наведених схемах змінюють вхідну напругу U_B та реєструють показання вимірювальних приладів. За результатами експерименту записують значення параметрів великого сигналу в точках перегину перехідної характеристики транзистора: $U_{B0}(PV1)$, $U_{БЕН}(PV1)$, $I_{БН}(PA1)$, $U_{КЕН}(PV2)$, $I_{КН}(PA2)$. На підставі отриманих значень, згідно (1.124), визначають інваріантні параметри та розглядають відповідні схеми заміщення транзистора (див. рис. 1.2.14).

Зворотний струм колекторного переходу I_{K0} вимірюється під заданою напругою зворотного напрямку U_{KB} за умовою відсутності струму емітера (рис. 6.1.4, а).

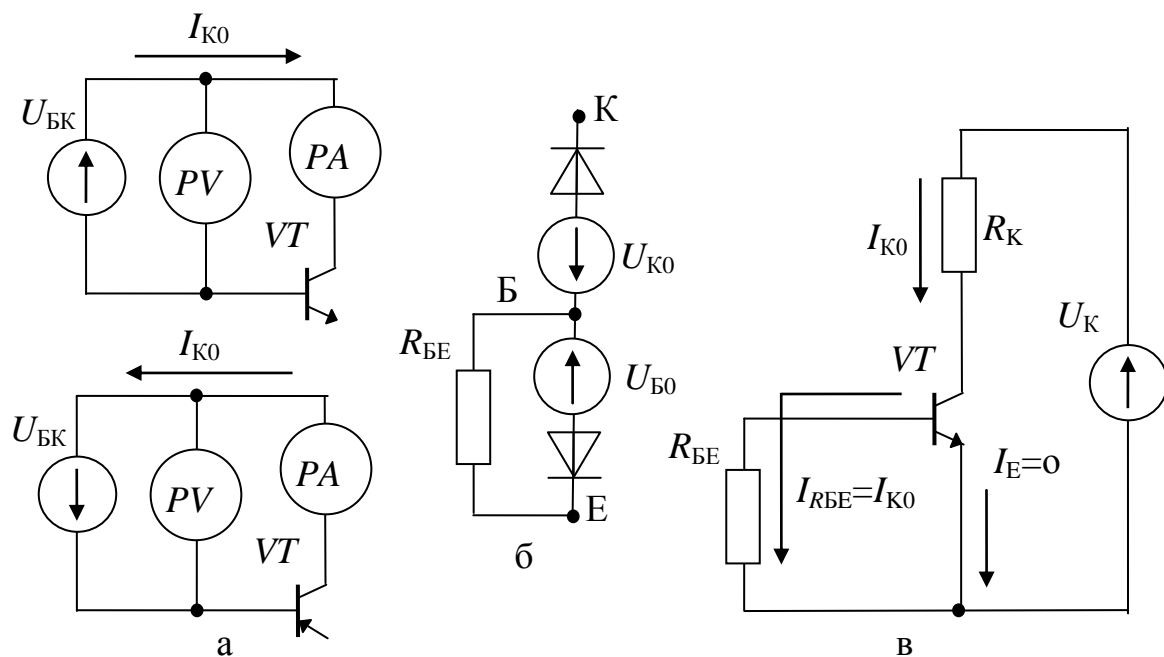


Рис. 6.1.4. Параметри транзистора в зачиненому стані:
 а – схеми вимірювання зворотного струму колектора; б – схема заміщення транзистора з шунтованим входом; в – схема електрична принципова транзисторного ключа

Слід зазначити, що струм I_{K0} викликаний не основними носіями зростає з підвищенням температури та погіршує ключову здатність транзистора в зачиненому стані. Для усунення цього ефекту вхід транзистора шунтують резистором R_{BE} (рис. 6.1.4, б, в).

Опір резистора, що шунтує, визначають через потенційний бар'єр емітерного переходу та величину зворотного струму колектора транзистора за умовою (4.3.1).

Ключову здатність транзисторних каскадів визначають за умовами переключення. Для синфазних схем (рис. 6.1.2, а, б) зворотний струм колектору зачиненого попереднього транзистора I_{K01} не повинен викликати струм бази послідуєного транзистора. З урахуванням протидіючої дії потенційного бар'єру емітерного переходу послідуєного транзистора U_{B02} ця умова запишеться

$$I_{K01} \cdot r_{BH2} < U_{B02}, \quad \text{або} \quad I_{K01} \cdot R_{BE2} < U_{B02} \quad (6.1.2)$$

Для протифазних схем (рис. 6.1.2, в), падіння напруги на виході попереднього транзистора U_{KE1} (у відчиненому стані) не повинно перевищувати потенційний бар'єр емітерного переходу наступного транзистора U_{B02}

$$I_{K1} \cdot r_{KH1} = U_{KE1} < U_{B02}, \quad (6.1.3)$$

Для поліпшення ключової здатності транзистора у відчиненому стані забезпечують певну ступінь його насичення (1.125). Час вмикання та зачинення транзистору при практичних розрахунках визначають на підставі його динамічних якостей $f_{гр}$ та режиму вмикання (ступеню насичення s)

$$t_{0/1} = \frac{1}{2\pi f_{гр}} \cdot \ln \frac{s}{s-1}, \quad t_{1/0} = \frac{0,7}{2\pi f_{гр}} \quad (6.1.4)$$

При цьому час розсмоктування зарядів в області бази підвищується залежно від ступеню насичення

$$t_{рз} = \frac{1}{2\pi f_{гр}} \cdot \ln \frac{s+1}{2}. \quad (6.1.5)$$

Ступінь насичення транзисторів в ключових пристроях обирають за рекомендованими значеннями в залежності від характеру навантаження транзистора, вимог до термостабільності та енергетичних міркувань. Слід зазначити, що підвищення рівня сигналу на вході транзистора, при забезпеченні заданого ступеня насичення, не повинно перевищувати максимально допустимих значень ($U_{BE.max}$, $I_{B.max}$) для обраного типу транзистора.

6.1.3. Розрахунок енергетичних показників

Енергетичний розрахунок електронного пристрою полягає у визначенні його ККД, струму спокою (без навантаження) та номінального струму споживання в робочому режимі.

Статичний коефіцієнт корисної дії для пристроїв, які працюють у ключових режимах, визначають в стані пристрою коли зовнішнє навантаження підключено

$$\eta_C = \frac{P_H}{P_H + \Delta P} 100\%, \quad (6.1.6)$$

де P_H – корисна потужність, що виділяється в зовнішньому навантаженні;

ΔP – потужність, яка розсіюється елементами схеми.

Динамічний коефіцієнт корисної дії для пристроїв, які працюють у ключових режимах під реактивним навантаженням визначають через енергію за період комутації

$$\eta_D = \frac{W_{EM}}{W_{EM} + \Delta W} 100\%. \quad (6.1.7)$$

де W_{EM} – електромагнітна енергія накопичена в зовнішньому навантаженні за період комутації;

ΔW – електромагнітна енергія, яка розсіюється на комутуючому пристрої за період комутації.

Потужність, яка розсіюється резистивними елементами в стаціонарному режимі визначається через значення постійного струму (6.1.1). Напівпровідникові пристрої також нагріваються під дією внутрішніх джерел тепла та характеризуються допустимим температурним діапазоном. В робочому температурному діапазоні напівпровідникові прилади зберігають працездатність та підтримують свої характеристики на рівні паспортних показників.

Температурний режим напівпровідникового приладу визначається потужністю теплових втрат на ньому та умовами охолодження. Потужність, яка розсіюється на елементі у вигляді теплової енергії залежить від режиму функціонування (гармонійний, ключовий, імпульсний) і характеру навантаження (активне, реактивне, компле-

ксне). Умови охолодження елемента визначаються температурою, швидкістю руху та теплопровідними якостями оточуючого середовища.

Тепловий розрахунок електронного пристрою полягає у визначенні теплових режимів його елементів з метою виключення можливості їх перегрівання (застосування радіаторів, вентиляційних отворів, кулерів примусового охолодження).

Під час дії імпульсного струму теплові втрати на транзисторі враховують через середньоквадратичні значення струму (1.21) в резистивних опорах по входу $r_{\text{вх}}$ та виходу $r_{\text{вих}}$ транзистора. При цьому розглядають окремі складові потужності

$$\begin{aligned} P_{VT} &= P_{\text{вх}} + P_{\text{вих}} = I_{\text{вх}}^2 r_{\text{вх}} + I_{\text{вих}}^2 r_{\text{вих}} = \\ &= \frac{r_{\text{вх}}}{T} \int_0^T [i_{\text{вх}}(t)]^2 dt + \frac{r_{\text{вих}}}{T} \int_0^T [i_{\text{вих}}(t)]^2 dt = P_{\text{пр}} + P_{\text{ком}} + P_{\text{кер}} + P_0, \end{aligned} \quad (6.1.8)$$

де $P_{\text{пр}}$ - потужність провідності, що розсіюється на транзисторі в стані насичення;

$P_{\text{ком}}$ - потужність комутації, що розсіюється в процесі переходу транзистора з одного ключового стану в інший;

$P_{\text{кер}}$ - потужність керування, яка витрачається на вході транзистора (в колі бази);

P_0 - потужність втрат в зачиненому стані транзистора спричинена зворотним струмом колекторного переходу.

В схемах з активним навантаженням транзисторного ключа ($Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$) форма імпульсів струму при комутаційному процесі (в достатньому наближенні) може бути надана у вигляді рівносторонньої трапеції (рис. 6.1.5).

Виходячи з рівності площ трикутників (в періоди часу переключення $t_{0/1} = t_{1/0}$), середньоквадратичне значення струму I можна визначити як для імпульсів прямокутної форми зі шпаруватістю $\gamma_3 = t_i / T$, ($I = I_{\text{max}} \sqrt{\gamma_3}$). Таким чином складові потужності провідності $P_{\text{пр}}$ та комутації $P_{\text{ком}}$ визначаються через параметри великого сигналу транзистора (1.124)

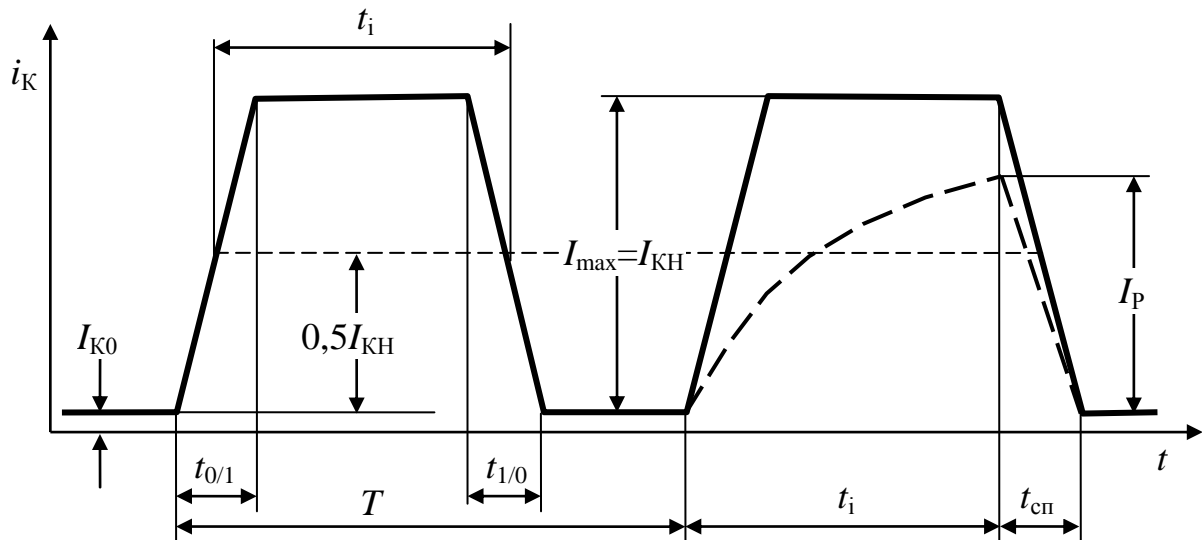


Рис. 6.1.5. Часові діаграми струму через транзисторний ключ

$$P_{\text{пр.}R} + P_{\text{ком.}R} = \frac{U_{\text{КН}}}{T} \int_0^{t_i} i_{\text{К}} t dt \approx r_{\text{КН}} \gamma_3 I_{\text{КН}}^2 = r_{\text{КН}} \gamma_3 \left(\frac{U_{\text{Ж}}}{R_{\text{Н}} + r_{\text{КН}}} \right)^2. \quad (6.1.9)$$

Складову потужності керування $P_{\text{кер}}$ визначають з врахуванням ступеню насичення транзистора s через вхідні параметри великого сигналу, а потужність, що розсіюється в стані відсічки P_0 — через параметри постійного струму (див. рис. 6.1.4)

$$P_{\text{кер}} + P_0 \approx r_{\text{БН}} \gamma_3 s I_{\text{БН}}^2 + U_{\text{Ж}} I_{\text{К0}} \sqrt{1 - \gamma_3}. \quad (6.1.10)$$

При практичних розрахунках складовою потужності P_0 зазвичай нехтують.

При індуктивно-активному навантаженні, потужність провідності транзисторного ключа розсіюється під час його відчиненого стану (стану насичення) на активних складових опорі кола комутації $R_{\text{Н}}, r_{\text{КН}}$. Швидкість зростання струму $i_1 = i_{\text{К}}$ при цьому (без врахування бар'єрної ємності колекторного переходу) визначається постійною часу кола $\tau_{\text{LR}} = L_{\text{Н}} / (R_{\text{Н}} + r_{\text{КН}})$. Якщо $\tau_{\text{LR}} \gg t_{0/1}$ (як в первинному колі системи запалювання), потужність комутації на період часу $t_{0/1}$ спростовують. В такому разі потужність провідності визначається через функцію струму (1.53) на час накопичення енергії t_i (див. рис. 6.1.5, позначено штриховою)

$$P_{пр.LR} = \frac{r_{KH}}{T} \int_0^{t_i} [i_K t]^2 dt = \frac{r_{KH} \gamma_3 U_{AB}^2}{R_H + r_{KH}} \int_0^{t_i} \left[1 - \exp\left(-t \frac{R_H + r_{KH}}{L_H}\right) \right]^2 dt, \quad (6.1.11)$$

Потужність комутації, яка розсіюється транзистором під час його запирання під індуктивно-активним навантаженням $P_{КОМ.LR}$ визначається через енергію, яка встигла накопичиться за період відчиненого стану t_i за винятком потужності, що розсіюється на активному опорі навантаження R_H за час спадання струму $t_{1/0} = t_{сп}$ (4.2.27)

$$P_{КОМ.LR} = W_L f_{КОМ} - R_H I_{1/0}^2 = I_P^2 f_{КОМ} \left(\frac{L_H}{2} - \frac{R_H t_{1/0}}{3} \right), \quad (6.1.12)$$

де I_P - сила струму розриву (4.2.2) на час $t_3 = t_i$.

$I_{1/0} = I_P \sqrt{t_{0/1} f_{КОМ} / 3}$ - середньоквадратичне значення імпульсного струму (форми прямокутного трикутника) зі шпаруватістю $\gamma_{КОМ} = t_{0/1} / T$ (див. рис. 6.1.5).

Складаючи (6.1.10)...(6.1.12) після деяких перетворень отримаємо формулу для розрахунку загальної потужності теплових втрат на комутуючому транзисторі під активно-індуктивним навантаженням

$$P_{VT} = r_{KH} I^2 + r_{KH} \gamma_3 I_P^2 f_{КОМ} \left(\frac{3L_H - 2R_H t_{1/0}}{6} \right) + \frac{r_{BH} \gamma_3 s^2}{\beta_C^2} I_{KH}^2. \quad (6.1.13)$$

де β_C - статичний коефіцієнт підсилювання струму (1.124).

З метою аналізу температурного стану обраного типу транзистора в робочих діапазонах функціонування, струм розриву та середньоквадратичний струм колектора в (6.1.13) визначають через режимні параметри $\gamma_3, f_{КОМ}$

$$I_P = I_{KH} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_3}{\tau_{LR} f_{КОМ}}\right) \right], \quad (6.1.14)$$

$$I = I_{\text{KH}} \sqrt{\gamma_3} \sqrt{1 - \frac{\tau_{LR} f_{\text{КОМ}} \left[\exp\left(\frac{-\gamma_3}{\tau_{LR} f_{\text{КОМ}}}\right) - 3 \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{-\gamma_3}{\tau_{LR} f_{\text{КОМ}}}\right) - 1 \right]}{2\gamma_3}}$$

Слід додати, що в схемах де активно-індуктивне навантаження транзистора шунтовано фіксуючим діодом (як в колах збудження регуляторів напруги) потужність, яка розсіюється під час запирання транзистора визначається як при активному навантаженні

$$P_{\text{КОМ.LD}} = 0,5U_{\text{Ж}} I_{\text{P}} t_{\text{СП}} f_{\text{КОМ}} \approx 0,5U_{\text{Ж}} I_{\text{P}} t_{1/0} f_{\text{КОМ}}. \quad (6.1.15)$$

Наведений аналіз показує, що потужність теплових втрат на комутуючому транзисторі визначається режимом комутації струму та залежить від параметрів навантаження та статичних і динамічних характеристик транзистора.

6.1.4. Розробка конструкції пристрою

До конструктивних елементів електронного пристрою відносять: плати печатного монтажу з радіоелектронними компонентами, органи керування і індикації, пристрої приєднання до зовнішніх кіл, елементи автономного живлення, корпусні елементи. Пристрої автомобільної електроніки в більшості являють електронні блоки автоматичного керування в корпусі яких розміщують тільки печатний вузол та рознімання зовнішніх підключень (кола живлення, датчиків, виконавчих пристроїв).

Компоновка елементів електронного пристрою в корпусі повинна бути раціональною з позицій заповнення робочого об'єму корпуса та умов теплообміну між елементами і оточуючим середовищем. Конструктивні особливості електронних пристроїв визначаються експлуатаційними вимогами та обмеженнями (див. рис. 1.1.1). Згідно загальним технічним умовам на автотракторне електрообладнання [26] з боку кліматичного виконання, захисного виконання, дії механічних впливів та агресивного середовища висуваються певні вимоги, щодо конструкції корпусу.

Процес розробки плати печатного монтажу можна поділити на декілька етапів: обґрунтування конструктивних показників, компо-

новка елементів, трасування провідників, конструкторсько-технологічні розрахунки.

Обґрунтування конструктивних показників печатної плати полягає у виборі: типу печатної плати (одностороння, двостороння, багатошарова); класу точності виготовлення; габаритних розмірів і конфігурації; матеріалу та товщини підстави. Залежно від умов експлуатації пристрою на цьому етапі визначають групу жорсткості конструкції плати, необхідність в додатковому захисті від кліматичних, механічних і інших впливів.

Під час компоновки елементів схеми пристрою на платі додержуються певних правил:

- елементи, що мають зовнішні зв'язки, розміщують поблизу рознімання;
- забезпечують мінімальні довжини гальванічних зв'язків та мінімальну кількість переходів печатних провідників з шару на шар;
- забезпечують рівномірний розподіл мас навісних елементів з орієнтацією на місця механічного кріплення плати.

Трасування провідників і розміщення елементів провідного рисунка на печатній платі зводяться до визначення діаметрів монтажних отворів, розмірів і конфігурації печатних провідників, конструктивних отворів та контактних площадок.

Конструкторсько-технологічні розрахунки дозволяють визначити механічні, теплові та струмові навантаження елементів схеми та монтажу. За результатами порівняння фактичних (розрахованих) навантажень з їх допустимими значеннями коректують конструкцію електронного пристрою в процесі його розробки.

Розрахунок виводів навісних елементів на міцність (стійкість) полягає у визначенні згинаючої напруги (моментів), що виникають під дією заданого прискорення (згідно умов експлуатації). Вразі, якщо розраховані значення силових величин перевищують допустимі значення для матеріалу виводів елементів, приймають рішення, щодо підвищення міцності монтажу (покриття плат лаком, заливка елементів компаундом, використання монтажних стійок, застосування інших типів елементів).

Розрахунок печатної плати на міцність та жорсткість полягає у визначенні мінімальної товщини матеріалу печатної плати, яка здатна витримувати навантаження без руйнування та прогинання. Пе-

ревірку проводять за допустимою згинаючою напругою для матеріалу плати і допустимим прогинанням (не більше 2% від меншої сторони печатної плати).

Вібраційний розрахунок печатного вузла складається з визначення частоти власних коливань і вибору амортизаторів для установки пристрою на рухомому об'єкті. Якщо власна частота коливань печатного вузлу знаходиться за межами діапазону діючих на пристрій частот вібрації (умови експлуатації), резонансні явища не виникають. Якщо навпаки, обирають тип амортизаторів за розрахунковими значеннями сил реакцій і величиною статичного прогинання. Віброізоляція вважається ефективною, якщо розрахована амплітуда вібрації пристрою не перевищує 5% амплітуди вібрації за умовами експлуатації.

Електричний розрахунок монтажу печатної плати дозволяє оцінити правильність вибору класу точності виготовлення печатної плати і товщини струмопровідного шару. Перевірка виконується за допустимою щільністю струму та допустимим падінням напруги в печатному провіднику. За результатами розрахунку коректують товщину фольгового покриття плати і ширину печатних провідників.

Тепловий розрахунок пристрою дозволяє встановити розподіл температур на поверхні печатного вузлу й корпусу при заданих експлуатаційних умовах та режимах.

Для оцінки теплового режиму і вибору способу охолодження пристрою в технічному завданні на розробку конструкції треба визначити: сумарну потужність, що розсіюється елементами схеми в номінальному режимі функціонування; діапазон коливань температури навколишнього середовища за умовами експлуатації; час безперервної роботи за режимом експлуатації; допустимі робочі температури елементів схеми за паспортними даними; коефіцієнт заповнення об'єму пристрою, виходячи з габаритних розмірів. Габаритні розміри корпусу та спосіб охолодження пристрою на етапі попереднього проектування обирають за результатами оцінки питомої (поверхневої) потужності.

Перевірочний розрахунок теплового режиму пристрою проводять в два етапи. Спочатку визначають середньоповерхневі температури нагрітої зони печатного вузлу та поверхні корпусу. Як результат отримують температуру повітря усередині пристрою. Потім

розраховують середньоповерхневі температури елементів схеми та порівнюють їх з допустимими значеннями робочих температур. Якщо розрахункові температури перевищують допустимі значення, в конструкції пристрою передбачають необхідні заходи (примусове охолодження, вентиляційні отвори, радіатори).