

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННИХ КЛЮЧІВ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи, особливостями розрахунку і побудови схем електронних ключів на біполярних транзисторах. Дослідити роботу способів підвищення швидкодії транзисторних ключів.

Теоретичні положення

Особливості роботи транзистора в ключовому режимі

Найпростішою реалізацією електронного ключа є транзисторний каскад із загальним емітером (ЗЕ), представлений на рис.1. Вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ при цьому визначається положенням робочої точки, яка в свою чергу залежить від струму бази. Рух робочої точки при зміні струму бази відбувається за певною траєкторією ab (навантажувальної прямої) положення якої визначається напругою E_K і опором в колі колектора R_K .

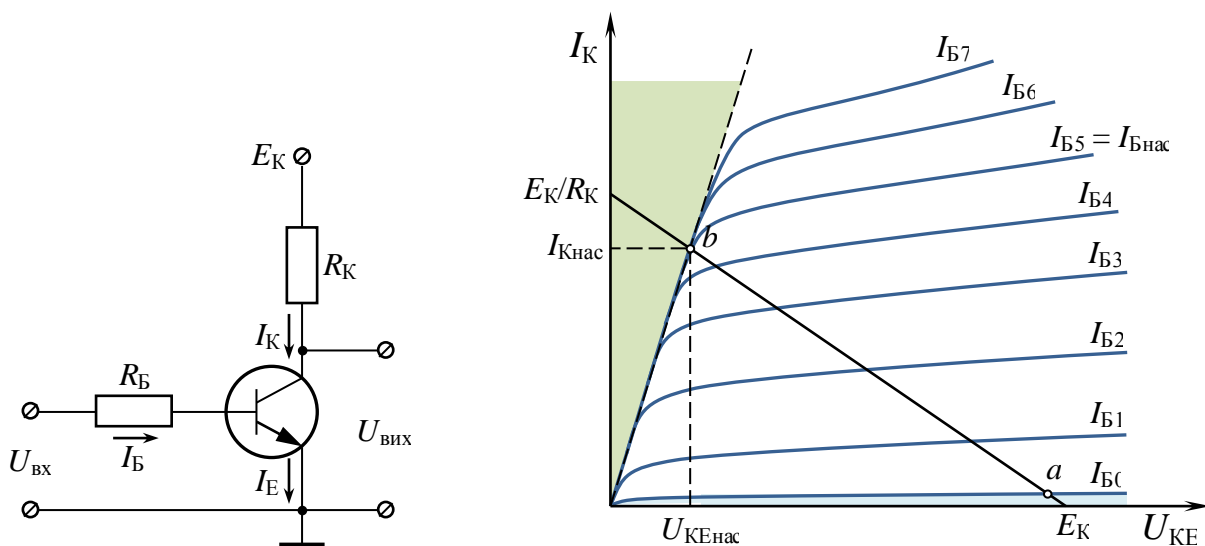


Рис.1. – Транзисторний каскад із загальним емітером

При роботі в якості електронного ключа біполярний транзистор може знаходитися в трьох режимах: відсічення (ключ закрито) точка a , $U_{\text{вих}} \approx E_K$, $I_K \approx 0$, насичення (ключ відкритий) точка b , $U_{\text{вих}} = U_{KE_{\text{нас}}}$, $I_K \approx E_K/R_K$, і активному режимі (при переході із закритого стану у відкритий і назад). Відомо що:

- режим відсічення – емітерний і колекторний переходи транзистора замкнено;
- активний режим – емітерний перехід відкрито, а колекторний замкнено;
- режим насичення – обидва переходи відкриті.

Для електронних ключів активний режим є не вигідним, оскільки в цьому режимі на колекторі розсіюється значна потужність, що знижує ККД схеми і викликає нагрів транзистора. Тому активний режим допустимий тільки протягом перехідних процесів, тривалість яких, по можливості, необхідно

зробити якомога менше.

При недостатньому струмі бази I_B відкритий транзистор може знаходитися в активному режимі. Для забезпечення насичення необхідно, щоб виконувалося співвідношення $I_B > I_{Bнас}$. Струм бази можна визначити за формулою:

$$I_B = \frac{U_{вх} - U_{BEнас}}{r_B + R_B}.$$

Струм насичення визначається опором резистора в колі колектора, підсилювальними властивостями транзистора і опором між колектором і емітером в насиченому стані:

$$I_{Bнас} = \frac{I_{Kнас}}{\beta} = \frac{E_K - U_{KEнас}}{\beta R_K}.$$

При розрахунках доцільно користуватися найгіршим значенням $\beta = \beta_{min}$. Співвідношення $I_B/I_{Bнас}$ називають ступенем насичення транзистора $q_{нас}$. З одного боку транзистор повинен бути надійно відкритий, оскільки, як зазначалося вище, при порушенні умови насичення транзистор переходить в активний режим, що супроводжується зростанням напруги на колекторі і збільшенням потужності розсіювання. З іншого – глибоке насичення транзистора призводить до зниження швидкодії ключового каскаду. Зазвичай на практиці ступінь насичення транзистора вибирають в межах від 1,5 до 3.

В режимі насичення вихідне коло транзистора можна уявити еквівалентним джерелом напруги, величина ЕРС якого наводиться в довідниках $U_{KEнас}$. Варто було б також враховувати внутрішній опір цього джерела, величина якого визначається крутизною нахилу лінії граничного режиму. Однак, в більшості практичних випадків для інженерних розрахунків можна обмежитися величиною $U_{KEнас}$.

Резистори R_B і R_K повинні забезпечувати надійне замикання транзистора при низькому рівні сигналу у всьому діапазоні робочих температур і насичення при високому рівні керуючого сигналу. При розрахунку необхідно враховувати зворотний струм колектора I_{KB0} , що протікає через резистор R_B , і створює на ньому падіння напруги. Сумарна напруга на емітерний перехід визначається виразом:

$$U_{BE} = U_0 + I_{KB0max} R_B,$$

де I_{KB0max} – максимальний зворотний струм колектора;

U_0 – напруга низького рівня, сигналу що управляє.

Очевидно, для надійного замикання транзистора необхідно, щоб $U_{BE} < U_{BEвідс}$. Слід враховувати сильну температурну залежність зворотного струму колектора, і для розрахунку вибирати максимальне значення. В іншому випадку ключ може «підтікати» при зміні температури.

Динамічні властивості транзисторного ключа

Необхідною частиною проектування електронних ключів є оцінка їх динамічних властивостей, що визначають швидкість перемикання і втрати енергії на цьому етапі (динамічні втрати).

Роботу транзистора в ключовому режимі під дією вхідної напруги прямокутної форми можна розділити на кілька окремих етапів рис. 2. Спочатку транзистор замкнено, струм бази визначається зворотним струмом колектора, заряд в базі практично відсутній, на виході ключа високий рівень.

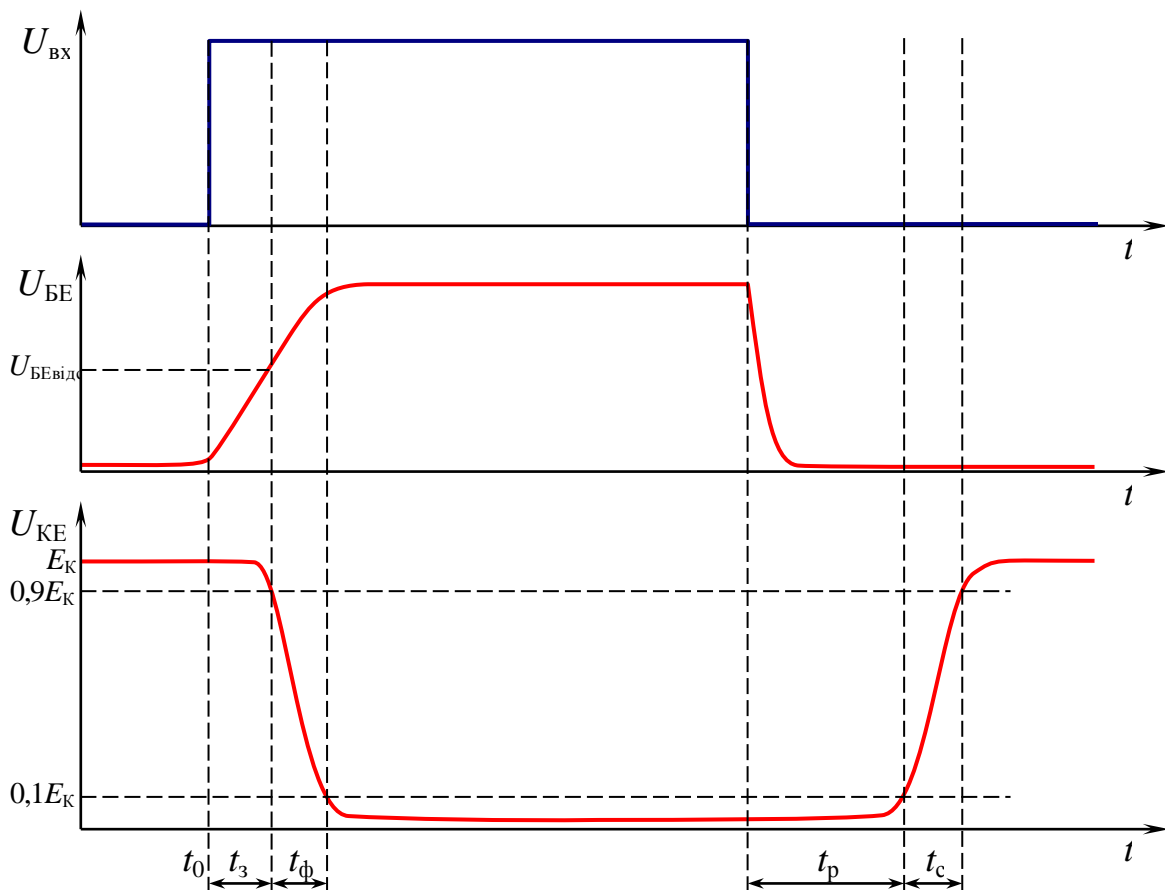


Рис.2. – Перехідні процеси в ключі на біполярному транзисторі

Нехай в момент часу t_0 потенціал на вході ключа стрибкоподібно збільшується, починається заряд вхідної ємності транзистора, напруга база-емітер U_{BE} поступово наростає. Струми бази і колектора не змінюються, поки напруга на переході база-емітер не перевищить напруги відсічення U_{B0} . Цей інтервал t_3 називають *часом затримки включення* транзистора або *часом підготовки*. На практиці його вимірюють як час, за який вихідна напруга спадає на 10%, тобто до $0,9 E_K$.

З моменту перевищення напруги відсічення починається процес відмикання, швидкість якого тим більше, чим вище амплітуда вхідної напруги, транзистор переходить в активний режим. Неосновні носії, що інжектуються в базу порушують рівноважний стан бази, і починається накопичення заряду. Пропорційно збільшується струм колектора, обумовлений екстракцією носіїв в

область колектора. Час t_{ϕ} до переходу в режим насичення називається *часом формування фронту імпульсу* або *час включення*. За час включення вихідна напруга змінюється від $0,9E_K$ до $0,1E_K$.

В режимі насичення всі струми і напруги залишаються постійними, при цьому заряд в базі продовжує наростати, хоча і з меншою швидкістю. Заряд, що перевищує величину, відповідну переходу в режим насичення, називається надлишковим.

Стрибокподібне зниження напруги на вході ключа призводить до швидкого зниження струму бази, порушується рівноважний стан заряду бази і починається його розсмоктування. Транзистор залишається насиченим, а тому проводить, до тих пір, поки заряд не зменшиться до граничної величини. Після чого транзистор переходить в активний режим. Час t_3 , протягом якого відбувається розсмоктування накопиченого заряду бази, називається *часом розсмоктування* або *часом затримки вимкнення* транзистора і визначається як час з моменту перекидання вхідного сигналу до моменту досягнення вихідної напруги рівня $0,1 E_K$.

В період часу t_c відбувається формування зрізу імпульсу, транзистор знаходиться в активному режимі заряд бази і струм колектора зменшуються до тих пір, поки транзистор не перейде в режим відсічення. Час виключення транзистора визначається як період, протягом якого вихідна напруга змінюється від $0,1E_K$ до $0,9E_K$.

Після переходу транзистора в режим відсічення напруга на виході зростає до E_K , заряджається ємність колекторного переходу.

Час розсмоктування t_p зазвичай істотно перевищує часові інтервали t_3 , t_{ϕ} і t_c , очевидно, що ключову роль тут грає ступінь насичення транзистора $q_{\text{нас}}$.

При розрахунку і аналізі високочастотних схем необхідно також враховувати процеси заряду ємностей монтажу і навантаження, які не мають прямого відношення до транзистора, але можуть істотно впливати на тривалість перехідного процесу в цілому.

Вплив зміни параметрів схеми ключа на його роботу

Значення параметрів елементів і напруг в схемі транзисторного ключа істотно впливають на тривалість перехідних процесів.

Зміна параметрів колекторного кола R_K і E_K призводить до зміни струму $I_{K_{\text{нас}}}$ і впливає на тривалість всіх трьох процесів. Наприклад, зменшення E_K до E'_K (рис.3) веде до зменшення струму колектора з $I_{K_{\text{нас}}}$ до $I'_{K_{\text{нас}}}$. У колі з незмінною постійною часу це призведе до зменшення тривалості фронту, проте транзистор виходить на кордон насичення при меншому струмі бази I_{B4} , тому подальше збільшення струму бази (при незмінних значеннях $U_{\text{вх}}$ і R_B) викликає накопичення надлишкового заряду, що веде до збільшення часу розсмоктування.

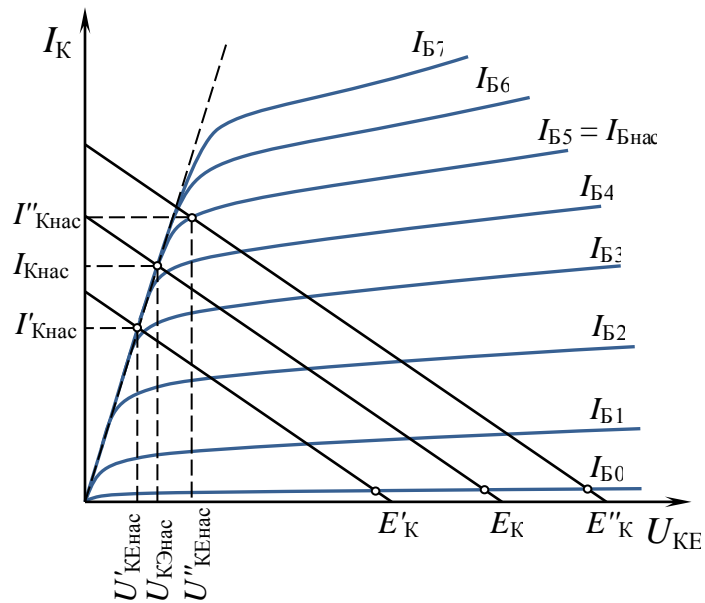


Рис.3. – Вплив зміни E_K на вихідні характеристики ключа

Збільшення E_K до E''_K (рис.3) призведе до зростання струму колектора з $I_{Кнас}$ до $I''_{Кнас}$ і відповідно матиме зворотний вплив на тимчасові процеси перемикавання ключа. Однак при незмінних значеннях $U_{вх}$ і R_B , струму бази I_{B5} буде недостатньо для досягнення кордону насичення, і транзистор буде знаходитися в активному режимі. Збільшення напруги колектор-емітер до $U''_{КЕнас}$ призведе до збільшення потужності, що розсіюється транзистором і відповідно до його нагрівання.

Аналогічний вплив на роботу транзисторного ключа має зміна опору R_K , що визначає кут нахилу навантажувальної прямої, а відповідно і значення $I_{Кнас}$.

Струм включення транзисторного ключа I_B знаходиться в безпосередній залежності від амплітуди вхідного сигналу $U_{вх}$ і опору в колі бази R_B . Збільшення швидкості наростання струму бази призводить до зменшення часу включення транзистора, але при більшому значенні I_B тривалість розсмоктування збільшується внаслідок накопичення надлишкового заряду.

Розглянуті приклади показують, що зміна параметрів схеми транзисторного ключа не дозволяє помітно підвищити його швидкість, оскільки при незмінній споживаній потужності зменшення тривалості одних процесів супроводжується збільшенням тривалості інших. Для підвищення швидкості використовують різні схемотехнічні способи запобігання глибокого насичення транзистора, такі як коло, що форсує (рис.4) і нелінійний зворотний зв'язок (рис.5).

Схеми ключів з підвищеною швидкістю

Ключ з ємністю, що форсує

Аналіз роботи транзисторного ключа показує, що його швидкість можна збільшити, перемикаючи його струмом бази $I_{Bт}$, часова діаграма якого представлена на рис.4,а. В момент t_1 , для прискорення процесу, на базу

транзистора подається великий струм $I_{Б1}$, потім, в момент часу t_2 , струм зменшується до значення $I_{Б2}$, тобто транзистор виводиться на межу режиму насичення для зменшення часу розсмоктування. В момент t_3 транзистор закривається великим зворотним базовим струмом $I_{Б3}$.

Форму струму, близьку до оптимальної, можна отримати застосовуючи схему ключа з ємністю, що форсує (прискорює) (рис.4, б). Принцип роботи кола, що форсує очевидний: при подачі вхідного сигналу розряджений конденсатор шунтує резистор в колі бази, пропускаючи імпульс струму $I_{Бр}$ в базове коло (рис.4, а). В перший момент часу цей струм обмежується тільки внутрішнім опором джерела вхідного сигналу. Він швидко заряджає бар'єрні ємності і накопичує заряд в базі транзистора, це дозволяє прискорити перехід транзистора в режим насичення. Завдяки великому струму час затримки включення і формування фронту імпульсу істотно зменшуються.

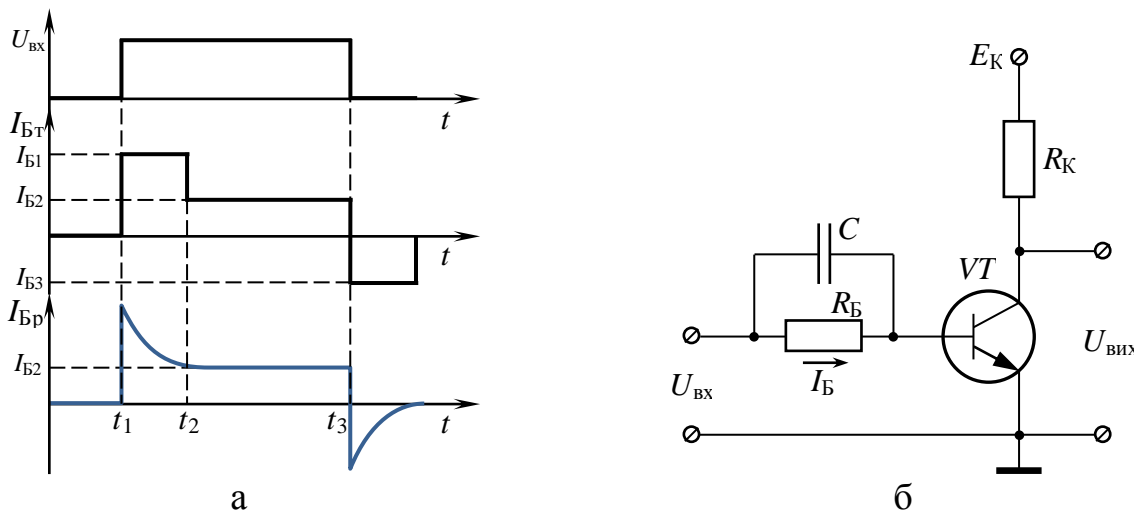


Рис.4. – Ключ з ємністю, що форсує:
а – діаграми вхідних сигналів; б – схема ключа

У міру заряду конденсатора струм бази зменшується до значення $I_{Б2}$, що визначається опором $R_{Б}$, величина якого вибирається таким чином, щоб забезпечити неглибоке насичення транзистора, що дозволяє прискорити розсмоктування неосновних носіїв в базі та зменшити час вимкнення транзистора.

Ємність конденсатора C повинна задовольняти суперечливі умови – з одного боку, занадто мале її значення призводить до того, що тривалість сплесків струмів буде менше, ніж тривалість процесів перемикання, яку вони зменшують. При цьому процес перемикання буде протікати при порівняно малих струмах бази і прискорюватися не буде. З іншого боку, не можна вибирати конденсатор, що прискорює і занадто великої ємності, оскільки, по-перше, струм бази не буде встигати зменшитися до рівня $I_{Б2}$ до кінця вхідного імпульсу, і в базі буде накопичуватися надмірний заряд; по-друге, конденсатор не встигатиме заряджатися до рівня вхідного імпульсу до моменту його закінчення – процеси розсмоктування і включення будуть протікати повільніше.

Ключ з нелінійним зворотним зв'язком

Забезпечити великий базовий струм включення і одночасно зменшити час розсмоктування можна, використовуючи схему ключа з негативним зворотним зв'язком, в якій не допускається режим глибокого насичення транзистора. Нелінійний негативний зворотний зв'язок здійснюється через діод VD , включений між базою і колектором транзистора (рис.5).

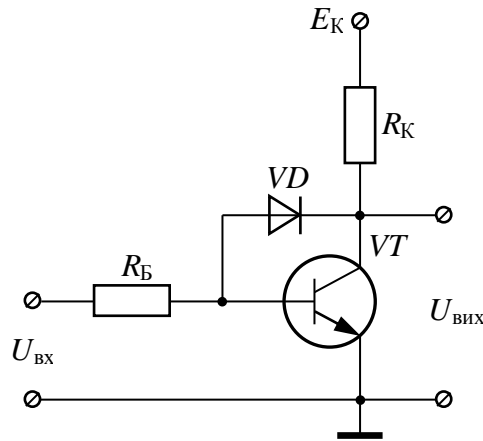


Рис.5. – Ключ з нелінійним зворотним зв'язком

Стан діода визначається полярністю і величиною напруги, що діє між анодом і катодом. У початковому стані діод закритий за рахунок високого позитивного потенціалу на катоді. Негативний зворотний зв'язок не діє. При подачі вхідного сигналу струм спочатку протікає через $R_Б$ в базу транзистора, забезпечуючи великий струм включення. При відмиканні транзистора напруга колектор-емітер зменшується прагнучи до 0. Коли потенціал на колекторі стане менше потенціалу бази, діод виявляється зміщеним в прямому напрямку, а транзистор охоплений негативним зворотним зв'язком (частина вхідного струму буде протікати через діод і колектор транзистора на землю в обхід бази). В результаті струм бази зменшується до значення $I_Б \leq I_{Бнас}$, і транзистор не входить в насичення.

Для роботи ключа з нелінійним зворотним зв'язком необхідно, щоб діод, включений паралельно колекторного переходу транзистора, відкривався при порівняно малій напрузі, коли колекторний перехід ще закритий. А для зменшення часу вимикання необхідно забезпечити малий час відновлення зворотного опору діода. Тому в якості діода зворотного зв'язку переважно застосовують діоди з бар'єром Шотки, які мають низьке значення падіння напруги в прямому включенні (0,5...0,7 В) і більш високі частотні характеристики, ніж у звичайних випрямних діодів.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати генератор сигналів і осцилограф до роботи:
 - обидва канали осцилографа переключити в режим DC ;
 - за допомогою плати розгалужувача з'єднати вихід генератора і вхід I каналу осцилографа;

- включити прилади;
 - за допомогою ручки "FUNCTION" генератора встановити прямокутну форму імпульсу;
 - за допомогою ручок "RANGE" та "FREQUENCY" встановити частоту сигналу 10 кГц;
 - ручку "OFFSET" витягнути на себе;
 - за допомогою ручок "AMPL" і "OFFSET" отримати на екрані осцилографа позитивний однополярний сигнал амплітудою 5 В.
2. Зібрати схему, представлену на рис.6.
 3. Дослідити роботу електронного ключа при малому струмі бази:
 - 3.1 Встановити на досліджуваній схемі перемичку J2;
 - 3.2 Ручкою "НАПРЯЖЕНИЕ" джерела живлення встановити $U_{KE} = 10$ В;
 - 3.3 Включити генератор імпульсів;
 - 3.4 Змінюючи опір в колі колектора, по черзі підключаючи резистори R_{K1} , R_{K2} і R_{K3} за допомогою відповідних перемичок J5, J6 і J7, виміряти часові параметри роботи ключа згідно рис.2. отримані дані занести в табл.1;
 - 3.5 Підключити резистор R_{K2} за допомогою перемички J5;
 - 3.6 Змінюючи напругу U_{KE} ручкою "НАПРЯЖЕНИЕ" джерела живлення, виміряти часові параметри роботи ключа згідно рис.2. отримані дані занести в табл.2;
 - 3.7 Скинути напругу джерела живлення в 0, вимкнути генератор.
 4. Дослідити роботу електронного ключа при великому струмі бази:
 - 4.1 Встановити на досліджуваній схемі перемичку J3;
 - 4.2 Повторити дослід відповідно до пунктів 3.2 – 3.7.
 5. Дослідити роботу електронного ключа з ємністю, що форсує:
 - 5.1 Встановити на досліджуваній схемі перемички J1 і J3;
 - 5.2 Повторити дослід відповідно до пунктів 3.2 – 3.7.
 6. Дослідити роботу електронного ключа з нелінійним зворотним зв'язком:
 - 6.1 Встановити на досліджуваній схемі перемички J3 і J4;
 - 6.2 Повторити дослід відповідно до пунктів 3.2 – 3.7.

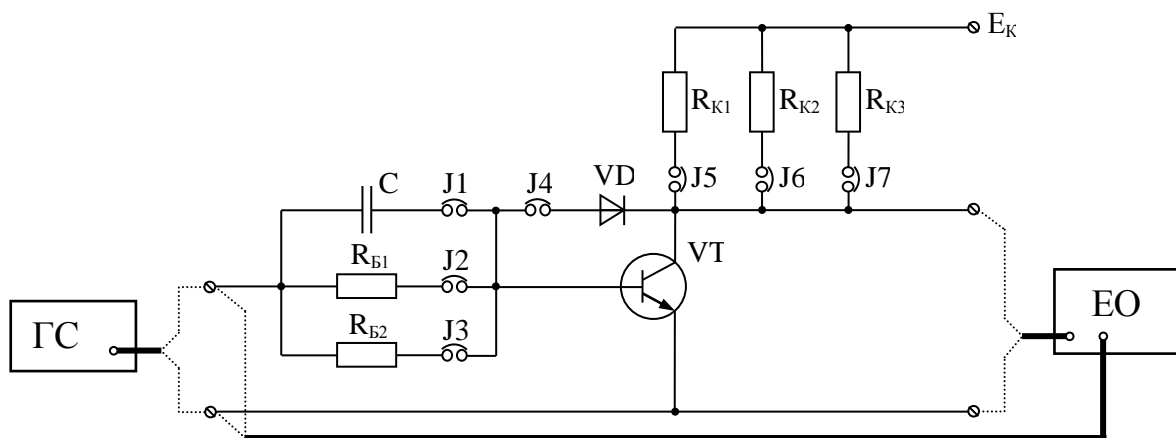


Рис.6 – Схема для дослідження роботи транзисторного ключа

Таблица 1

	R_{K1}	R_{K2}	R_{K3}	при $U_{KE} = 10 \text{ В}$
t_3 , мкс				
t_ϕ , мкс				
t_p , мкс				
t_c , мкс				

Таблица 2

U_{KE} , В	10	12	14	16	18	20	при R_{K2}
t_3 , мкс							
t_ϕ , мкс							
t_p , мкс							
t_c , мкс							