

*Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потєбні*

*Кафедра: Електроніки, інформаційних систем та програмного
забезпечення*

Практичне заняття 5

з дисципліни Аналогова та оптохемотехніка

Силові прилади аналогової схемотехніки

Студента (ки) 2 курсу, групи _____

(прізвище та ініціали)

Викладач _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Метою вивчення теми: вивчення принципів дії та основних властивостей тиристорів; дослідження їх вольт-амперних характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням.

Ключові терміни та поняття: р-п перехід, катод, анод, диністор, симістор, електрод.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти принципи дії тиристорів.
2. Засвоїти режими тиристорів.
3. Засвоїти схеми включення і статичні характеристики тиристорів.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

Тиристор – електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з трьома і більш р-п переходами, який володіє здатністю примусового перемикання з одного стійкого стану (відсічення) в інше (насичення).

Тиристори підрозділяються на діодні (диністори), які мають два виводи (анод А і катод К) і триодні (триністори), які мають три виводи, (анод А, катод К і управляючий електрод У (рис. 5.1 а).

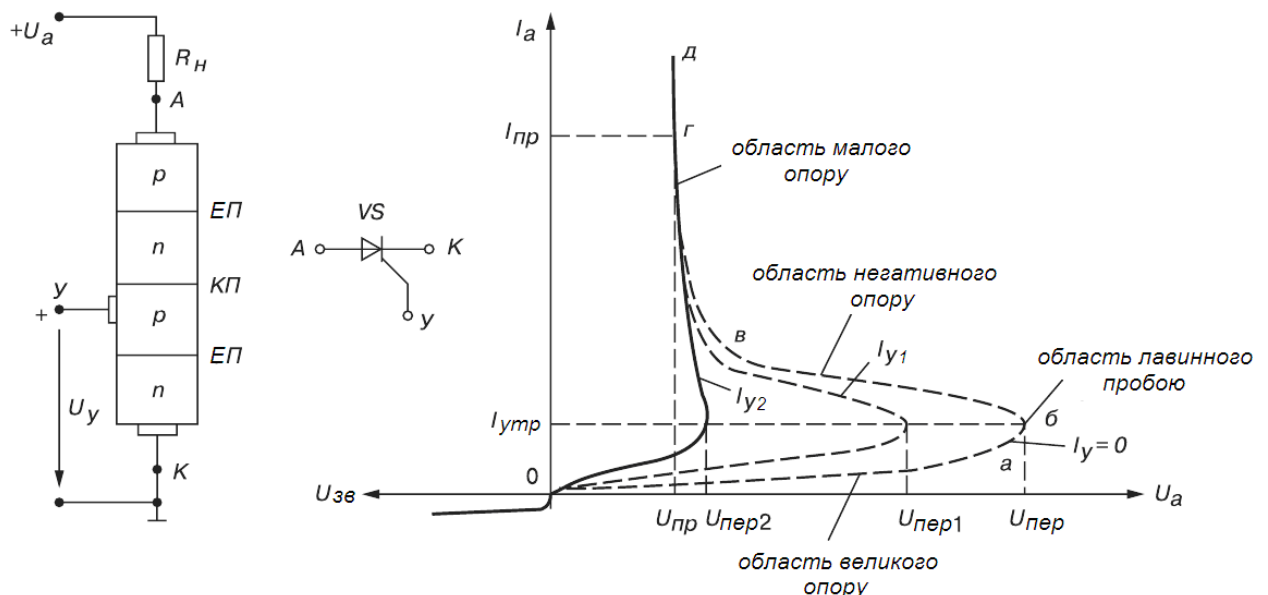


Рисунок 5.1 – УГП (а) та вольтамперна характеристика тиристора

За відсутності напруги U_y на управляючому електроді (диністор) і при додаванні напруги U_a до анода обидва емітерні переходи ЕП (рис. 5.1 а) відкрито, а колекторний перехід КП зачинений, і майже вся анодна напруга U_a прикладена до переходу КП.

При збільшенні напруги U_a до значення напруги перемикання $U_{пер}$ струм анода малий, а опір приладу великий.

При напрузі анода $U_a = U_{пер}$ відбувається лавиноподібний пробій КП-переходу, опір диністора зменшується, і струм анода практично обмежується опором резистора R_n , тобто $I_a = U_a / R_n$. Як видно з рисунка 5.1 б, диністор має два стійкі стани: ділянки **0а** і **гд**, наявність яких дозволяє використовувати прилад як потужний перемикальний елемент в різних схемах автоматики.

Наявність же ділянки **бв** з негативним диференціальним опором дозволяє використовувати прилад в різних схемах генераторів і модуляторів.

Недоліком диністора є велика залежність напруги перемикання $U_{\text{пер}}$ і струму утримання $I_{\text{утр}}$ від температури. При її збільшенні ці параметри зменшуються, забезпечуючи температурну нестабільність.

Аби вимкнути диністор, потрібно зменшити анодну напругу U_a до значення, при якому струм анода стане менше струму утримання $I_a < I_{\text{утр}}$. На практиці зменшують напругу U_a до нуля або прикладають до анода напругу негативної полярності.

Триністор забезпечений третім управляючим електродом Y , приєднаним до середнього р-слою кристала. При подачі на нього напруги $+U_y$, відбувається зсув колекторного переходу КП, з'являється струм I_y , причому з його збільшенням зменшується напруга перемикання $U_{\text{пер}}$ тиристора (рис. 5.1 б). При $I_y > I_{y2}$ вольт-амперна характеристика тиристора випрямляється.

Після відкриття тиристора струм управляючого I_y електроду перестає надавати вплив на роботу тиристора. При подачі на анод синусоїдальної напруги тиристор закривається під час негативної півхвилі напруги. На рисунку 5.2 показані часові діаграми напруги U_a і струму I_a анода, а також імпульси управляючого струму I_y . Характеристика управління по струму тиристора від кута перемикання α представлена на рисунку 5.2.

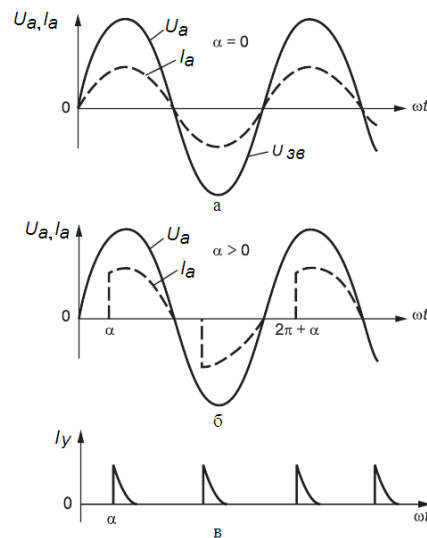


Рисунок 5.2 - Часові діаграми напруги U_a і струму I_a анода, а також імпульси управляючого струму I_y

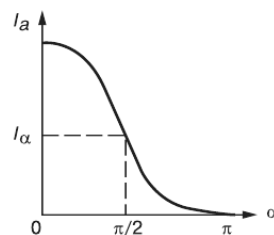


Рисунок 5.3 – Залежність струму управління тиристора I_y від кута перемикання α

Тиристри виготовляють на різні комутовані струми I_a (до тисяч ампер) і напруги U_a (тисячі вольт) при струмах, які управляють, в десятки і сотні міліампер.

Час перемикання струму (порядку 50...100 мА) малопотужних тиристорів складає доли мікросекунд, а час відновлення опору тиристора при струмі $I_a = 10$ А складає 200...250 мкс.

Коефіцієнт посилення по потужності тиристора

$$K_P = U_a I_a / U_y I_y = 250000.$$

Основні параметри тиристорів:

- напруга на відкритому тиристорі $U_{відм} = 1 \dots 1,5$ В;
- максимальний допустимий струм анода $I_{a \max}$;
- напруга, яка управляє U_y і струм, який управляє I_y ;
- час включення і виключення $t_{вкл}$ і $t_{викл}$;
- допустима зворотна напруга тиристора $U_{зв \max}$.

Наприклад, тиристор типа КУ201А має наступні параметри: $I_{a \max} = 2$ А; $t_{вкл} = 10$ мкс; $I_{y \max} = 2 \dots 100$ мА.

Схеми включення тиристорів.

У різних електронних пристроях в колах змінного струму в якості силових ключів широко застосовують триністри та симістри.

Самий простий спосіб керування тиристорами – це подача на управляючий електрод приладу постійного струму величиною, необхідною для його включення (рис. 5.4).

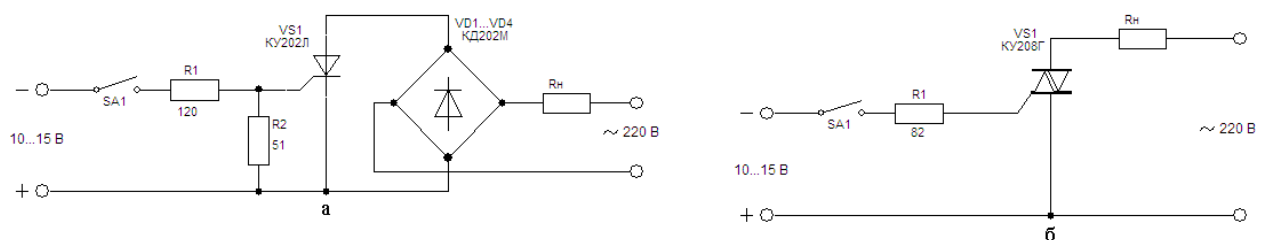


Рисунок 5.4 – Способи управління тиристорними структурами

Ключ SA1 – будь-який елемент, який забезпечує замикання кола: транзистор, вихідний каскад мікросхеми, оптрон та інші. Цей спосіб простий та зручний, але він має суттєвий недолік – необхідна доволі велика потужність керуючого сигналу. В таблиці 5.1 наведені найбільш важливі параметри для забезпечення надійного управління деякими самими розповсюдженими тиристорами (три перших позиції займають триністри, інші – симістри).

При кімнатній температурі для гарантованого включення перелічених тиристорів потрібний струм управляючого електрода $I_{y \text{ вкл}}$ рівний 70 – 160 мА. Отже, при напрузі живлення, типовій для зібраних на мікросхемах вузлів управління (10 – 15 В), потрібна постійна потужність 0,7 – 2,4 Вт.

Таблиця 5.1 – Параметри тиристорів

Тиристор	$I_{у\text{вкл}}$	$I_{у\text{вкл. макс.}}$	$I_{у\text{вкл. макс. імп.}}$	$I_{у\text{д}}$	$t_{\text{вкл}}$
KY201	70	200	350	100	10
KY202	100	300	500	200	
KY221		150	2000	100	2
KY208	160	—	1000	150	10
ТС106-10	100	400	—	45	—
ТС112-10		—	4000		12
ТС112-16					

Звернемо увагу на те, що полярність управляючої напруги для триністорів додатна відносно катода, а для симісторів – або від'ємна для обох нвпівперіодів, або співпадаюча з полярністю напруги на аноді. Також можна додати, що часто у згідно з вказівками по застосуванню потрібне шунтування керуючого переходу триністорів опором 51 Ом (R2 на рис. 5.1) та не потрібно ніякого шунтування для симісторів.

Реальні величини струму керуючого електрода, достатнього для увімкнення тиристора, зазвичай менше цифр, наведених у таблиці 5.1, тому нерідко ідуть на його зниження відносно гарантованих значень: для триністорів – до 7 – 40 мА, для симісторів – до 50 – 60 мА. Таке зниження часто призводить до ненадійної роботи пристроїв, та необхідності попередньої перевірки або підбору тиристорів. Зменшення керуючого струму також може призводити до виникнення завад радіоприйманню, оскільки увімкнення тиристорів за малих струмів управляючого електрода відбувається за відносно великої напруги на аноді – декілька десятків вольт, що призводить до пульсацій струму через навантаження та, отже, до потужних завад.

Недоліком управління тиристорами постійним струмом є гальванічний зв'язок джерела керуючого сигналу та мережі. Якщо у схемі з симістором (рис. 5.1 б) за відповідного увімкнення мережевих дротів джерело керуючого сигналу можна з'єднати з нульовим дротом, то в разі використання триністора (рис 5.1 а) така можливість виникає лише за виключення випрямляючого моста VD1–VD4. Останнє призводить до однонапівперіодної подачі напруги на навантаження та подвійного зменшення подачі потужності.

В останній час в зв'язку з великою потужністю споживання запуск тиристорів постійним струмом при безтрансформаторному живленні пускових вузлів (з гасячим резистором або конденсатором) практично не використовується.

Одним з варіантів зниження споживаної вузлом управління потужності є використання замість постійного струму неперервної послідовності імпульсів з відносно великою скважністю. Оскільки час увімкнення типових триністорів складає 10 мкс та менше, можна подавати на їх управляючий електрод імпульси такої ж тривалості зі скважністю, наприклад, 5 – 10 – 20, що відповідає частоті 20 – 10 – 5 кГц. В цьому випадку споживана потужність також зменшується в 5 – 10 – 20 разів відповідно.

Однак при такому способі управління виявляються деякі нові недоліки. По-перше, тепер тиристор вмикається не на самому початку напівперіода мережевої напруги, а у довільні миті часу, які відрізняються від початку напівперіода на час, що не перевищує періоду запускаючих імпульсів, тобто 50 – 100 – 200 мкс.

За цей час напруга мережі може підвищитись приблизно до 5 – 10 – 20 В. Це призведе до виникнення завад радіоприйманню та до деякого зменшення вихідної напруги, хоча малопомітному.

Існує ще одна проблема. Якщо при увімкненні на початку півперіоду під час дії запускаючого імпульсу струм через тиристор не досягає струму утримування $I_{\text{тр}}$, (табл. 5.1), тиристор після завершення імпульсу вимкнеться. Наступний імпульс знову включить тиристор, та він не вимкнеться лише у тому випадку, якщо до моменту завершення імпульсу струм через нього буде більше струму утримування. Таким чином, струм через навантаження спочатку буде мати вигляд декількох коротких імпульсів та лише потім – синусоїдальну форму.

Якщо ж навантаження має активно-індуктивний характер (наприклад, електродвигун), струм через неї за час дії короткого вмикаючого імпульсу може не встигнути досягнути величини струму утримування, навіть коли миттєва напруга мережі максимальна. Тиристор після закінчення кожного імпульсу буде вимикатися. Цей недолік обмежує знизу тривалість запускаючих імпульсів та може звести на нівець зменшення споживаної потужності.

Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Структура, спосіб дії та властивості диністора.
2. Вольтамперні характеристики диністора.
- 3 Структура, спосіб дії та властивості тиристора.
4. Вольтамперні характеристики тиристора.
5. Структура, спосіб дії та властивості симістора.
6. Вольтамперні характеристики симістора.
7. Основні параметри тиристорів.
8. Схеми включення силових приладів аналогової схемотехніки.

Практичні завдання.

Для дослідження режимів роботи електричних схем систем управління з напівпровідниковими діодами Electronics Workbench використовують розділ «Diodes» (рис. 5.5), до складу якого входять напівпровідникові діоди, стабілітрони, світлодіоди, тиристори або диністори, симетричний диністор або діак, симетричний триністор або тріак, випрямний міст (рис. 5.6).

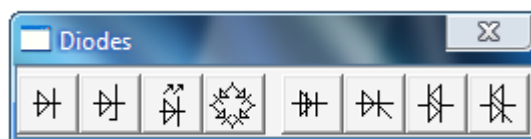


Рисунок 5.5 – Меню «Diodes» панелі інструментів EWB

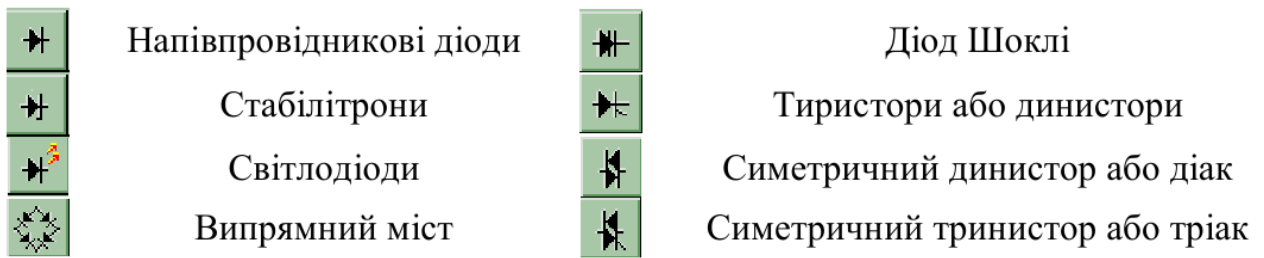


Рисунок 5.6 – Склад Меню «Diodes»

До перемикальних діодів належать: діод Шоклі, формованих унаслідок легування; симетричний динистор (діак); тринистор; симетричний тринистор (триак).

Розглянемо властивості тиристора, які задаються користувачем. Для цього потрібно натиснути два рази лівою кнопкою мишки на тиристорі та в діалоговому вікні «Diode Properties» вибрати потрібний тиристор на закладці «Models». Якщо потрібно змінити параметри, то натисніть кнопку «Edit». У діалоговому вікні (рис. 5.7) можливо задати такі параметри:

- Saturation current I_s [IS], А – зворотний струм диністора;
- Peak Off-state Current I_{drm} [IDRM], А – зворотний струм триністора;
- Switching voltage V_s [VS], В – напруга, при якій динистор перемикається у відкритий стан;
- Forward Breakover voltage V_{drm} [VDRM], В – те ж саме, але для триністора при нульовій напрузі на управляючому електроді;
- Peak On-State Voltage V_{tm} [VTM], В – падіння напруги у відкритому стані;
- Forward Current at which V_{tm} is measured I_{trn} [ITM], А – струм у відкритому стані;
- Turn-off time T_g [TG], с – час перемикавання в закритий стан;
- Holding current I_h [IH], А – мінімальний струм у відкритому стані (якщо він менше встановленого, то прилад переходить в закритий стан);
- Critical rate off-state voltage rise dv/dt [DV/DT], В/мкс – допустима швидкість зміни напруги на аноді триністора, при якому він продовжує залишатися в закритому стані (при більшій швидкості тринистор відкривається);
- Zero-bias junction capacitance C_j [CJO], Ф – бар'єрна ємність диністора при нульовій напрузі на переході;
- Gate Trigger voltage V_{gt} [VGT], В – напруга на управляючому електроді відкритого триністора;
- Gate Trigger current I_{gt} [IGT], А – струм управляючого електрода;
- Voltage at which I_{gt} is measured V_d [VD], В – відмикаюча напруга на управляючому електроді.

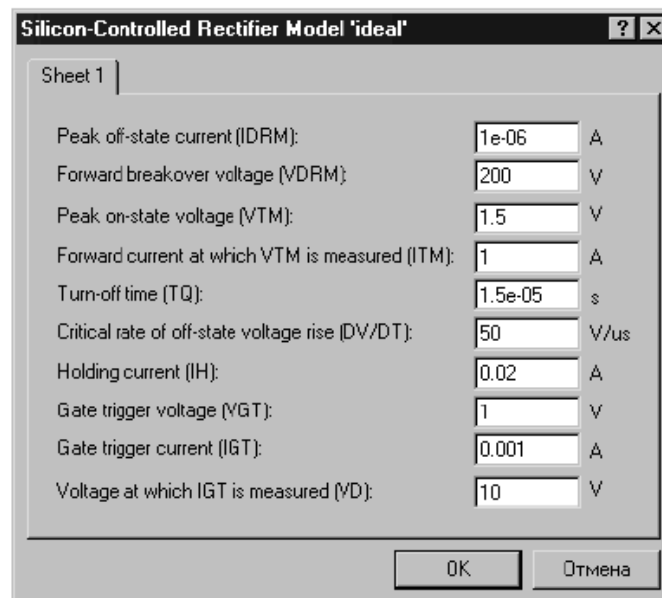


Рисунок 5.7 – Діалогове вікно установки параметрів триністора

1. Визначення характеристик тиристорів.

1.1 Зберіть схему для отримання вольт-амперних характеристик тиристорів (рис. 5.8). Для дослідження виберіть тиристор відповідно до варіанта завдання. Експериментальні дані занести до таблиці 5.2.

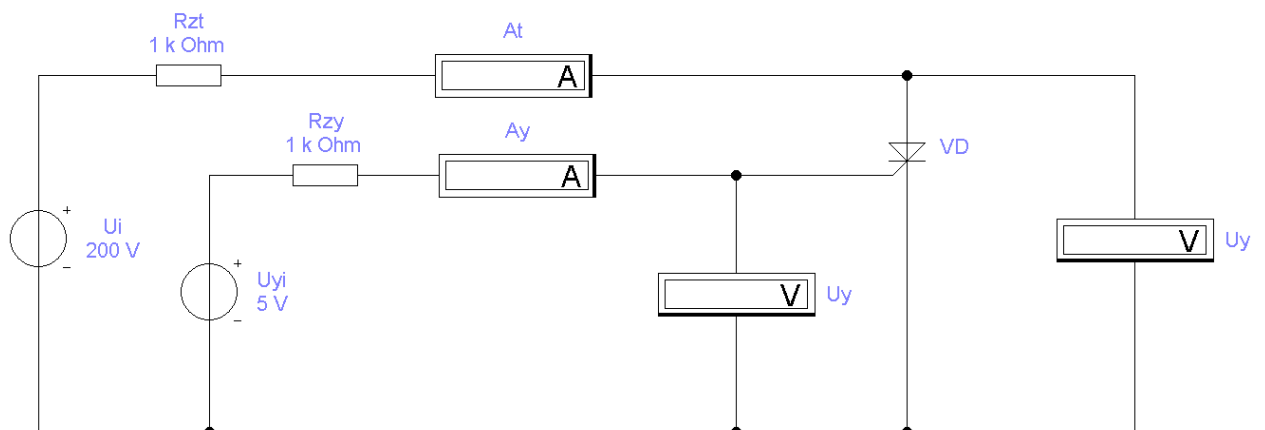


Рисунок 5.8 – Схема дослідження тиристорів

Дослідження прямої гілки ВАХ триністора. На схемі показані джерела вхідної напруги U_i і напруги управління U_y із захисними резисторами R_{zt} , R_{zy} . Вимір ВАХ здійснюється з вимірюванням U_i від нуля до $(U_i + 150)$ за фіксованого значення U_y , наприклад, у трьох точках $0,5V_i$, V_i і $1,5 V_i$.

Таблиця 5.2 – Експериментальні дані

U_i, B	$0.25 \cdot U_d$	$0.5 \cdot U_d$	$0.75 \cdot U_d$	U_d	$1.25 \cdot U_d$	$1.5 \cdot U_d$	$1.5 \cdot U_d$
U_{vt}, B							
I_{vt}, B							

Під час досліджень зворотної гілки ВАХ змінюється тільки полярність U_i .

1.2 Зняття ВАХ перемикальних діодів може бути здійснене також і в режимі заданих струмів у силовому колі і колі керування, тобто за допомогою схеми на рисунку 5.9.

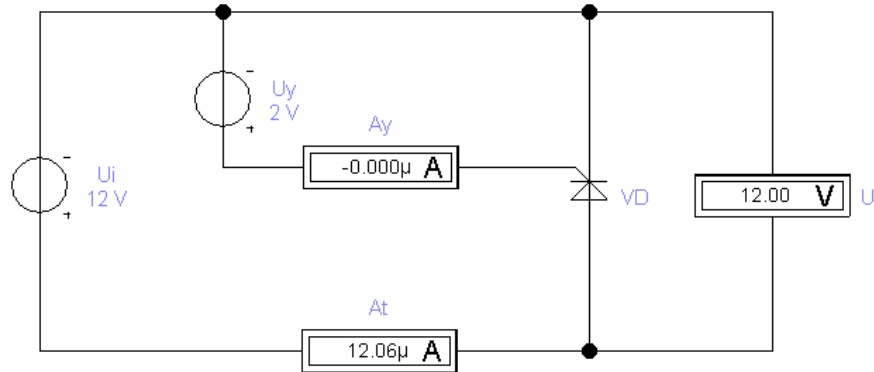


Рисунок 5.9 – Схема зняття ВАХ перемикальних діодів в режимі заданих струмів у силовому колі і колі керування

2. Зняти статичну вольт-амперну характеристику (ВАХ) тиристора, використовуючи осцилограф.

3. Дослідити роботу тиристора як регулятора потужності. Зберіть схему, наведену на рисунку 5.10.

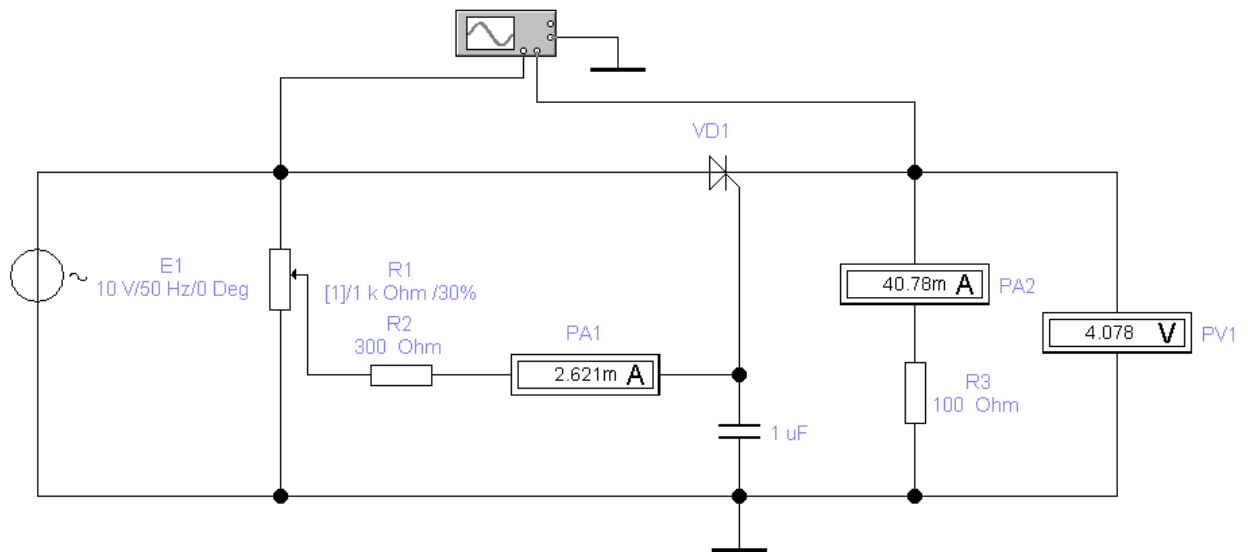


Рисунок 5.10 – Робота тиристора у якості регулятора потужності

3.1 Включити живлення схеми дослідження з положенням движка змінного резистора R1 – 100 %.

3.2 Зменшувати опір резистора R1 до стану ввімкнення тиристора – появи напруги на виході тиристора.

3.3 За епюрою вихідної напруги визначити величину напруги ввімкнення тиристора U_{m1} і час затримки включення тиристора T_z , а за показниками приладів: струм управління на момент увімкнення I_{y1} (PA1), струм навантаження I_{n1} (PA2) і напругу на навантаженні U_{n1} (PV1).

3.4 Зменшити опір R1 до 85 % і повторити вимірювання згідно з п. 3.3.

3.5 Зменшити опір R1 до 80 % і повторити вимірювання згідно з п. 3.3.

3.6 Зменшити опір резистора R1 до стану, коли $T_z = 0$ – струм у навантаженні (R3) не змінюється: $I_n = \text{const}$, і за показниками приладів визначити максимальний струм управління, який забезпечує постійно відкритий стан тиристора $I_y \text{ max}$ (PA1) та максимальний діючий струм у навантаженні $I_n \text{ max}$ (PA2) і максимальну напругу на навантаженні $U_n \text{ max}$ (PV1).

3.7 Розрахувати потужність, яка віддається тиристором у навантаження для виконаних вимірювань.

3.8 Результати вимірювань занести до таблиці 5.3.

3.9 Побудувати графік залежності переданої в навантаження потужності від струму керування тиристора.

Таблиця 5.3 – Експериментальні дані

Вимірювання	$R_1, \%$	$U_m, \text{В}$	T_z, ms	I_y	$I_n, \text{мА}$	$U_n, \text{В}$	$P_n, \text{ВА}$
1							
...							
n							

Варіанти завдань

№	Тиристор	№	Тиристор	№	Тиристор
1	2n1599	11	2n1599	21	2n1599
2	2n2573	12	2n2573	22	2n2573
3	2n2574	13	2n2574	23	2n2574
4	2n2575	14	2n2575	24	2n2575
5	2n6394	15	2n6394	25	2n6394
6	2n6395	16	2n6395	26	2n6395
7	2n6396	17	2n6396	27	2n6396
8	2n6397	18	2n6397	28	2n6397
9	2n6398	19	2n6398	29	2n6398
10	2n6399	20	2n6399	30	2n6399

Контрольні питання

1. Поясніть будову та принцип дії тиристора. За якими ознаками класифікуються тиристори?

2. Зобразіть вольт-амперну характеристику тиристора.

3. Чому за анодної напруги від 0 до $U_{\text{пер}}$ тиристор замкнений? Якої величини струм протікає при цьому через прилад?

5. Надайте характеристику диністора. Наведіть його ВАХ. Яка відмінність диністора від діода?

6. Надайте характеристику симістора. Наведіть його ВАХ.

Література

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527 с.
2. Гельжинський І. І., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Марусенкова Т. А. Мікросхемотехніка: підручник. Львів : Ліга - Прес, 2015. 492 с.
3. Бойко В. І., Зорі А. А. Основи електронних систем : вступ до фаху. Донецьк : ДНТУ, 2002. 207 с.