

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»

Методичні вказівки
до виконання
дослідницької лабораторної роботи ЕТУ-2
"ТИРИСТОРНІ РЕГУЛЯТОРИ ЗМІННОЇ НАРУГИ"
для студентів напряму підготовки 6.050701
„Електротехніка та електротехнології”

Дніпропетровськ
2015

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»

Методичні вказівки
до виконання
дослідницької лабораторної роботи ЕТУ-2
"ТИРИСТОРНІ РЕГУЛЯТОРИ ЗМІННОЇ НАРУГИ"
для студентів напряму підготовки 6.050701
„Електротехніка та електротехнології”

Затверджено
на засіданні кафедри
систем електропостачання
Протокол № 6
від 13.01.2015 р.

Дніпропетровськ
2015

Методичні вказівки до виконання дослідницької лабораторної роботи ЕТУ-2 "Тиристорні регулятори змінної напруги" для студентів напряму підготовки 6.050701 „Електротехніка та електротехнології” / Упоряд.: С.І.Випанасенко, О.Р.Ковальов, С.В.Дибрін, О.В.Бобров. - Дніпропетровськ: НГУ, 2015. - 13 с.

Упорядники:

С.І.Випанасенко, д-р техн. наук, проф.,
О.Р.Ковальов, ст. викладач,
С.В.Дибрін, асист.,
О.В.Бобров, асист.

Відповідальний за випуск заст. зав. кафедри систем електропостачання

С.І.Випанасенко, д-р. техн. наук, проф.

Друкується в редакційній обробці упорядників

Лабораторна робота ЕТУ-2 "Тиристорні регулятори змінної напруги"

Мета роботи - вивчити схемотехнічні рішення тиристорних регуляторів змінної напруги та характеристики однофазного регулятора з активним навантаженням. Це дозволить засвоїти принцип роботи такого обладнання, оцінити його можливості, вивчити характер і ступінь впливу регуляторів на мережу живлення.

Теоретичні основи

Тиристори знайшли широке застосування для імпульсного регулювання змінної напруги. Тиристорні регулятори мають невеликі розміри, високі ККД і швидкість дії, меншу вартість відносно, наприклад, магнітних підсилювачів або контакторних регуляторів. Регулятори широко застосовуються в електротехнічних установках, електроприводі.

Імпульсні засоби регулювання поділяються на:

1) регулювання зміною кута відкриття тиристорів (викликає зсув основної гармонічної складової струму навантаження відносно напруги живлення) (**рис.1,а**);

2) регулювання зміною кута відкриття і закриття тиристорів без порушення симетрії кривої напруги (без зсуву основної гармонічної складової) (**рис.1,б**);

3) широтно-імпульсне регулювання (ШІР) (**рис.1,в**).

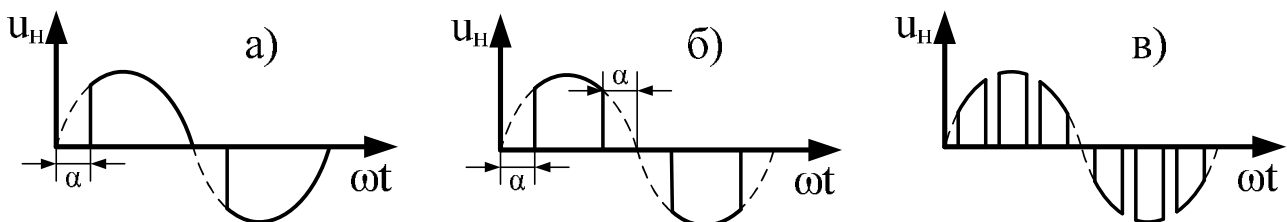


Рис.1. Способи тиристорного регулювання змінної напруги

Регулятори змінної напруги можуть бути однофазними і трифазними, трансформаторними і безтрансформаторними, з природною і примусовою комутацією тиристорів.

Розглянемо однофазні регулятори змінної напруги з природною комутацією. Два зустрічно-паралельно увімкнених тиристора (**рис. 2, а**) дозволяють регулювати рівень струму в електричному колі та напругу на навантаженні. Якщо навантаженням регулятора є активний опір, то струм повторює форму напруги (змінюється по синусоїдальному закону) і зникає при зміні знаку напруги на аноді тиристора (**рис. 3, а**).

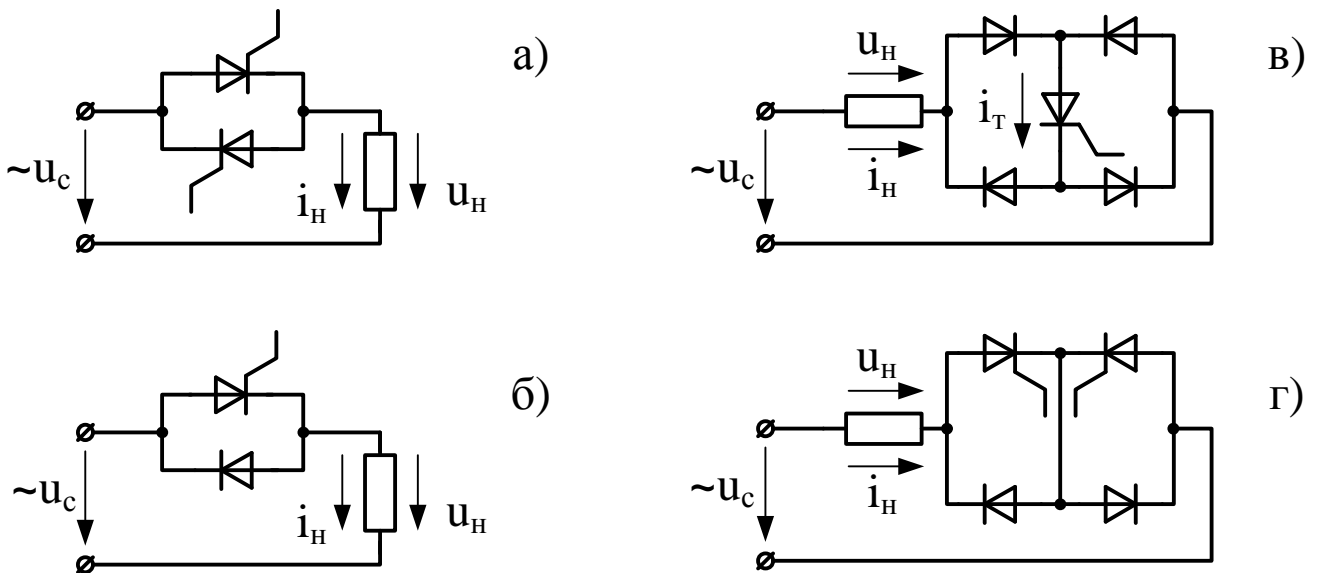


Рис. 2. Однофазні регулятори змінної напруги з натуральною комутацією

Якщо замінити один тиристор діодом (**рис. 2, б**), то такий регулятор дозволяє здійснювати регулювання струму тільки протягом одного півперіоду прикладеної напруги.

Регулятор із зустрічно-паралельними тиристорами має наступні параметри:

- активна потужність, що споживається з мережі

$$P_a = \frac{P_0}{p} \cdot \left(p - a + \frac{\sin 2a}{2} \right),$$

де P_0 - потужність, що споживається з мережі при повністю відкритих тиристорах, α - кут регулювання;

- реактивна потужність, що зумовлена зсувом фази першої гармонічної складової струму відносно напруги живлення

$$Q_a = \frac{P_0}{p} \cdot \sin^2 a ;$$

- потужність спотворення $T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$, що зумовлена протіканням в мережі вищих гармонічних складових струму

$$T_a = \frac{P_0}{p} \sqrt{p \left(p - a + \frac{\sin 2a}{2} \right) - \left(p - a + \frac{\sin 2a}{2} \right)^2 - \sin^4 a} ;$$

- діюче значення струму тиристора

$$I_a = \frac{I_0}{\sqrt{2p}} \sqrt{p - a + \frac{\sin 2a}{2}} ,$$

де I_0 - діюче значення струму при повністю відкритих тиристорах;

- середнє значення струму тиристора

$$I_{\text{н}0a} = \frac{I_a}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 + \cos a}{p} ;$$

- коефіцієнт форми кривої струму тиристора

$$K_{\phi I} = \frac{I_a}{I_{\text{н}0a}} = \frac{1}{1 + \cos a} \cdot \sqrt{p \left(p - a + \frac{\sin 2a}{2} \right)} ;$$

- коефіцієнт форми вихідної напруги

$$K_{\phi U} = \frac{U_{i a}}{U_{i \text{н}0a}} = \frac{1}{1 + \cos a} \sqrt{\frac{p}{2} \cdot \left(p - a + \frac{\sin 2a}{2} \right)} ,$$

де $U_{i \text{н}0a} = U \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + \cos a) / p$ - середнє значення напруги на навантаженні за півперіод напруги живлення, $U_{i a}$ - діюче значення напруги на навантаженні, U - напруга мережі живлення.

Якщо навантаження регулятора носить активно-індуктивний характер, то форма струму в мережі не повторює форму напруги (**рис. 3, б**), так як виникає ЕРС самоіндукції, що протидіє наростанню і спаду струму. Тому струм через вентиль протікає протягом деякого часу після зміни знаку напруги живлення.



Рис.3. Форма напруги та струму в мережі при активному (а) та активно-індуктивному (б) навантаженнях

Для регулювання напруги на навантаженні в обидва півперіоди напруги живлення використовують комбіновані регулятори, що складаються з діодів і тиристорів (рис.2,в,г). У схемі рис.2,в застосовано один тиристор, включений в діагональ діодного мосту. Струм у навантаженні протікає тільки тоді, коли діагональ мостової схеми випрямлення накоротко замкнута тиристором. Тиристор проводить в обидва півперіоди. Він знаходиться весь час під напругою однієї полярності, тож зворотня напруга на ньому дорівнює нулю. У схемі рис.2,г для управління тиристорами можна використати одне джерело.

На практиці дуже часто знаходять застосування трифазні регулятори напруги (в печах нагріву опором, для управління асинхронними двигунами і т.п.). Якщо взяти три однофазні схеми з зустрічно-паралельними тиристорами і включити їх в кожен фазу трифазної мережі з нульовим проводом (рис.4), то отримуємо трифазний тиристорний регулятор змінної напруги. При цьому струм через тиристорний елемент в кожній фазі не залежить від струму інших фаз і характеризується тими ж аналітичними виразами, що і для однофазної схеми.

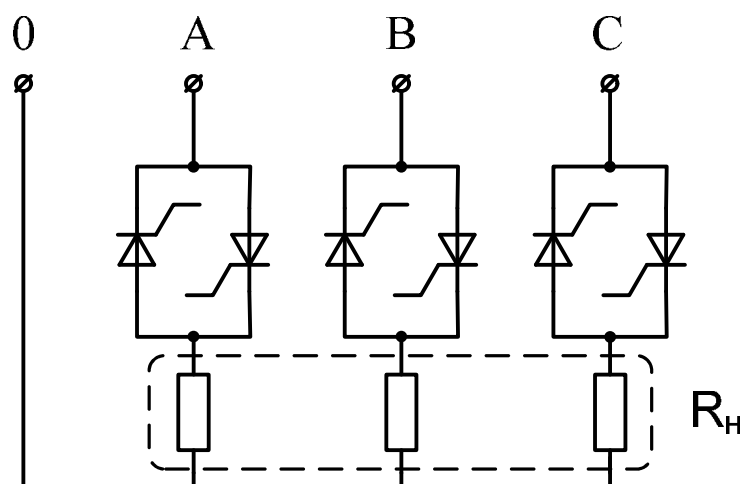


Рис. 4. Трифазний тиристорний регулятор змінної напруги

Тиристорні регулятори напруги є джерелами вищих гармонічних складових струму, що погіршують якість електроенергії. На **рис. 5** приведено відносні криві вищих гармонічних складових струму $I_n/I_{1(\alpha=0)}$ (n – номер гармонічної складової, $I_{1(\alpha=0)}$ – струм першої гармонічної складової при $\alpha = 0$) в залежності від кута управління α для однофазного регулятора (**рис. 2, а**). Як видно, несинусоїдність струму збільшується з ростом кута α , так як значно збільшується відносний (по відношенню до струму першої гармонічної складової при $\alpha = 0$) рівень вищих гармонічних складових. При подальшому збільшенні значення кута α потужність регулятора і рівень вищих гармонічних складових струму в мережі живлення зменшується.

Коефіцієнт несинусоїдності напруги в мережі знаходять за формулами:

$$K_{i\ddot{u}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=3}^{13} U_n^2}{U_{i\ddot{i}}^2}}, \quad U_n = I_n \cdot n \cdot X_c = I_n \cdot \frac{n \cdot U^2}{S_k},$$

де $U_{ном}$ – діюче значення номінальної напруги мережі; U_n – діюче значення n -ї гармонічної складової; X_c – опір мережі живлення; S – потужність к. з. в точці підключення установки; $n = 3, 5, 7, 9, 13, \dots$ – номери гармонічних складових.

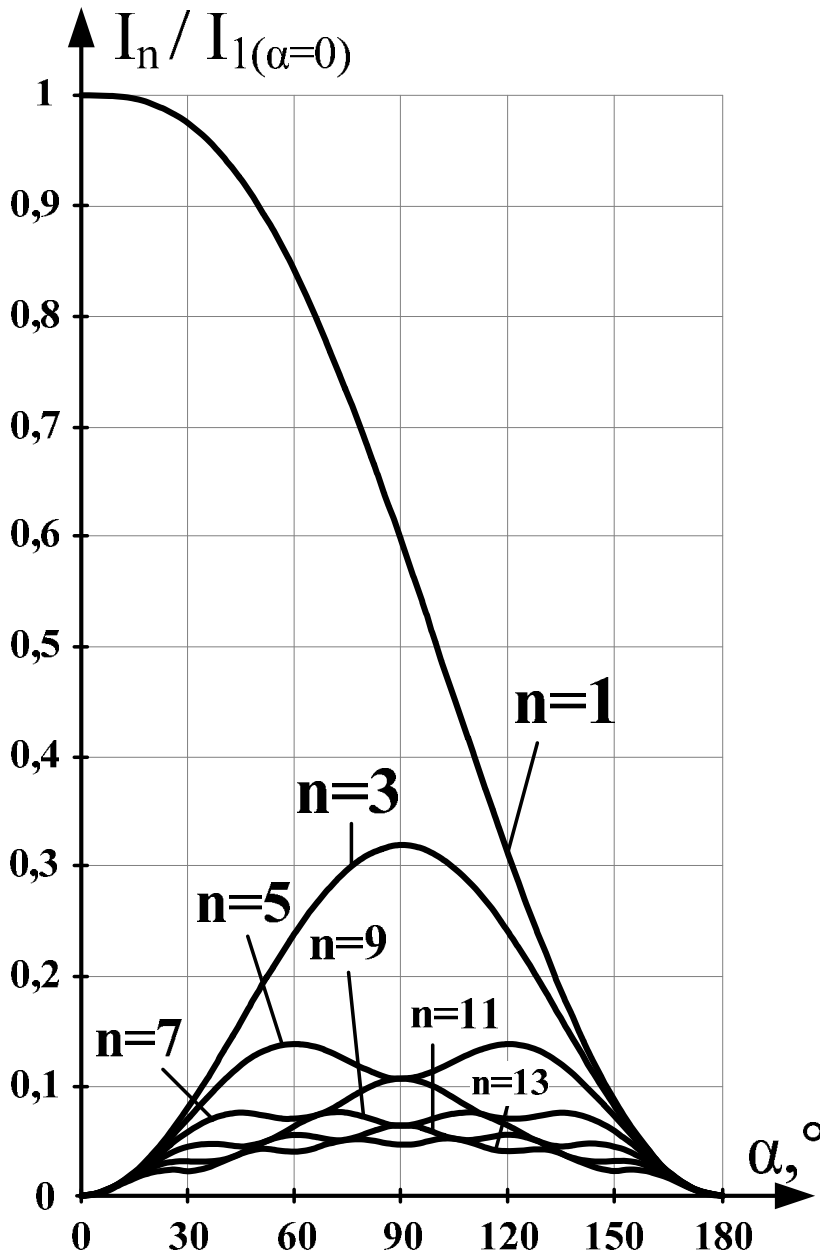


Рис. 5.
Залежності
відношень діючих
значень струмів
n-х гармонічних
складових до
діючого значення
першої
гармонічної
складової при
 $\alpha=0$ від кута
управління α

Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд є діючим макетом однофазного тиристорного регулятора напруги із зустрічно-паралельними тиристорами VT1, VT2 (рис. 6). Навантаження регулятора є активним (R1).

Регулятор працює наступним чином. Змінна напруга з тиристорів VT1, VT2 потрапляє на двохпівперіодний мостовий випрямляч V1-V4. Випрямлена напруга у вигляді напівсинусоїд забезпечує живлення вихідного каскаду системи управління (транзистор V8). На стабілітроні V11 формується опорна напруга, що через подільник R5,

R6 потрапляє на базу транзистора V10. Напряга з випрямляча (у вигляді напівсинусоїд) заряджає конденсатор C1 на кожному півперіоді входної напруги. При рівності опорної напруги на опорі R6 і напруги на конденсаторі C1 транзистор V10 відкривається. Під дією напруги конденсатора відкривається транзистор V10. Конденсатор C1 починає розряджатися через транзистори V10, V9 (переходи база-емітер), формуючи (відкриттям транзистора V9) управляючого імпульсу на резисторі R4. Імпульс потрапляє на вхід вихідного каскаду (V8). У момент відкривання V8 конденсатор C3, заряджений до напруги стабілізації стабілітрона V7, розряджається через первинну обмотку трансформатора T. Сформований на вторинній обмотці імпульс потрапляє на управляючі електроди тиристорів VT1, VT2. Вмикається той тиристор, у якого в цей момент напруга на аноді позитивна. Після включення тиристора випрямлена напруга зникає і конденсатор C1 розряджається.

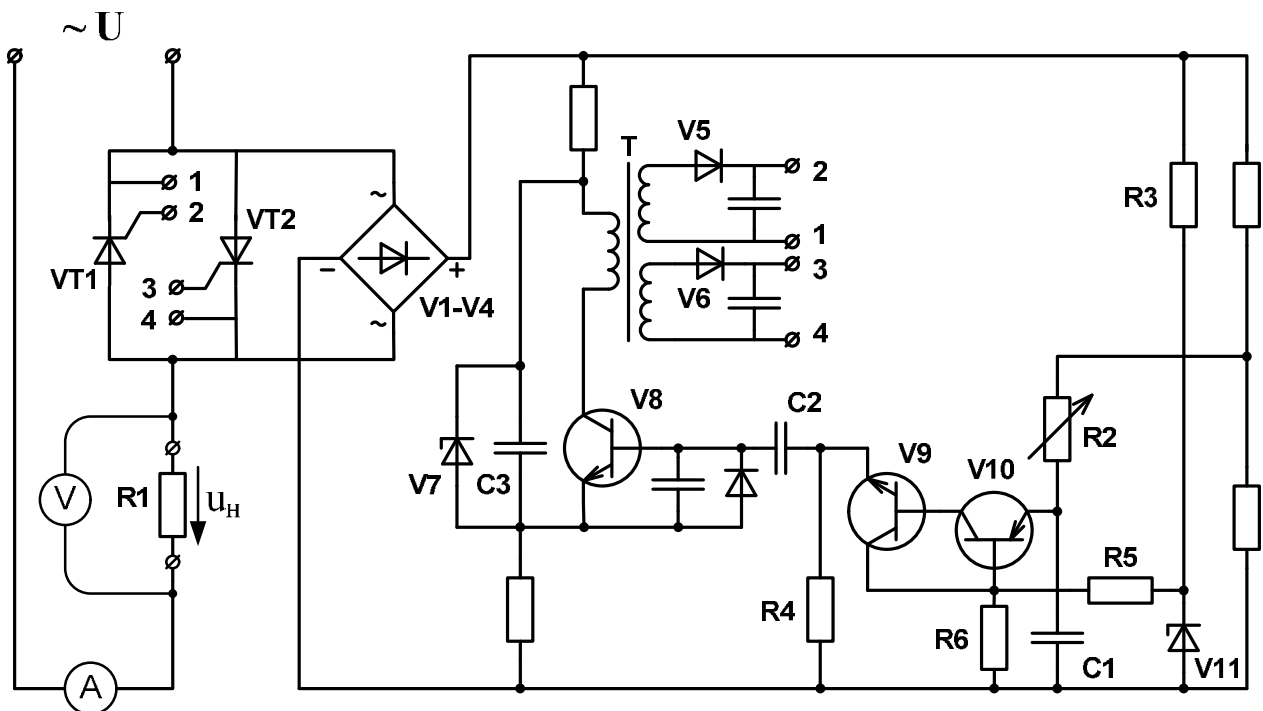


Рис. 6 Схема стенду дослідження однофазного тиристорного регулятора напруги із зустрічно-паралельними тиристорами

З наступним півперіодом живлячої напруги все повторюється. Змінюючи опір резистора R_2 , можна регулювати швидкість заряду конденсатора C_1 , а, отже, змінювати час затримки в формуванні імпульсу по відношенню до моменту переходу напруги на тиристорах через нуль (регулювати кут α). Форма напруги на навантаженні R_1 відповідає **рис.1,а**. При $\alpha = \rho$ напруга на навантаженні дорівнює нулю, а при $\alpha = 0$ напруга максимальна.

Послідовність виконання роботи

Лабораторна робота виконується в два етапи:

1. Експериментальні дослідження характеристик однофазного регулятора.
2. Розрахунки параметрів режиму на ЕОМ.

Перший етап виконується в наступній послідовності.

1. Включити осцилограф і підключити його вхід до навантаження регулятора.

2. Включити регулятор і спостерігати осцилограму напруги на навантаженні.

3. Змінюючи кут α в діапазоні його регулювання, виміряти напругу на навантаженні U_H , а також струм навантаження I_H . Результати вимірів занести до таблиці.

α	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
U_H							
U_H/U_0							
I_H							
I_H/I_0							

Тут U_0 , I_0 - напруга і струм навантаження при $\alpha = 0^\circ$.

4. За результатами вимірів побудувати регульовальні характеристики (залежності U_H/U_0 від α та I_H/I_0 від α).

5. Зробити висновок щодо характеру отриманих залежностей (лінійні або нелінійні).

Другий етап виконують у наступній послідовності.

1. По приведених в методичних вказівках аналітичних виразах за допомогою ЕОМ розрахувати та побудувати графіки залежностей від кута управління α : P_a/P_0 , Q_a/P_0 , I_a/I_0 , $I_{\text{ср.а}}/I_0$, $K_{\phi.I}$, $K_{\phi.U}$ (графіки показати на одному рисунку).

2. На окремому рисунку співставити залежність I_n/I_0 (α), отриману експериментально, з розрахунковою залежністю I_a/I_0 (α).

Звіт повинен містити:

- 1) назву та мету роботи;
- 2) принципові схеми однофазних регуляторів;
- 3) принципову схему макета регулятора;
- 4) таблицю, експериментальні та розрахункові залежності.

Питання для самоперевірки

1. Класифікація тиристорних регуляторів напруги.
2. Чому в регуляторах використовують тиристори, що ввімкнено зустрічно-паралельно?
3. Чому тиристорний регулятор напруги є джерелом вищих гармонічних складових струму?
4. Як розрахувати діюче значення напруги окремої гармонічної складової?
5. Пояснити принцип дії макета однофазного тиристорного регулятора.
6. Які особливості режимів роботи регулятора на активно-індуктивне навантаження?
7. Чи залежить рівень гармонічних складових струму навантаження від кута регулювання?
8. В чому особливість залежності рівня гармонічних складових струму навантаження від кута управління?

ЛІТЕРАТУРА

1. Болотов А.В., Шепель Г.А. Электротехнологические промышленные установки: Учеб. для вузов по спец. "Электроснабжение промышленных предприятий". - Москва: Высшая школа, 1988. - 336 с.
2. Фомичев Е.П. Электротехнологические промышленные установки. Учеб. пособ. для вузов. - Киев: Вища школа, 1979. - 267 с.
3. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок: Учеб. пособие для вузов. - Москва: Энергоатомиздат, 1991. - 376 с.

Упорядники:

Станіслав Іванович Випанасенко
Олександр Робертович Ковальов
Сергій Володимирович Дибрін
Олексій Володимирович Бобров

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ
ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ ЕТУ-2
"ТИРИСТОРНІ РЕГУЛЯТОРИ ЗМІННОЇ НАРУГИ"
ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ 6.050701
„ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ”

Редакційно-видавничий комплекс

Підписано до друку . Формат 30x42/4.
Папір Pollux. Ризографія. Умови, друк. арк. . Обліково-видавн.
арк. . Тираж 100 прим. Зам. № . Безкоштовно.

Державний вищий навчальний заклад
„Національний гірничий університет”
49600, ДСП, м. Дніпропетровськ, просп. К.Маркса,19