МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Державний ВНЗ “НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ”

Кафедра електропривода

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи СПАЕ-2

“Дослідження роботи трифазного керованого випрямляча на проти-ЕРС”

з дисципліни
“Силові перетворювачі в автоматизованому електроприводі”

для студентів спеціальності 7.05070204
“Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”

Склали проф. М.М.Казачковський,
ас. С.Б.Савченко

Дніпропетровськ
2012

МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості роботи та характеристики керованого випрямляча на проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах.

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчити особливості роботи трифазного мостового керованого випрямляча на проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах.
2. Отримати дані для побудови регулювальних характеристик у випрямному та інверторному режимах.
3. Отримати дані для побудови зовнішніх характеристик випрямляча.
4. Вивчити за допомогою осцилографа характер зміни миттєвих випрямлених напруги та струму, а також струму вторинної обмотки трансформатора за різних кутів керування та проти-ЕРС.

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Найпоширенішою сферою застосування керованих випрямлячів в електроприводі є їх використання для живлення обмоток якоря машин постійного струму (рис.1). В обмотці якоря під час роботи електричної машини виникає ЕРС, яка пропорційна швидкості обертання якоря.

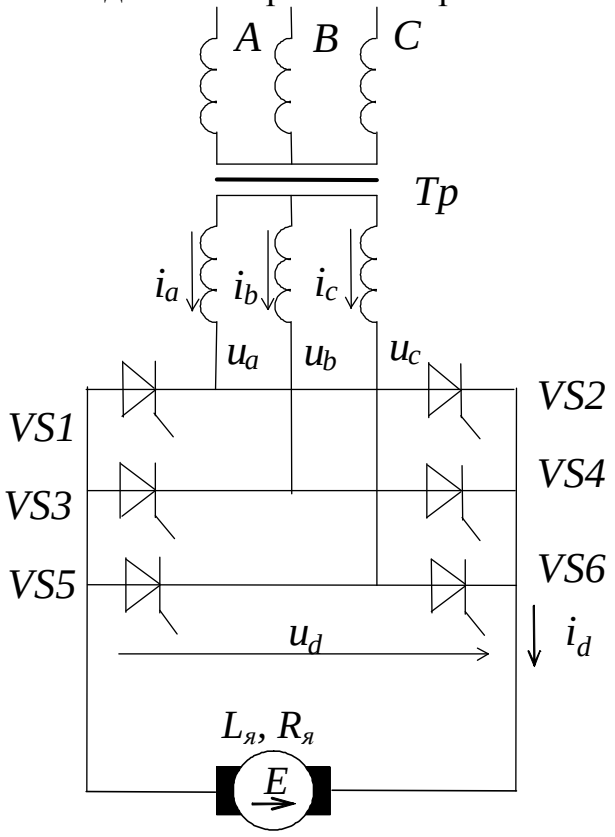

Рис.1

Диференційне рівняння миттєвих напруг кола якоря має вигляд:

$$u_d = E + i_d R_я + L_я \frac{di_d}{dt}, \qquad (1)$$

де $R_я$, $L_я$ – активний опір та індуктивність кола якоря, E – ЕРС якоря.

Рівняння середніх напруг:

$$U_d = E + I_d R_я . \qquad (2)$$

Перебіг електромагнітних процесів має багато спільного з процесами при *RL*-навантаженні, але наявність у складі навантаження випрямляча проти-ЕРС обумовлює специфіку режимів його роботи. Слід зауважити також, що індуктивність обмотки якоря набагато менша індуктивності обмотки збудження, і тому режим переривистого струму виникає при більших середніх струмах та менших кутах керування.

а) Робота випрямляча у випрямному режимі

На рис.2 зображені діаграми випрямлених напруги та струму при нульовій проти-ЕРС (тобто при *RL*-навантаженні) та α=45°. Якщо ЕРС якоря відмінна від нуля та має напрямок, зображений на рис.1, це призводить до зменшення середнього значення струму, практично не змінюючи його форми (рис.3). Хоча на рис.3 миттєва випрямлена напруга і стає подекуди меншою від проти-ЕРС, але струм завдяки електромагнітній інерції обмотки не встигає впасти до нуля. Однак подальше збільшення ЕРС має наслідком зменшення похідної струму

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d - E - i_d R_я}{L_я}$$

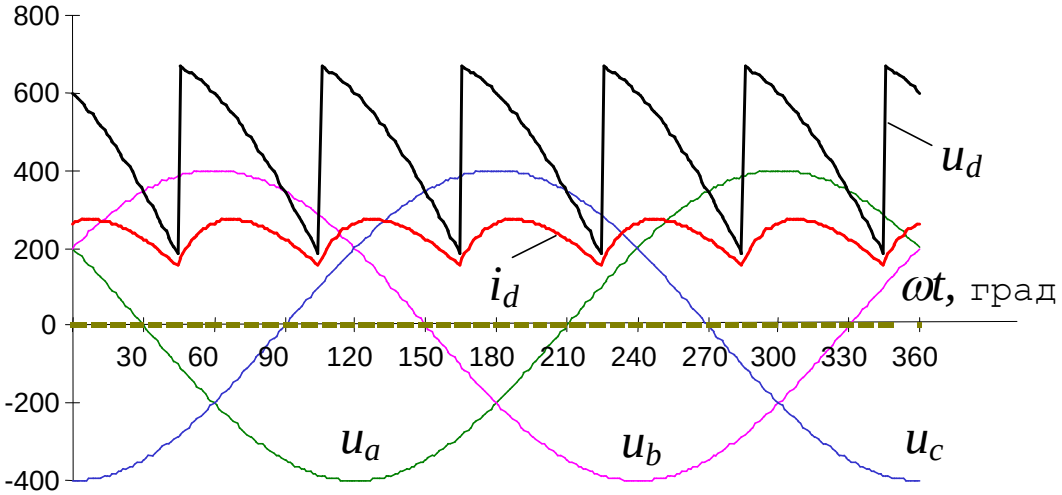

Рис.2

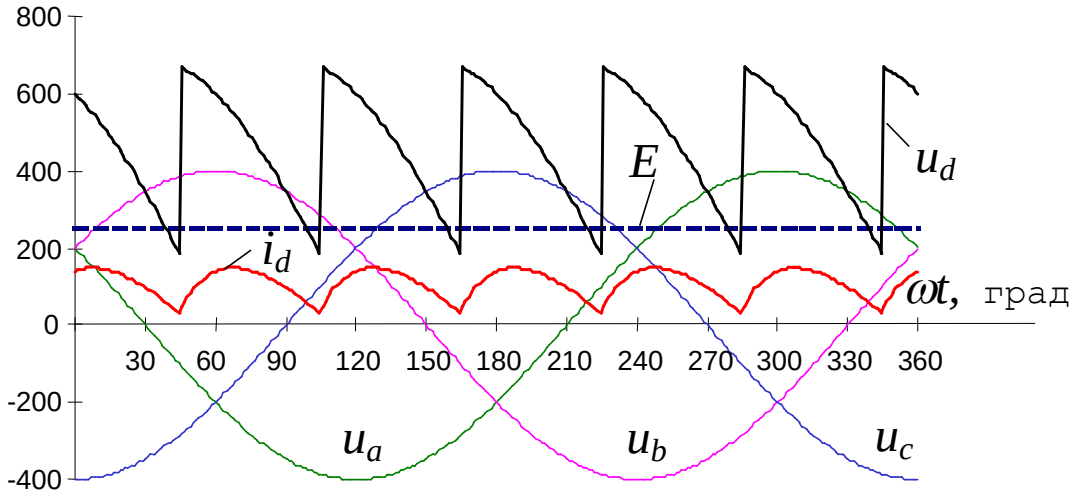

Рис.3

та ЕРС самоіндукції і появу пауз у струмі (рис.4). Коли миттєва випрямлена напруга стає меншою від проти-ЕРС (т. *A* на рис.4), струм тече у попередньому напрямку завдяки ЕРС самоіндукції, полярність якої збігається при зниженні струму з полярністю випрямленої напруги. У момент часу, що відповідає т. *B*, алгебраїчна сума ЕРС у колі якоря дорівнює нулю, і струм зникає:

$$i_d = \frac{u_d - E - L_я \dfrac{di_d}{dt}}{R_я} = 0 .$$

Праворуч т. *B*, коли струм відсутній, а тиристорі закриті, напруга на виході випрямляча дорівнює ЕРС якоря. Середня випрямлена напруга завдяки цьому дещо більша, ніж в режимі безперервного струму для того ж кута керування (див. рис.3).

Коли проти-ЕРС збільшується настільки, що перевищує максимальну миттєву випрямлену напругу, до анодів тиристорів завжди прикладений негативний потенціал, і протікання струму взагалі неможливе.

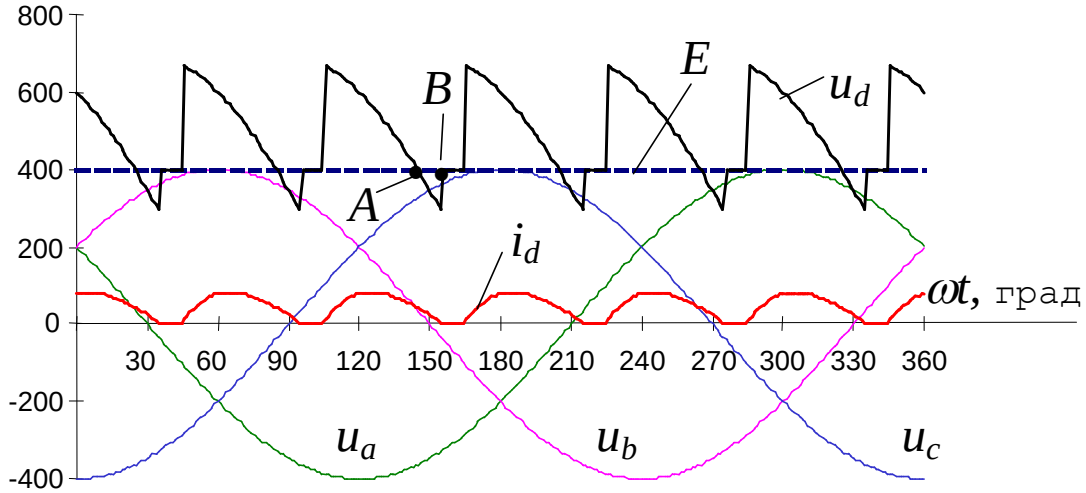

Рис.4

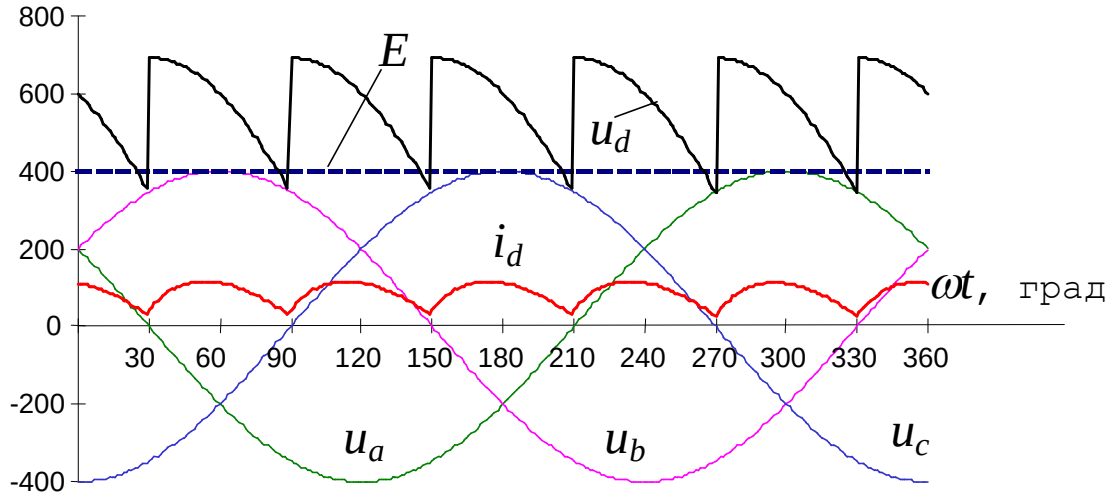

Рис.5

Зменшення кута керування за незмінної проти-ЕРС знову робить випрямлений струм безперервним (рис.5).

Форма та фаза струму вторинної обмотки трансформатора у випрямному режимі за безперервного струму нічим не відрізняється від таких при роботі на *RL*-навантаження (на рис.6 зображені струм та напруга фази *a* при куті α=45°). Фазний струм запізнюється в часі відносно фазної напруги на кут φ=α. Але при збільшенні проти-ЕРС і незмінному куті керування, коли виникають паузи струму (рис.7), це співвідношення порушується. Збільшення проти-ЕРС зсуває момент зникнення фазного струму ліворуч, і тепер φ<α. Цей ефект можна також пояснити збільшенням активної складової споживаного струму.

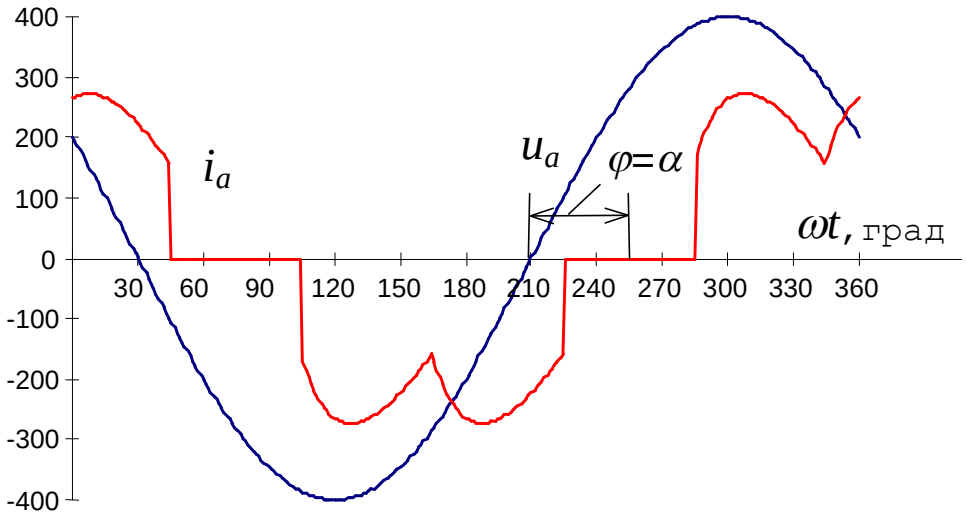

Рис.6

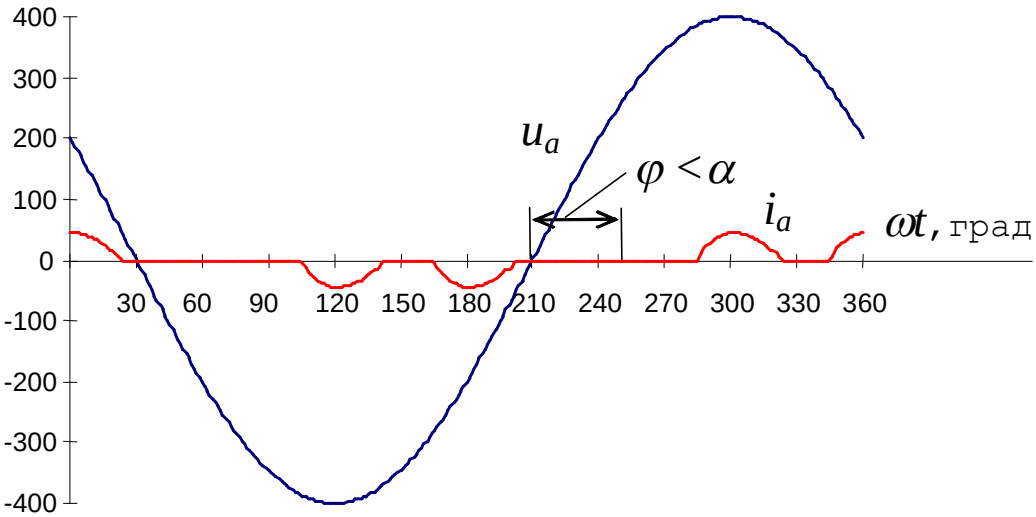

Рис.7

б) Робота в інверторному режимі

У випрямному режимі випрямляч споживає енергію з живильної мережі і віддає її навантаженню (у нашому випадку – електричній машині). У цьому режимі знаки середніх випрямлених напруги та струму завжди співпадають, хоча миттєва напруга інколи свій знак змінює. В інверторному режимі, коли енергія споживається випрямлячем від електричної машини та передається мережі, знаки середніх напруги та струму повинні бути протилежними. Оскільки внаслідок однобічної провідності тиристорів випрямлений струм знак змінити не може, це можливо за двох умов:

* проти-ЕРС повинна мати напрям, який збігається з напрямом струму (інакше електрична машина не зможе змінити напрям передачі енергії);
* кут керування більший за 90°, а модуль проти-ЕРС більший від модуля середньої випрямленої напруги (тільки тоді може змінити знак середня випрямлена напруга).

Перехід випрямляча до інверторного режиму проілюстрований рис.8…10. На рис.8 зображені діаграми напруг та струмів при α=100° та $E=0$. Як видно, незважаючи на досить великий кут керування, середня випрямлена напруга позитивна, і випрямляч працює у випрямному режимі (оскільки не виконується друга умова виникнення інверторного режиму).

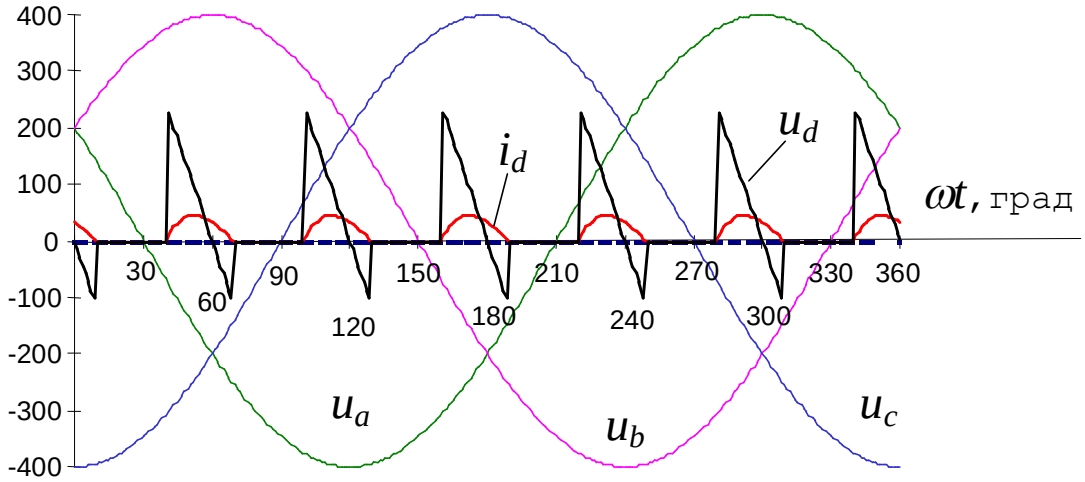

Рис.8

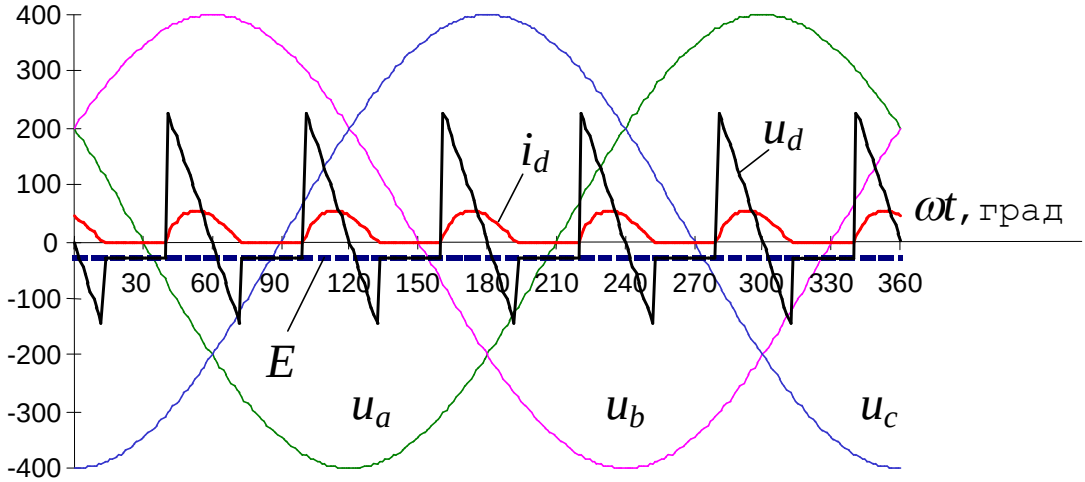

Рис.9

На рис.9 проти-ЕРС вже змінила напрям порівняно з рис. 5. Електрична машина перейшла в генераторний режим і, перетворюючи механічну енергію на електричну, віддає її у зовнішнє електричне коло. Завдяки цій додатковій енергії тривалість імпульсу струму збільшилася, а середнє значення випрямленої напруги наблизилося до нуля. Але рівень ЕРС якоря ще невеликий, і вся енергія, отримана від електричної машини, втратилася в колі випрямленого струму, не дійшовши до мережі. Знак середньої випрямленої напруги все ще співпадає зі знаком струму, а випрямляч продовжує працювати у випрямному режимі.

За більшої проти-ЕРС (рис.10) енергії, отриманої від обмотки якоря, вже достатньо для того, щоб тривалість протікання струму стала досить великою. Більшу частину цього часу миттєва випрямлена напруга негативна. Змінює знак середня випрямлена напруга і настає інверторний режим. Завдяки зміні знаків середньої випрямленої напруги та ЕРС знак струму залишається незмінним:

$$I = \frac{-U_d + E}{R_я} > 0.$$

На рис.11 проти-ЕРС уже настільки велика, що здатна забезпечити безперервне протікання струму.

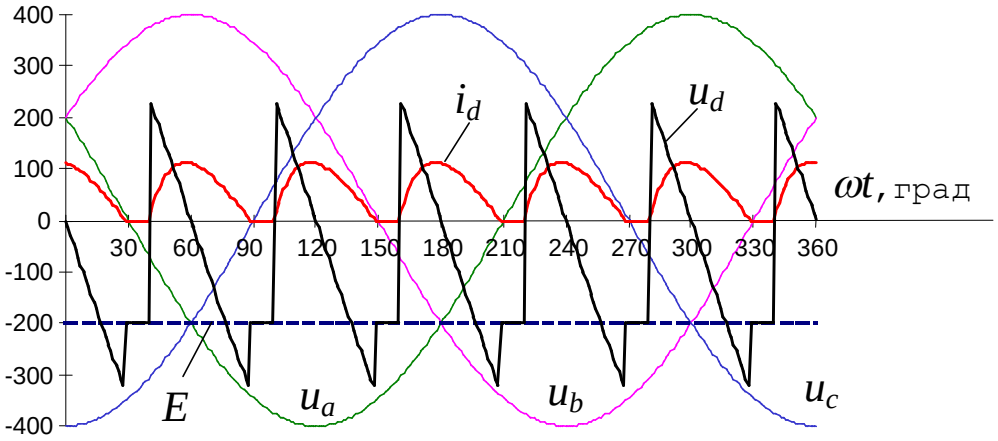

Рис.10

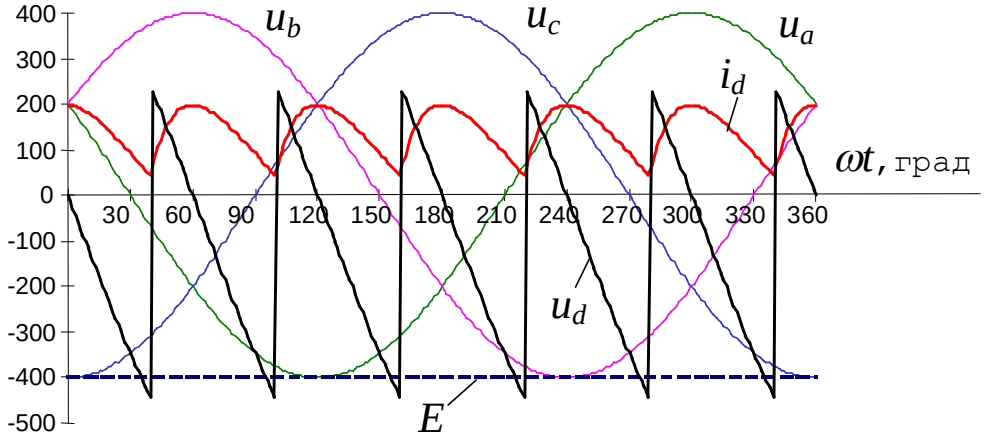

Рис.11

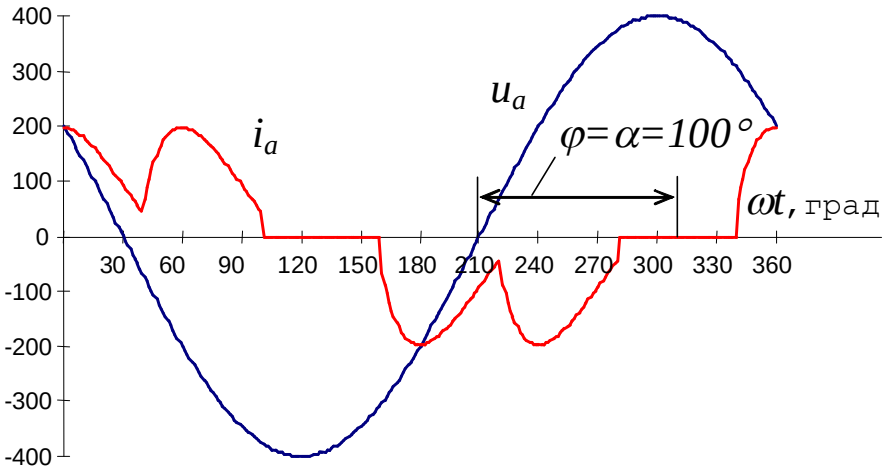

Рис.12

Струм вторинної обмотки трансформатора в інверторному режимі має зсув відносно фазної напруги, більший за 90° (рис.12). Причиною цього є те, що завдяки зміні напряму передачі енергії активна складова фазного струму змінила знак. Як і у випрямному режимі, з появою пауз у випрямленому струмі кут зсуву дещо менший від кута керування.

в) Зовнішні і регулювальні характеристики

Зовнішні характеристики випрямляча, як і будь-якого джерела живлення, відображають залежність середньої вихідної напруги U_d від середнього струму I_d (тобто від навантаження джерела). Вони характеризують міру стабільності вихідної напруги зі зміною навантаження і тим самим міру близькості джерела до ідеального джерела напруги.

У випрямному режимі при безперервному струмі середня випрямлена напруга лінійно знижується зі зростанням струму:

$$U_d=E_{d0}\cos\alpha - I_dR - I_dR_n - \Delta U, \qquad (3)$$

де E_{d0} – вихідна напруга при $I_d=0$ та $\alpha=0$ (тобто ЕРС); $R = R_я+2R_2$ – сумарний активний опір кола якоря (обмотки якоря та вторинної обмотки трансформатора); $R_п = m X_2/2\pi$ – т.з. опір від перекриття (фіктивний активний опір, який враховує падіння напруги, обумовлене процесом природної комутації тиристорів); m – пульсність випрямляча (для трифазної мостової схеми $m=6$); ΔU – падіння напруги в тиристорах (в потужних випрямлячах ним звичайно нехтують); X_2 – індуктивний опір вторинної обмотки трансформатора.

Проте в зоні переривистого струму ця лінійність порушується. Зі збільшенням проти-ЕРС виникають паузи в струмі (порівняйте рис.3 та 4). Середній струм згідно з рівнянням (2) зменшується (як наслідок, зменшується і падіння напруги). Крім того, під час паузи струму тиристори закриті, і напруга в колі якоря дорівнює проти-ЕРС. Оскільки перед закриттям тиристорів миттєва випрямлена напруга була меншою від проти-ЕРС (див. рис.4), виникнення паузи в струмі призводить до додаткового збільшення середньої вихідної напруги. Зовнішня характеристика досить швидко підіймається вгору зі зменшенням струму. На рис.13 зовнішні характеристики в зоні переривистого струму розташовані у межах еліпсу 1. На еліпсі (т. *F*) має місце гранично-безперервний характер струму, праворуч від нього – безперервний. Перший квадрант рис.13 відповідає випрямному режиму.

Зменшення кута керування при незмінній проти-ЕРС має наслідком перехід до більш вищої характеристики з безперервним струмом (порівняйте рис.4 та 5). Зменшення проти-ЕРС при $\alpha = const$ переміщує робочу точку праворуч від т. *F* уздовж тієї ж характеристики, збільшення – ліворуч, до зони переривистого струму.

Таким чином, внаслідок переривистого характеру струму зовнішня характеристика стає суттєво нелінійною з досить великим падінням напруги від навантаження. Це призводить до нестабільності швидкості електричних двигунів, які живляться від випрямляча.

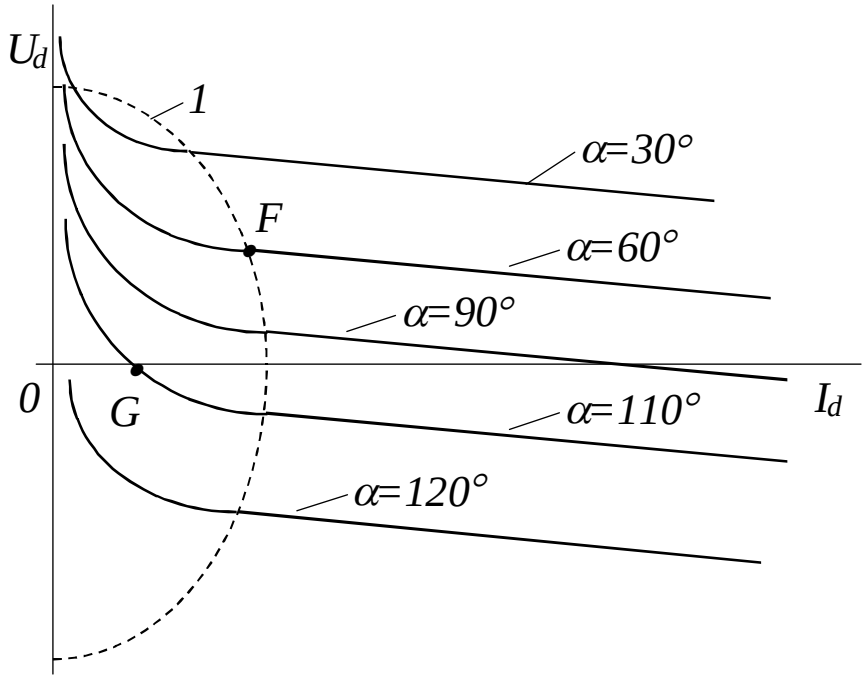

Рис.13

На рис.14 наведені регулювальні характеристики випрямляча, навантаженого на проти-ЕРС. Якщо *E=0*, характеристика співпадає з такою для *RL*-навантаження. Горизонтальна її ділянка в області малих напруг відповідає кутам керування, більшим за 120° (відомо, що відкривання тиристорів у трифазній мостовій схемі при *RL*-навантаженні за таких кутів неможливе). Виникнення подібної ділянки у випрямному режимі з *E>0* має іншу природу. Справа в тому, що збільшення кута керування зрештою приводить до того, що керуючий імпульс надходить до тиристора тоді, коли миттєва випрямлена напруга повинна бути меншою за проти-ЕРС (поміж т. *A* та *B* на рис.4).

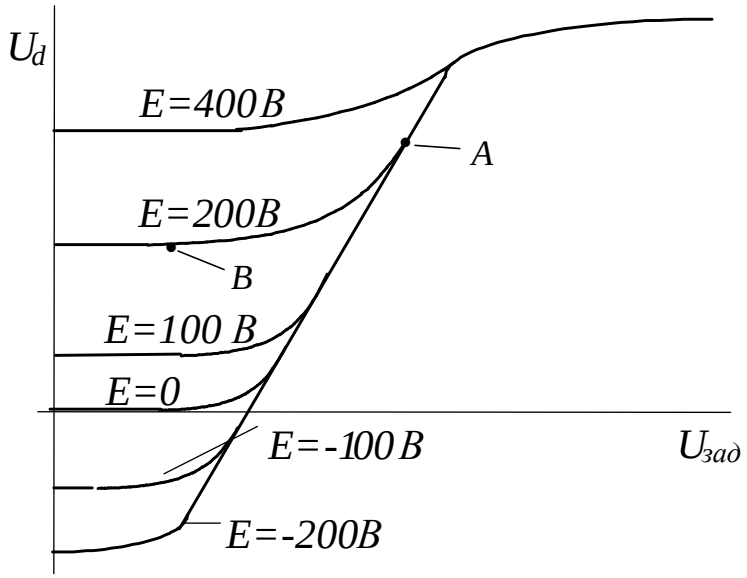

Рис.14

За таких умов тиристори відкритися не в змозі, бо до їх анодів прикладена негативна напруга. Чим більша проти-ЕРС, тим при меншому куті α (та більшій задавальній напрузі) виникає це явище. Але при α<120° (праворуч від т. *B* на рис.14) виникає струм (поки що переривистий), і випрямлена напруга

збільшується зі зростанням задавальної напруги. Точка *А* на тому ж рисункові відповідає гранично-безперервному характеру струму. При подальшому збільшенні завдання паузи струму зникають, і всі регулювальні характеристики практично співпадають незалежно від рівня проти-ЕРС. Горизонтальна ділянка спільної характеристики виникає внаслідок обмеження мінімального кута керування.

Характеристики інверторного режиму мають подібну форму, але розташовані у четвертому квадранті.

ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторна установка для дослідження режимів роботи керованого випрямляча реалізована на базі автоматизованого тиристорного електропривода ЭТУ 3601. Зі складу цього електропривода використовуються трифазний мостовий випрямляч, силовий трансформатор *Тр* та система імпульсно-фазового керування (СІФК), яка формує керуючі імпульси, що подаються на керуючі електроди тиристорів. Схема лабораторної установки наведена на рис.15.

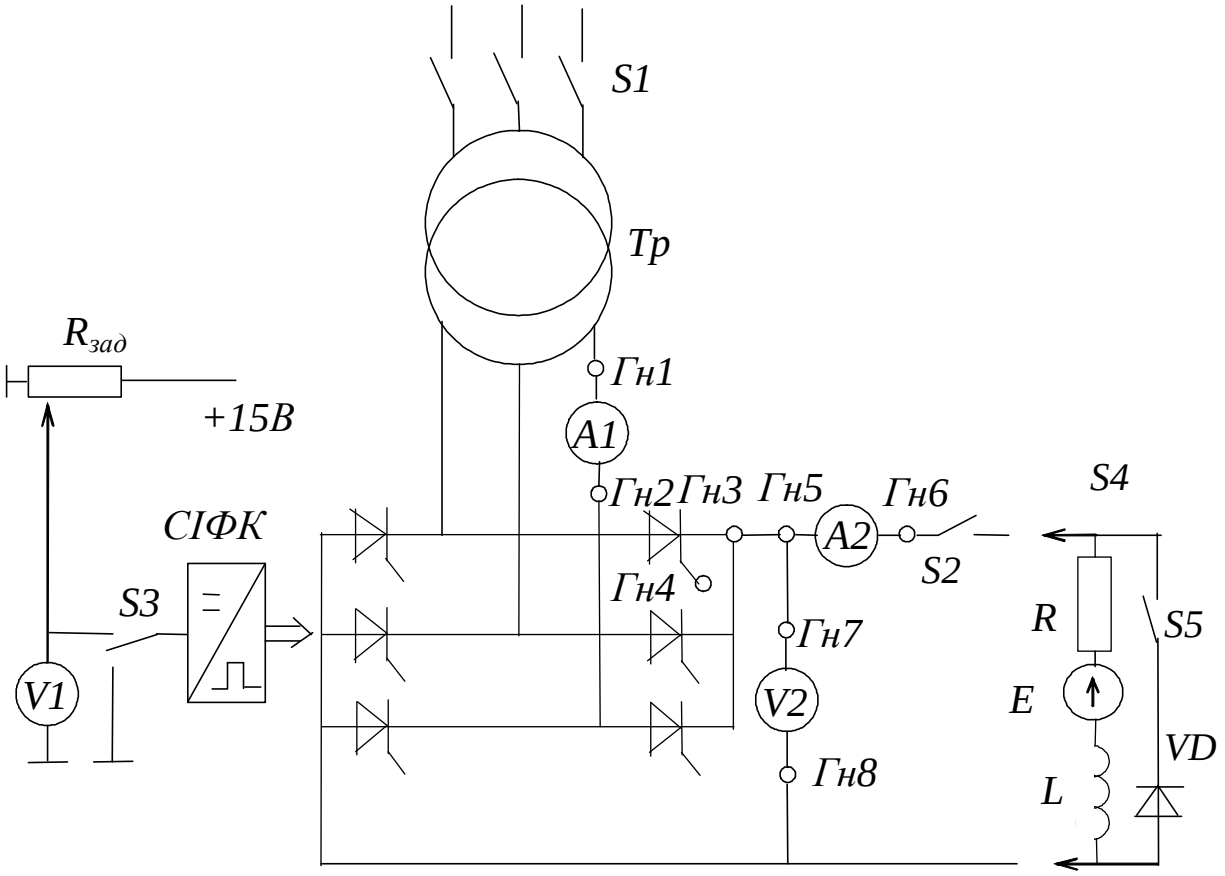

Рис.15

Проти-ЕРС створюється за допомогою електромашинного підсилювача (ЕМП), який складається зі спеціального генератора постійної напруги та приводного асинхронного двигуна. Запуск цього двигуна здійснюється за допомогою автоматичного вимикача *S8*. Для регулювання рівня проти-ЕРС передбачено потенціометр, ввімкнений до кола збудження ЕМП і розташований на лівому боці стенду. Зміна полярності проти-ЕРС здійснюється перемикачем *S6*. Вимикачі *S6*, *S8* та зазначений потенціометр на рис.15 не показані.

Задавальна напруга, від рівня якої залежить кут керування і, зрештою, середня випрямлена напруга, знімається з потенціометра $R_{зад}$ і вимірюється вольтметром *V1* .

У разі необхідності полярність вмикання вольтметра *V2* змінюється за допомогою перемикача *S7*.

Вибір характеру навантаження здійснюється за допомогою перемикача *S4*. Положення RL_1 та RL_2 відрізняються величиною індуктивності (в положенні RL_2 індуктивність більша). Інші положення при виконанні даної роботи не використовуються.

Для осцилографування струмів та напруг передбачені гнізда *Гн1…Гн8*.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1) Вмикання лабораторної установки:
   - подати напругу до первинної обмотки силового трансформатора;
   - встановити нульову задавальну напругу;
   - вибрати за допомогою перемикача *S6* випрямний режим;
   - вибрати характер навантаження;
   - встановити нульовий рівень проти-ЕРС (повзун потенціометра у найнижчому положенні);
   - запустити двигун електромашинного перетворювача.

2) Зняття регулювальних характеристик випрямного режиму:
   - змінюючи задавальну напругу від нуля до максимально можливої, фіксувати випрямлену напругу, випрямлений струм та струм вторинної обмотки трансформатора та заносити їх до таблиці 1.
   - повторити вимірювання для 3 рівнів проти-ЕРС (від нуля до максимально можливого). Кількість точок кожної характеристики повинна бути не менше 12.

Табл.1

Рівень проти-ЕРС	№ вимірювання	$u_{зад}$, В	U_d, В	I_d, А	I_2, А
E=0	1				
	.				
	.				
	12				
E=	1				
	.				
	.				
	12				
E=	1				
	.				
	.				
	12				

3) Зняття регулювальних характеристик інверторного режиму:
- знизити проти-ЕРС до нуля;
- змінити полярність проти-ЕРС;
- встановити наступний рівень проти-ЕРС;
- змінюючи задавальну напругу від нуля до максимально можливої, фіксувати випрямлену напругу, випрямлений струм і струм вторинної обмотки трансформатора та заносити їх до таблиці 2.
- повторити вимірювання для 2 рівнів проти-ЕРС (від нуля до максимально можливого). Кількість точок кожної характеристики повинна бути не менше 12.

Табл.2

Рівень проти-ЕРС	№ вимірювання	$u_{зад}$, В	U_d, В	I_d, А	I_2, А
E= –	1				
	.				
	.				
	12				
E= –	1				
	.				
	.				
	12				

4) Зняття зовнішніх характеристик:
- встановити нульовий рівень проти-ЕРС;
- для випрямного режиму встановити потрібну задавальну напругу і, збільшуючи проти-ЕРС, фіксувати випрямлені напругу та струм. Повторити вимірювання для 4 рівнів задавальної напруги. Результати занести до табл.3.

Табл.3

Режим	$U_{зад}$, B	№ / Параметр	1	2	3	...	12
Випр.		U_d, В					
		I_d, А					
		U_d, В					
		I_d, А					
		U_d, В					
		I_d, А					
		U_d, В					
		I_d, А					
Інв.		U_d, В					
		I_d, А					
		U_d, В					
		I_d, А					

- для інверторного режиму знизити проти-ЕРС до нуля та змінити її полярність за допомогою перемикача *S6*. Провести вимірювання для 2 рівнів задавальної напруги.

5) Осцилографування напруг та струмів:
   - осцилографувати миттєві випрямлену напругу, струм та струм вторинної обмотки трансформатора, а також напругу на керуючому електроді тиристора (*Гн3…Гн4*);
   - для випрямного та інверторного режиму при $E \neq 0$ зняти осцилограми для випадків безперервного випрямленого струму та для переривистого струму. Переривистий струм отримується шляхом зміни проти-ЕРС або задавальної напруги.

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Назва, мета та програма роботи.
2. Схема лабораторної установки (рис.15).
3. Таблиці експериментальних даних.
4. Осцилограми напруг та струмів.
5. Регулювальні характеристики $U_d(u_{зад})$, $I_d(u_{зад})$, $I_2(u_{зад})$ для різних рівнів проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах (усі характеристики в спільних системах координат).
6. Зовнішні характеристики U_d (I_d) для різних рівнів задавальної напруги у випрямному та інверторному режимах (усі характеристики в спільній системі координат).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як поява у складі навантаження проти-ЕРС впливає на середній випрямлений струм та граничний кут керування у випрямному та інверторному режимах?
2. Чому дорівнює випрямлена напруга під час безструмової паузи?
3. В якому режимі працює керований випрямляч, якщо двигун, що від нього живиться, працює в рушійному режимі?
4. В якому режимі працює керований випрямляч, якщо двигун, що від нього живиться, працює в рекуперативному режимі?
5. В якому напрямку передається енергія через випрямляч на інтервалі часу, коли $|u_d| > |E|$ у випрямному та інверторному режимах?
6. В якому напрямку передається енергія через випрямляч на інтервалі часу, коли $|u_d| < |E|$ у випрямному та інверторному режимах?
7. Як збільшення проти-ЕРС впливає на початкову похідну струму у випрямному та інверторному режимах?
8. За яких умов випрямляч переводиться до інверторного режиму?
9. В яких режимах працюють випрямляч та двигун на рис.9?
10. Яке співвідношення знаків середніх випрямлених струму та напруги, а також проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах?

11. Як, не змінюючи кут керування, перевести випрямляч з режиму переривистого струму до режиму безперервного струму у випрямному та інвертоному режимах?
12. Що таке зовнішні та регулювальні характеристики керованого випрямляча?
13. Чому в зоні переривистих струмів нахил зовнішніх характеристик більший, ніж в зоні безперервних струмів?
14. Які негативні наслідки має нелінійність зовнішньої характеристики в зоні переривистих струмів?
15. В якому діапазоні може змінюватись кут керування в трифазній мостовій схемі за відсутності та наявності проти-ЕРС у складі навантаження?
16. Які зовнішні характеристики рис.13 відповідають випрямному і які – інверторному режиму?
17. За яких умов струм встигає знизитись до нуля до відкриття наступного тиристора?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 229 с.
2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М.Чиженко. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
4. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
5. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.