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

Кафедра електропривода

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи СПАЕ-4

“Дослідження однофазного мостового випрямляча при роботі на проти-ЕРС”

з дисципліни

“Силові перетворювачі в автоматизованому електроприводі”

для студентів спеціальності 7.05070204
“Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”

Склав проф. М.М.Казачковський

Дніпропетровськ

2011

1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості електромагнітних процесів та статичних характеристик однофазного мостового випрямляча при роботі на проти-ЕРС.

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

2.1. Дослідження електромагнітних процесів у мостовому випрямлячі при роботі у випрямному режимі.

2.1.1. Дослідити вплив проти-ЕРС та кута керування на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, а також на середні випрямлені напругу та струм у режимі безперервного та переривистого струму;

2.1.2. Дослідити вплив проти-ЕРС на тривалість імпульсу випрямленого струму у режимі переривистого струму;

2.1.3. Дослідити вплив проти-ЕРС на кут керування, при якому виникає режим гранично-безперервного струму;

2.1.4. Дослідити роботу випрямляча при малих кутах керування $\left(\alpha < \alpha_{\min}\right)$.

2.2. Дослідження електромагнітних процесів у мостовому випрямлячі при роботі в інверторному режимі.

2.2.1. Дослідити вплив проти-ЕРС та кута керування на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, а також на середні випрямлені напругу та струм у режимі безперервного та переривистого струму;

2.2.2. Дослідити вплив проти-ЕРС на тривалість імпульсу випрямленого струму у режимі переривистого струму;

2.2.3. Дослідити вплив проти-ЕРС на кут керування, при якому виникає режим гранично-безперервного струму.

2.2.4. Порівняти фазовий зсув струму вторинної обмотки трансформатора відносно напруги у випрямному та інверторному режимах.

2.3. Дослідження електромагнітних процесів у мостовому випрямлячі з урахуванням механічних перехідних процесів у двигуні.

2.3.1. Дослідити залежність середнього випрямленого струму від моменту статичного навантаження двигуна.

2.3.2. Дослідити роботу випрямляча при малих кутах керування (не більших від 30°).

2.4. Дослідження регулювальних характеристик $U_d = f(\alpha)$ при різних проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимі.

2.4.1. Задавши позитивну проти-ЕРС, монотонно збільшувати кут керування від нуля до 165° і спостерігати форму випрямленої напруги та її середнє значення. Порівняти характер зміни середньої напруги с регулювальними характеристиками;

2.4.2. Повторити те ж саме для інших рівнів проти-ЕРС (у тому числі менших від нуля).

2.5. Дослідження зовнішніх характеристик $U_d = f(I_d)$ при різних кутах керування при роботі на двигун постійного струму.

2.5.1. Встановити кут керування і, збільшуючи статичний струм двигуна, спостерігати форму та середнє значення випрямленої напруги. Порівняти характер зміни середньої напруги із зовнішніми характеристиками.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Найпоширеніша область застосування керованих випрямлячів - електричний привод, де їх навантаженням найчастіше є обмотка якоря двигуна постійного струму. Характерна особливість обмотки якоря як навантаження - наявність у ланцюзі якоря не тільки активного опору та індуктивності, а і проти-ЕРС, яка пропорційна швидкості обертання якоря двигуна. Розглянемо спочатку електромагнітні процеси у випрямлячі при роботі на проти-ЕРС, що не змінюється у часі. Схема заміщення якірного ланцюга зображена на рис.1.

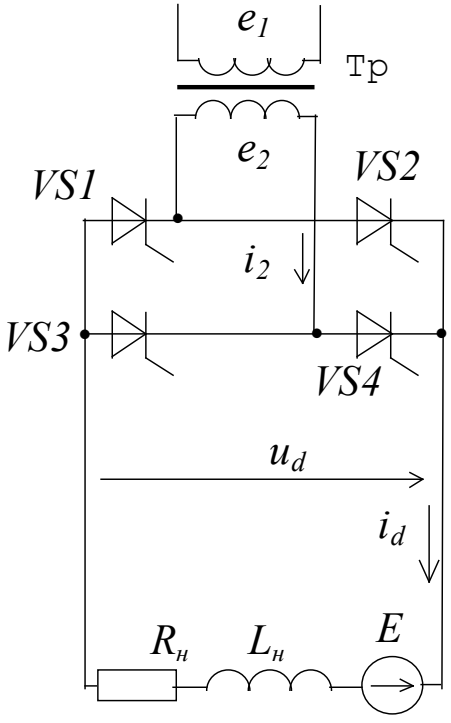

Рис.1

3.1. ВИПРЯМНИЙ РЕЖИМ

У випрямному режимі проти-ЕРС E має напрямок, протилежний середній випрямленій напрузі, а по модулю завжди менша від неї (на рис.1 показаний напрямок проти-ЕРС саме для цього випадку). Тому випрямлений струм спрямований згідно з середньою випрямленою напругою та назустріч проти-ЕРС. Це означає, що електрична енергія віддається випрямлячем обмотці якоря, де вона кінець кінцем перетворюється на механічну.

Електромагнітні процеси в колі випрямленого струму описуються рівнянням

$$u_d = i_d R_н - E - L_н \frac{di_d}{dt} . \qquad (1)$$

На рис.2 зображені випрямлені напруга та струм для $E=0$ (тобто, при непорушному якорі). На рис.3-5 - для рі-

зних рівнів проти-ЕРС та тих самих активного опору, індуктивності навантаження та кута керування. Порівнюючи згадані рисунки, можна помітити, що збільшення проти-ЕРС зменшує середнє значення випрямленого струму. При досить великій проти-ЕРС ріниця поміж середньою випрямленою напругою та проти-ЕРС вже невелика, середній струм зменшується настільки, що індуктивні елементи не встигають накопичити досить електромагнітної енергії для підтримки струму. Струм зникає раніш, ніж відкриється наступна пара тиристорів (див. рис.4). Умовою для зникнення струму $i_d = \dfrac{e_2 - E - L_н \dfrac{di_d}{dt}}{R_н}$ є рівність $e_2 - E = L_н \dfrac{di_d}{dt}$.

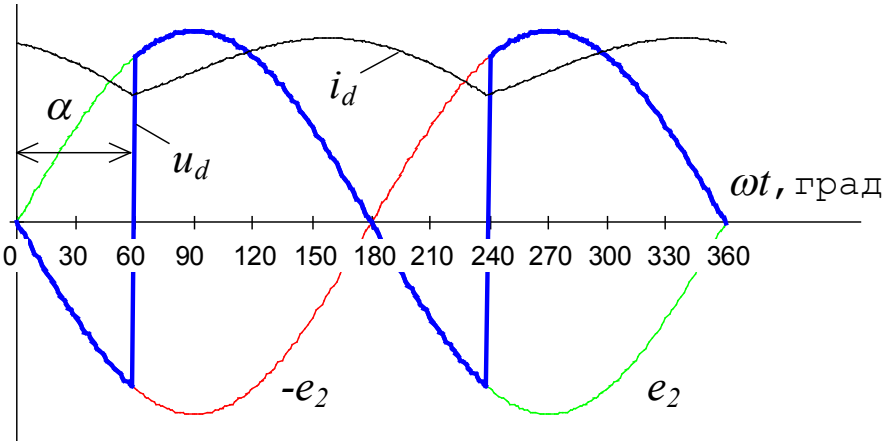

Рис.2

Поки струм відсутній, напруга у ланцюзі навантаження дорівнює проти-ЕРС. Тому у режимі переривистого струму збільшення проти-ЕРС збільшує також і середнє значення випрямленої напруги (порівн. рисунки 3-5).

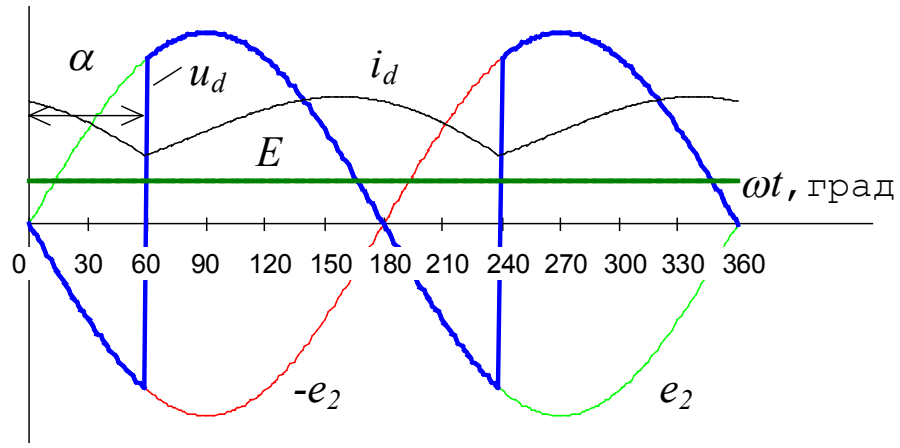

Рис.3

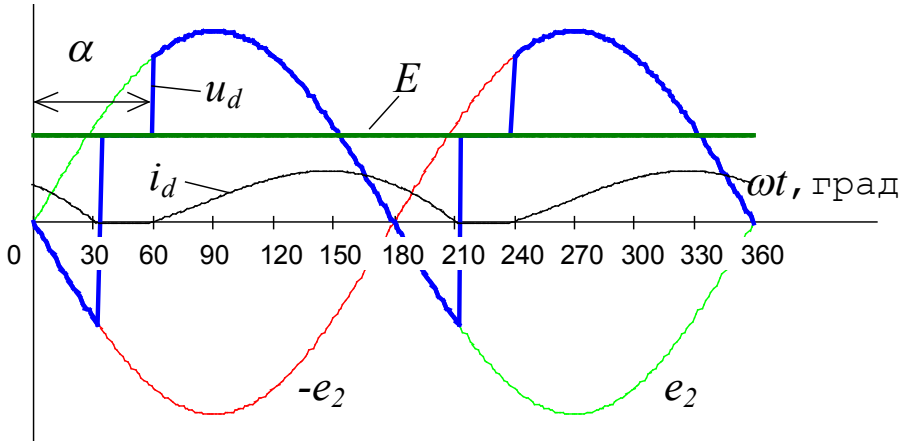

Рис.4

Якщо проти-ЕРС стане більша від максимальної ЕРС трансформатора, тиристори не зможуть відкритися, оскільки до їх анодів буде завжди прикладений позитивний потенціал. Зміна кута керування призводить до тих самих наслідків, що і при активно-індуктивному навантаженні.

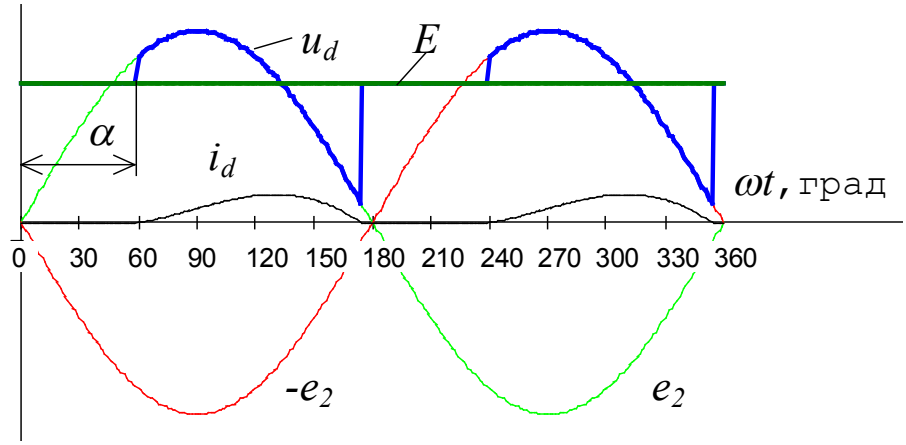

Рис.5

Одразу після відкриття тиристорів миттєва випрямлена напруга більша від проти-ЕРС, миттєвий струм співпадає за

напрямком з напругою, електрична енергія віддається випрямлячем джерелу проти-ЕРС (обмотці якоря), накопичується в індуктивності у вигляді енергії електромагнітного поля та частково виділяється у вигляді тепла в активному опорі навантаження. Як тільки миттєва напруга стає меншою від проти-ЕРС, струм під впливом останньої починає зменшуватися і енергія, накопичена в індуктивних елементах, знову перетворюється на електричну та віддається обмотці якоря. На інтервалі, коли знаки струму та напруги не співпадають (див. рис.3, 4), частка цієї енергії потрапляє також і назад до вторинної обмотки трансформатора. Напрямок передачі енергії від випрямляча до обмотки якоря у випрямному режимі незмінний, оскільки незмінні знаки струму та проти-ЕРС.

Специфічною особливістю роботи на проти-ЕРС є неможливість відкриття тиристорів при досить малих кутах керування. На рис.6 тиристори отримують керучі імпульси у момент часу $\omega t = \alpha$, коли миттєва живильна напруга e_2 поки ще менша від проти-ЕРС.

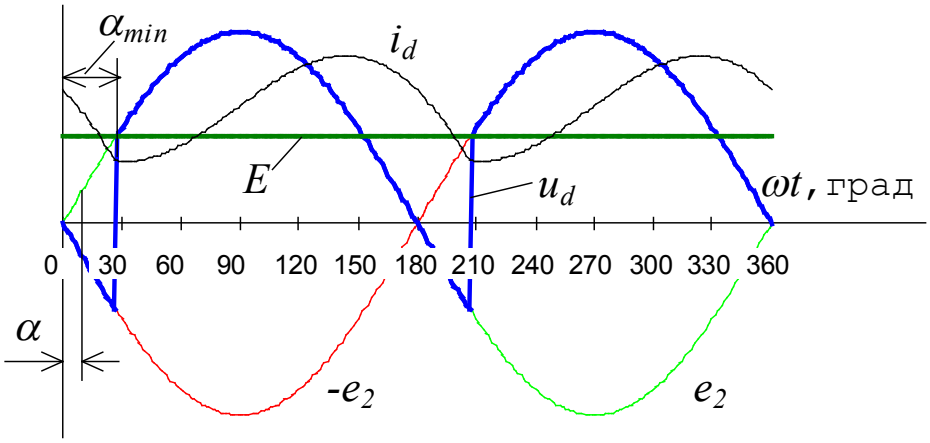

Рис.6

Оскільки до катодів тиристорів прикладена позитивна напруга $E - e_2 > 0$, тиристори не відкриються, поки не зміниться знак цієї напруги. Це стане можливим тільки момент

часу $\omega t > \alpha_{\min} = \arcsin \frac{E}{U_{2m}}$. До того часу залишаться відкритими ті тиристори, які працювали на попередньому напівперіоді. Для відкриття наступної пари тиристорів потрібно, щоб керуючий імпульс не був знятий з керуючих електродів до моменту $\omega t = \alpha_{\min}$. Інакше тиристори взагалі не відкриються. Звичайно, що кожному значенню проти-ЕРС відповідає своє значення мінімального кута керування.

3.2. ІНВЕРТОРНИЙ РЕЖИМ

Якщо змінити знак проти-ЕРС та зробити кут керування більшим від 90° (середня випрямлена напруга при таких кутах теж може мати інший знак), випрямляч переходить до інверторного режиму. На рис.7 зображені діаграми напруг та струму при α=120° і $E=0$. На рис.8,9 - те ж саме при різних проти-ЕРС.

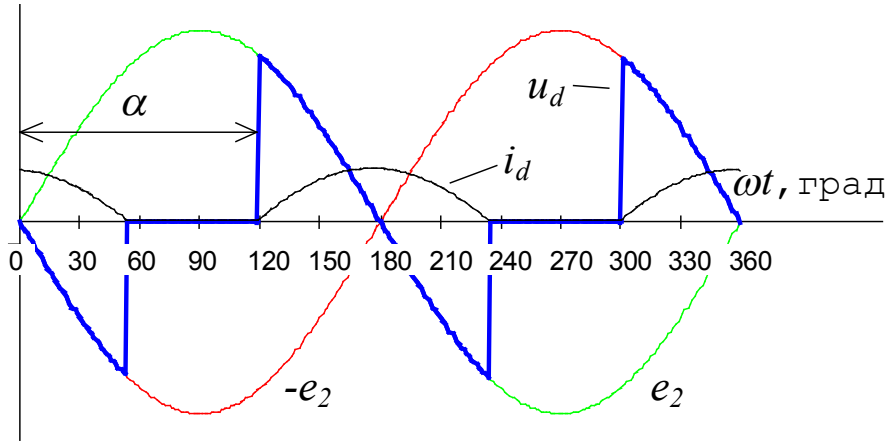

Рис.7

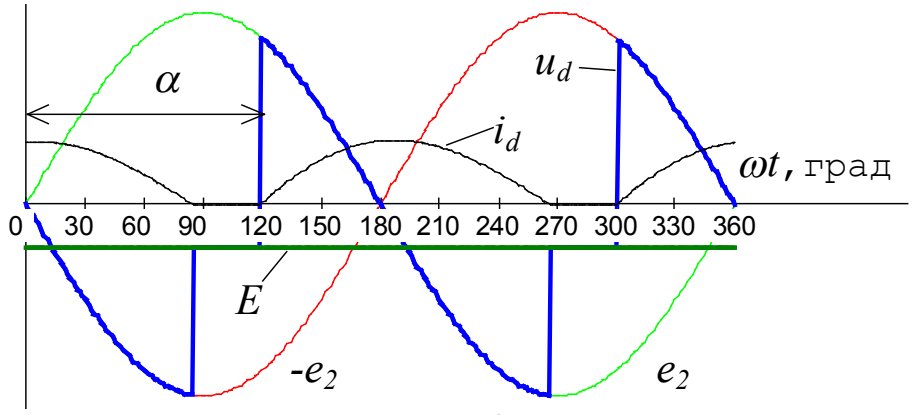

Рис.8

Поява проти-ЕРС, ввімкнутої згідно з напрямком струму, призводить до збільшення його середнього значення та тривалості протікання (див. рис.8). Завдяки цьому середня випрямлена напруга стає негативною, хоч і меншою по модулю від проти-ЕРС (на падіння напруги в активному опорі). Оскільки протягом усього інтервалу провідності напрями струму та проти-ЕРС співпадають, енергія віддається від джерела проти-ЕРС до випрямляча та вторинної обмотки трансформатора і далі до живильної мережі. Подальше збільшення проти-ЕРС сприяє зменшенню і взагалі зникненню безструмової паузи (рис.9).

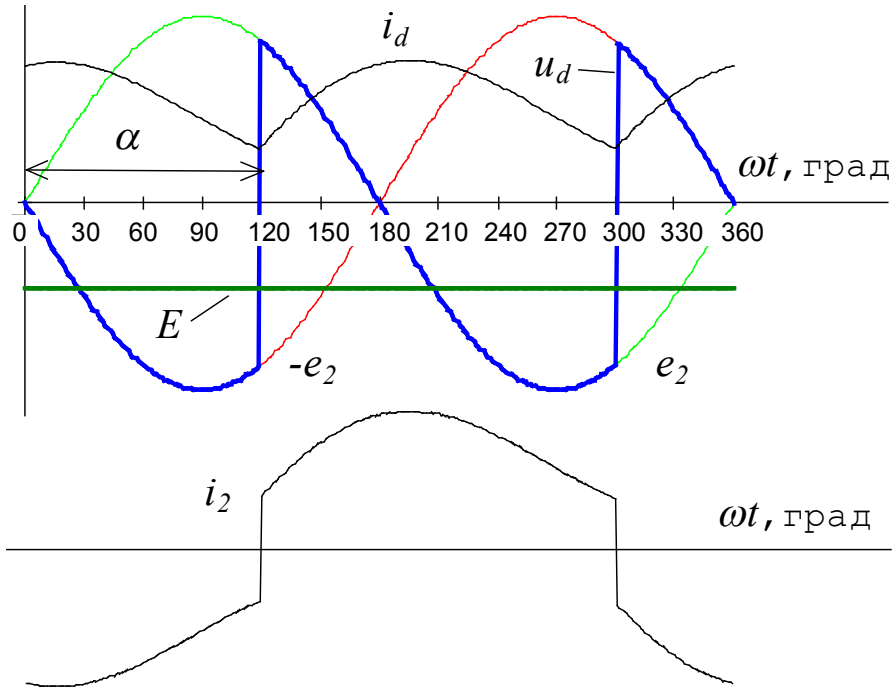

Рис.9

Слід зауважити, що в інверторному режимі зсув між споживаним випрямлячем струмом та ЕРС вторинної обмотки трансформатора більший за 90° (див. рис.9).

3.3. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ МЕХАНІЧНОЇ ІНЕРЦІЇ ДВИГУНА

У попередніх розділах при розгляді електромагнітних процесів у випрямлячі проти-ЕРС вважалася незалежною від часу. Фактично це означало, що момент інерції двигуна на-

стільки великий, що зміною швидкості та ЕРС обмотки якоря при коливаннях струму можна знехтувати.

Насправді ж зміна струму, споживаного двигуном, матиме наслідком зміну рушійного момента, швидкості та проти-ЕРС. Процеси в такій електромеханічній системі описують системою диференційних рівнянь, куди, крім рівняння (1), входить рівняння другого закону Ньютона для обертального руху (т.з. рівняння руху електропривода):

$$M - M_c = J\frac{d\omega}{dt}, \qquad (2)$$

а також два алгебраїчних рівняння:

$$M = c\Phi i_d; \qquad (3)$$

$$E = c\Phi\omega. \qquad (4)$$

В рівняннях (2)-(4) M - рушійний момент двигуна; M_c - статичний момент (момент опору, який виникає в механізмі під час його руху); J - момент інерції двигуна; $c\Phi$ - незмінний (для даної задачі) коефіцієнт пропорційності.

Процеси в електричній частині електропривода, які описуються рівнянням (1), і в механічній його частині, що характеризуться рівнянням (2), впливають один на одного завдяки рівнянням (3) та (4). Оскільки найчастіше механічна інерція набагато більша від електромагнітної, у багатьох випадках процес зміни струму відбувається на фоні практично незмінної швидкості та проти-ЕРС. Рівень проти-ЕРС можна знайти як усталене значення з рівняння (1), прийнявши $u_d = U_d$, $i_d = I_d = I_c = \frac{M_c}{c\Phi}$ та $\frac{di_d}{dt} = 0$:

$$E = U_d - I_c R_н. \qquad (5)$$

Як видно з рівняння (5), рівень проти-ЕРС залежить від середнього значення прикладеної до обмотки якоря на-

пруги та статичного (усталеного) струму, пропорційного моменту навантаження. Тобто проти-ЕРС двигуна встановлюється природним шляхом завдяки внутрішнім властивостям двигуна.

Завдяки самовстановленню ЕРС двигуна і його залежності від прикладеної напруги мінімальний кут керування для конкретної схеми випрямлення залежить лише від середнього струму. Цей кут можна знайти, прирівнявши ЕРС з рівняння (5) $E = U_d - I_c R_н \approx U_{d0} \cos\alpha$ до миттєвого значення змінної напруги $e_2 = E_{2m} \sin\alpha$:

$$\alpha = \alpha_{\min} = arctg \frac{U_{d0}}{E_{2m}} = arctg \frac{2}{\pi} = 32{,}5^0 .$$

З урахуванням падіння напруги в активному опорі цей кут може бути трохи більшим.

3.4. РЕГУЛЮВАЛЬНІ ТА ЗОВНІШНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У режимі безперервного струму незалежно від рівня проти-ЕРС регулювальна характеристика має той же вигляд, що і при роботі на активно-індуктивне навантаження

$$U_d = U_{d0} \cos\alpha . \qquad (6)$$

Збільшення кута керування зменшує випрямлену напругу, пересуваючи робочу точку донизу і вправо вздовж косинусоїди (6). Це неминуче призводить до виникнення граничноно-безперервного режиму (т.А на рис.10).

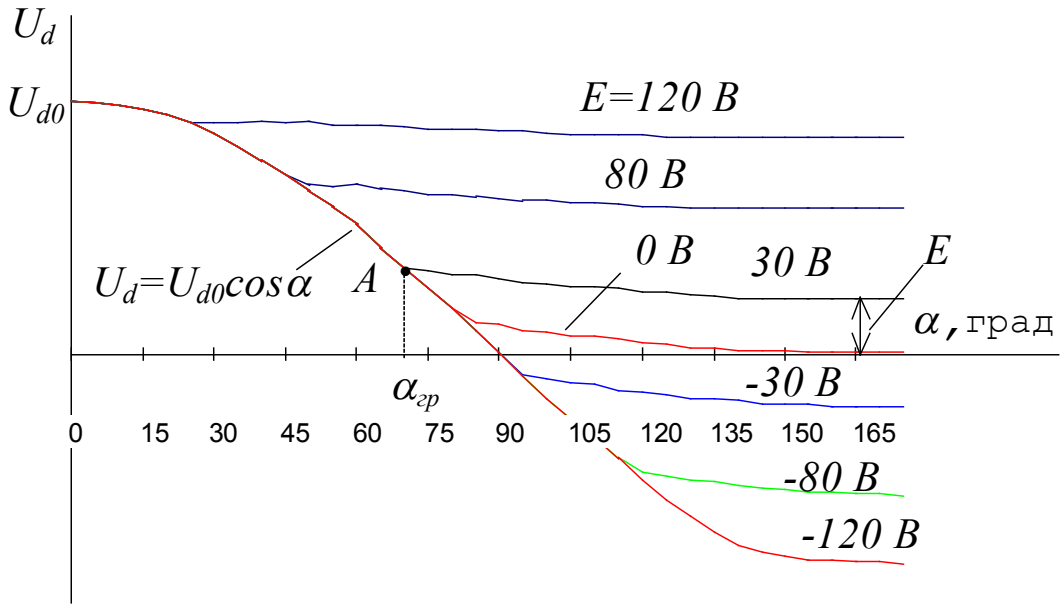

Рис.10

При подальшому збільшенні кута керування випрямляч переходить до режиму переривистого струму, в якому середня випрямлена напруга більша, ніж при безперервному струмі, і ніколи не може стати меншою від проти-ЕРС. Граничний кут керування $\alpha_{гр}$, при якому починається перехід до переривистого струму, збільшується зі зменшенням проти-ЕРС. Тому при різних проти-ЕРС матимемо сім'ю регулювальних характеристик (рис.10). На рис.10 вище осі абсцис розташовані характеристики для випрямного режиму, нижче - для інверторного. Як видно з рис.10, регулювальні характеристики є суттєво нелінійними.

Зовнішньою характеристикою випрямляча називають залежність середньої випрямленої напруги від середнього випрямленого струму. При досить великих середніх струмах при будь-яких кутах керування миттєвий струм безперервний. Оскільки ще спочатку ми знехтували активним опором трансформатора, середня випрямлена напруга при цьому залежить лише від кута керування згідно з (6). Зовнішня характеристика в режимі безперервного струму є горизонтальною лінією (рис.11). Це означає, що випрямляч є ідеальним

джерелом напруги (звичайно, за умовою знехтування його внутрішнім опором).

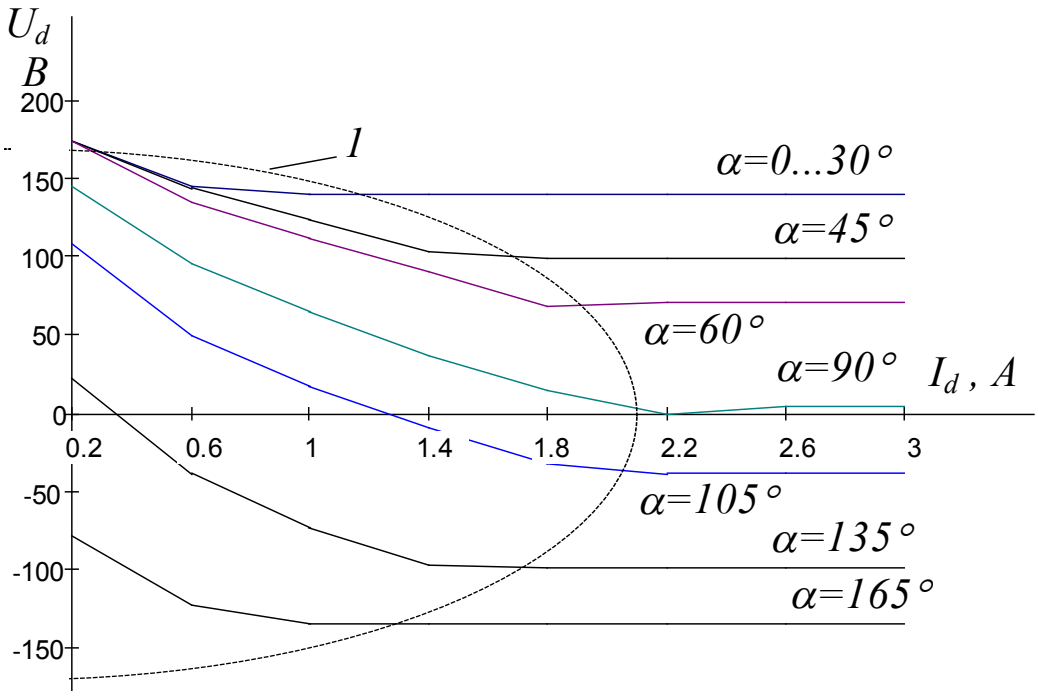

Рис.11

Зменшення середнього струму, яке можливе лише завдяки збільшенню проти-ЕРС, призводить до гранично-безперервного режиму, а надалі - і до режиму переривистого струму. Оскільки в цьому режимі середня напруга більша, ніж при безперервному струмі, випрямлена напруга тим більша, чим менший середній струм. Лінійність зовнішніх характеристик різко порушується, що еквівалентно появі деякого нелінійного внутрішнього опору. Це має наслідком порушення лінійності механічних характеристик двигуна, що живиться від випрямляча, та значним ускладненням проблеми стабілізації його швидкості.

Геометричним місцем точок гранично-безперервного режиму є еліпс 1 (рис.11). Вище осі абсцис розташовані зовнішні характеристики для випрямного режиму, нижче - для інверторного.

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1. Робота виконується на математичних моделях випрямляча, реалізованих за допомогою електронних таблиць Excel.

4.2. Файл Excel складається з двох листів (за кількістю вирішуваних задач).

4.3. Клітинки, в яких розташовані змінні вихідні дані, виділені рожевим кольором.

4.4. Змістом роботи є дослідження електромагнітних процесів на готових моделях шляхом зміни вихідних даних (параметрів навантаження, кутів керування тощо).

4.5. Результатом виконання роботи є файл Excel, який, крім самих моделей, містить у собі рисунки, що є копіями діаграм, отриманих у процесі досліджень. Файл повинен мати ім’я, яке складається з фамілії студента та номера лабораторної роботи.

Контрольні запитання

1. Зі скількох тиристорів складається однофазний мостовий випрямляч?
2. Скільки тиристорів одночасно відкрито в такому випрямлячі?
3. Покажіть два можливих шляхи протікання струму у випрямлячі за схемою рис. 1
4. Покажіть на рис. 2 інтервали часу, протягом яких енергія передається: а) від мережі до навантаження; б) від навантаження до мережі.
5. Покажіть на рис. 2 інтервали часу, протягом яких індуктивний елемент навантаження: а) споживав енергію; б) віддавав енергію.
6. Як поява у складі навантаження проти-ЕРС, направленої проти струму, впливає на середнє значення випрямленого струму?

7. У якому режимі працює електрична машина постійного струму, підключена до виходу випрямляча, якщо процеси в схемі подібні до зображених на рис. 4?
8. Як збільшення проти-ЕРС вплине на тривалість безструмової паузи на рис. 4?
9. Чому за наявності проти-ЕРС подача керуючих імпульсів на тиристори з малим кутом керування не призводить одразу до їх відкривання?
10. Назвіть умови переводу випрямляча до інверторного режиму.
11. У якому режимі працює електрична машина, підключена до виходу випрямляча, якщо останній працює в інверторному режимі?
12. Як збільшення абсолютної величини проти_ЕРС вплине на тривалість безструмової паузи на рис. 8?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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