

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

А.В. Гнатов



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

З ДИСЦИПЛІНИ

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Частина 1

**„Механічні характеристики електропривода постійного
та змінного струму”**

Харків 2020

УДК 621.3

Теорія електроприводу

Конспект лекцій з дисципліни „Теорія електроприводу” Ч. 1. „Механічні характеристики електропривода постійного та змінного струму” / А.В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2020. – 144 с.

Конспект лекцій до дисципліни „Теорія електроприводу”. Ч. 1 „Механічні характеристики електропривода постійного та змінного струму” містить теоретичний матеріал, необхідний для вивчення даної дисципліни. Після викладення матеріалу по кожній темі наведені запитання, відповідь на які дозволить сформувати повну уяву по дисципліні

Ілюстрацій – 45, таблиць – 2, бібліографія – 28 найменувань.



ПЕРЕДМОВА

Електропривод застосовується майже у всіх галузях народного господарства, де електрична енергія перетворюється на механічну для приведення в дію робочих машин і механізмів.

Теорія електроприводу (ТЕП) є теоретичною основою спеціальності «Електричні системи і комплекси транспортних засобів». Вона дає змогу описувати, пояснювати і передбачати явища, що відбуваються в електричному приводі транспортних засобів та відповідних електромеханічних системах.

Основні загальні завдання сучасної ТЕП полягають у з'ясуванні закономірностей визначення характеристик і робочих режимів електропривода, обґрунтуванні раціонального вибору його елементів, у проектуванні дослідженні автоматичних (працюють без участі обслуговуючого персоналу) або автоматизованих (працюють з незначною участю обслуговуючого персоналу) електромеханічних систем автоматичного керування. ТЕП широко використовує положення теорії електричних машин, теоретичної механіки і теорії автоматичного керування.

Актуальність видання конспекту лекцій обумовлена необхідністю доповнення існуючої навчальної літератури по електроприводу недостатньо висвітленими питаннями як наукового, так і методичного характеру, а також відсутністю підручників з цієї спеціальності на українській мові. Серед цих питань електроприводи з постійного та змінного струму, взаємозв'язані електроприводи, застосування частотно-керованого електропривода тощо.

Коротка історична довідка розвитку науки електрика.

В 18 столітті були відомі тільки закони електростатики і не існувало поняття електричного струму і його прояви.

Розвиток електродинаміки почався з появи перших джерел струмів (Вольтов стовп 1800 р., а також гальванічні елементи).

В першій половині XIX ст. було зроблено велику кількість, як теоретичних відкриттів, так й їх практичних застосувань. Наприклад, були сформульовані основні закони електротехніки: закон Ампера, Ома, Кірхгофа, Джоуля-Ленса, Фарадея. А також багато інших.

В 1834 р. – зроблено електричний двигун.

В 1859 р. – зроблено кислотно-свинцевий акумулятор.

В 1860 р. – зроблено електромашинний генератор.

В 1881 р. – запропоновано систему багатofазового струму (генератор, трансформатор, комутаційна апаратура, двигун) – автор якої М.О. Доливо-Добровольський. Це докорінно змінило побудову систем електропостачання.

Але найбільш бурхливо електрика розвинулась в XX столітті. Утворюються крупні теплові, гідравлічні і атомні електростанції потужністю до 6 гектоват.

Цей конспект лекцій є складовою частиною навчальних посібників та методичних вказівок, що видаються на кафедрі, і присвячених вивченню дисципліни „Теорія електропривода”.

Зміст конспекту лекцій відповідає програмам різних електротехнічних дисциплін, що вивчаються студентами.

Наявність в книзі питань для самоконтролю дозволяють перевірити свої знання й усунути пробіли в них.

Загальне редагування виконане доктором технічних наук, професором О.В. Бажиновим.

Автори сподіваються, що цей конспект лекцій допоможе вам при вивченні електротехнічних дисциплін та бажають успіху.

ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Перший електропривод у Росії розробив академік В. С. Якобі-У 1838 р. електродвигун змонтували на човні, що зумовило появу першого в світі електрохода. Моторний човен Якобі з 12 – 14 пасажирами, використовуючи як джерело електричної енергії батарею сухих елементів, розвивав проти течії на Неві середню швидкість 4 км/год. Спочатку потужність електродвигуна становила 550 – 736 Вт, а після вдосконалень (1839 р.) підвищилась у 3 – 4 рази. Висока вартість та мала потужність електричних джерел живлення були основними причинами того, що електроходи тоді не дістали широкого застосування. Для підтвердження цього достатньо сказати, що в той час 1 кВт · год електричної енергії коштував ,приблизно у 12 разів більше, ніж парова енергія.

Практика вимагала більш економічних і потужних джерел електроенергії. Такими джерелами стали електричні генератори. Перший патент на електричний генератор з кільцевим якорем одержав у 1870 р. З. Грамм. Це поклало початок поширенню промислових електрогенераторів і електроприводів;

Коротко розглянемо історію розвитку електропривода в Україні та Росії. У 1882 р. В. Н. Чиколєв засновник журналу, «Электричество» (1880 р.) розробив електропривод для швейної машини, а в 1886 р – для вентилятора. Обидві конструкції електроприводів були удостоєні Золотих медалей на Всеросійських виставках.

У 1890 – 1894 рр. перші електроприводи було встановлено на кораблях військово-морського флоту для повертання гарматних башт, рульових пристроїв, підйомників боєзарядів. Використання електроприводів на кораблях військово-морського флоту дало імпульс для їх промислового виготовлення. У 1892 р електроприводи вперше було встановлено на міському транспорті (трамвай у м Києві). Пізніше трамваї з електроприводами почали, експлуатуватись в інших містах Казані, Нижньому Новгороді, Москві (1903 р.), Петербурзі (1907 р.). В 1896 р на підмосковних текстильних фабриках уже використовували електроприводи з двигунами постійного струму.

Для перших електроприводів властивим було використання двигунів постійного струму з редукторами та ручним керуванням комутаційними Пристроями. На I Всеросійському електротехнічному з'їзді у Петербурзі в 1900 р. говорилося про використання електроприводів потужністю 4,4 і 6,6 кВт для поршневих насосів на Зирянівському руднику (Алтай).

Перші шахтні підйомні установки, вентилятори, насоси з електроприводами почали використовувати на Донбасі ще в 1910 р., а в 1912 р. потужність електроустановок на шахтах Донбасу досягла 30 МВт.

Особливо швидкими темпами почав розвиватися електропривод з появою техніки використання трифазного змінного струму, розробленої М. О. Доливо-

Добровольським (1889 р.). Прості, надійні та економічні асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором визначили необхідні умови для більш широкого використання їх у, промисловості. В 1893 р. в Україні та Росії працювало 209 асинхронних електродвигунів сумарною потужністю 1,5 МВт. Винахід П. Н. Яблочковим і Н. Ф. Усагіним трансформаторів дав змогу вирішити проблему передачі електроенергії на великі відстані і сприяв розвитку електроприводів з двигунами змінного струму.

Поряд з виникненням промислових електроприводів, розвивалися теоретичні основи їх роботи. Ґрунтовною працею в цій області стала праця Д. А. Лачинова «Електромеханічна робота», опублікована в 1880 р. У цій праці було дано класифікацію електричних машин постійного струму за системами збудження, Математичні вирази механічних характеристик, досліджено питання живлення електродвигуна від автономного генератора.

Крім вирішення інженерних і наукових питань, дуже важливою, умовою розвитку електропривода була підготовка інженерів електротехніків, вперше розпочата в Електротехнічному інституті у Петербурзі в 1892 р. У цьому ж році в Харківському технологічному інституті було введено курс електротехніки. Подібний курс почали викладати в 1893 р. також у Петербурзькому гірничому інституті, а з 1901 р. у Петербурзькому і, Київському політехнічних інститутах. Перший в Україні електротехнічний факультет було відкрито в Київському політехнічному інституті у. 1918 р.

Важлива роль у розвитку електропривода та його автоматизації належить Харківському електромеханічному заводу (ХЕМЗ), заводське бюро досліджень якого переросло в центральну заводську лабораторію, а потім у великий науково-дослідний інститут.

Перший етап розвитку електропривода визначався протистоянням двох тенденцій використанням трансмісійної чи одиночної систем електропривода. При трансмісійній системі електропривод приводив у дію єдину для групи механізмів трансмісію, від якої механічна енергія передавалась до окремих робочих машин (механізмів); при одиночній (індивідуальній) системі електропривода кожна робоча машина або механізм приводились у дію окремим електродвигуном. До початку 20-х років нашого століття одиночний електропривод в основному витіснив трансмісійну систему, основні недоліки якої полягали у великих габаритних розмірах, низьких ККД і надійності; труднощах експлуатації і регулювання режимів роботи окремих об'єктів тощо.

На першому етапі розвитку електропривода при оцінці його ефективності основна увага приділялась вартості самого електропривода і енергії його живлення. Такі важливі фактори як можливість інтенсифікації промислових процесів на його основі та поліпшення їх якісних характеристик не враховувались. Осмислення цих найважливіших переваг електропривода дало могутній по-

штовх для електрифікації промисловості, різкого поширення сфери використання електропривода як в Україні, Росії, так і за кордоном. Так, сумарна потужність електродвигунів у США в 1909 р. становила 25,9 % сумарної потужності всіх двигунів країни, а в 1925 р. їх частка вже досягла 70 %. Подібна тенденція мала місце також в Англії і Німеччині у 1927 р. У 1936 р, сумарна потужність електродвигунів у колишньому СРСР досягла 82 % потужності всіх двигунів.

З розвитком одиночного електропривода та збільшенням потужності електродвигунів виникла тенденція розвитку також багатодвигунного електропривода, при якому на одній робочій машині розміщувалось кілька двигунів для приведення в дію різних елементів машини, наприклад, двигуни подачі та різання у верстатах, вуглевидобувних машинах, індивідуальні приводи рольгангів прокатних станів тощо. Використання індивідуальних двигунів дало змогу спростити конструкцію механізмів поліпшити їх надійність і техніко-економічні показники, а іноді й оптимізувати керування технологічними процесами.

На початку 20-х років минулого століття у промисловості країни використовували як правило імпортні електродвигуни та електроапаратуру, і лише в кінці 20-х та на початку 30-х років почали серійно випускати вітчизняні електроприводи (для конвеєрів, лебідок тощо). На початку 30-х, років в ХЕМЗі почали виготовляти пристрої для дистанційного (кнопкового) керування електроприводами, що стало основою наступного етапу розвитку електропривода – його автоматизації. Так, у 1932 р. ХЕМЗ виготовив релейно-контакторну апаратуру для реверсивного електропривода блюмінга потужністю 5,14 МВт, яка дала змогу автоматизувати процес керування. З 1934 р. вітчизняні магнітні пускачі для дистанційного керування виготовляли у комплекті з шахтними вибійними механізмами.

Починаючи з 30-х років, у колишньому СРСР почався масовий випуск металорізальних верстатів з багатодвигунними електроприводами і релейно-контакторною апаратурою керування. Тоді ж з'являються перші копіювальні верстати, автоматизовані на основі принципу керування за відхиленням, реалізованого за допомогою замкнутих систем автоматичного керування із зворотним зв'язком (системи автоматичного регулювання).

Замкнуті системи автоматичного керування в 30-х роках отримують все більший розвиток. У довоєнні роки основна увага приділялась розвитку автоматизованого електропривода у важкій промисловості – металургійній, гірничій, а також у машинобудівній. Досить швидкими темпами розвивалась елементна база (безконтактні сельсини). У 1936 р. було виготовлено першу вітчизняну підйомну машину з редукторним електроприводом постійного струму за системою генератор – двигун (Г –Д) з контакторним керуванням. Для металургійної промисловості розробляли малоінерційні іонні електроприводи великої потужності.

У другій половині 30-х років з'явилися автоматизовані електроприводи з асинхронними двигунами великої потужності для шахтних підйомних машин. На ХЕМЗі було розроблено схеми й апаратуру автоматизованого пуску асинхронних електроприводів у функції струму і прискорення. В 1937 р. за Ф. І. Бутасвим і М. В. Маргиновим було закріплено авторство на систему керування генератором постійного струму з декількома обмотками керування, що сприяло розвитку різних електромашинних підсилювачів (ЕМП). Використання ЕМП в автоматизованому електроприводі в багатьох випадках давало змогу замінити великогабаритні релейно-контакторні схеми більш надійними, дістати потрібні характеристики при плавній зміні швидкості. Було розроблено системи електропривода з ЕМП з двокаскадними підсилювачами. ЕМП все більше використовувались у електроприводах підйомних машин, буюмінгів, екскаваторів тощо. Потужність серійних ЕМП постійно зростала і досягала десятків кіловат. ЕМП застосовувались також в електроприводах змінного струму (для електродинамічного гальмування). Винахід і поширення ЕМП сприяли появі в автоматизованому електроприводі періоду електромашинної автоматики як нового ступеня його розвитку.

Велика Вітчизняна війна внесла корективи у розвиток електропривода як для потреб фронту, так і в наступний період відбудови народного господарства країни. У багатоплановому розвитку електропривода в цей і наступні періоди можна зазначити такі основні напрямки:

- постійне розширення сфери використання електропривода;
- збільшення сумарної потужності електроприводів і потужності окремих установок;
- розширення галузей використання регульованих електроприводів розвиток і вдосконалення елементної бази автоматизованого електропривода;
- розробка і розвиток теорії автоматизованого електропривода та зростання наукового і технічного рівня;
- розвиток електропривода як підсистеми автоматизованого керування технологічними процесами;
- розробка нових конструкцій електромеханічних перетворювачів (електродвигунів), підвищення їх надійності та техніко-економічних показників;
- поліпшення підготовки інженерних і наукових кадрів для обслуговування автоматизованого електропривода.

Основні тенденції та особливості розвитку сучасного електропривода

Тенденція розширення галузей використання електропривода, що особливо яскраво проявилось на початку нинішнього століття, простежується і тепер. Характерним підтвердженням цього є використання індивідуального електропривода для коліс потужних та надпотужних автомашин (система мотор-колесо), витіснення електроприводами гідравлічних приводів, роботи по розробці гібридних авто та електромобілів тощо.

Потужність одиночних електроприводів постійного і змінного струму досягла десятків мегават, наприклад потужність електроприводів гребного вала атомного криголама «Арктика» становить 75 МВт. У металургійній, гірничій промисловості є об'єкти (прокатні стани, підйомні установки тощо), потужність електроприводів яких перевищує 10 МВт. Так, сумарна потужність трьох електроприводів тяги, підйому ковша і повороту платформи крокуючого екскаватора-драглайна ЕШ 100.100 становить 28 МВт.

Розширення галузей використання електроприводів, зростання їх сумарної та одиничної потужності гостро ставить питання про необхідність поліпшення техніко-економічних показників, забезпечення на основі регульованого електропривода найбільш економічних технологічних режимів роботи промислових об'єктів.

У тих випадках, коли згідно з технологічними умовами немає потреби змінювати швидкість, застосовують синхронні електродвигуни, що мають високі ККД і дають змогу підвищити коефіцієнт потужності електричної мережі.

У промисловості в масових нерегульованих приводах найчастіше використовують високонадійні економічні асинхронні двигуни змінного струму з короткозамкнутим ротором.

Намагання створити оптимальні умови перебігу технологічних процесів сприяли розвитку регульованих приводів. Регульовані електроприводи спочатку створювались на основі зміни параметрів кінематичної ланки механічної частини електропривода, як правило, в результаті зміни передаточного числа редуктора, встановленого між електроприводом і робочою машиною (механізмом). Недоліком цього способу регулювання швидкості були відносно низька надійність і труднощі плавного її регулювання. На наступному етапі розвитку поширились електроприводи з плавним регулюванням швидкості самого двигуна. Спочатку базою для таких електроприводів були електродвигуни постійного струму. Останнім часом все більше використовуються економічніші та надійніші електродвигуни змінного струму.

Завдання розробки регульованого електропривода змінного струму вирішувалось спочатку за допомогою резисторів, увімкнених у роторну, а іноді в статорну частини двигуна. Перевагу мали металеві реостати. В електроприводах

на базі двигунів з фазним ротором застосовувались також водяні реостати. Через громіздкість, труднощі в експлуатації, зокрема необхідність підтримання на заданому рівні концентрації електроліту та деякі інші недоліки, дана система регульованого електропривода істотного поширення не знайшла.

Завдяки зусиллям, спрямованим на отримання простіших і надійніших систем регульованого електропривода, скороченню релейно-контакторної апаратури було розроблено дроселі, які вмикали в статорну обмотку двигуна. Значні масогабаритні параметри дроселів, їх інерційність і зниження коефіцієнта потужності зумовили істотні недоліки цієї системи електропривода.

Пізніше поширились засоби регулювання швидкості двигунів, внаслідок зміни параметрів електричної енергії живлення: напруги – для двигунів постійного струму, напруги та частоти – для двигунів змінного струму. Для цього використовували спеціальні перетворювачі, які вмикали між електричною мережею і двигуном.

В електроприводах постійного струму широко почали застосовувати електромашинні перетворювачі за системою генератор – двигун ($\Gamma - Д$). У цьому випадку двигун змінного струму, дизель або інший механізм обертав генератор постійного струму, обмотка збудження якого живилась від спеціального генератора невеликої потужності чи електромашинного підсилювача (квадратична система $\Gamma - Д$), магнітного ($\Gamma Д - МП$) або напівпровідникового – тиристорного (система $\Gamma Д - ТП$) підсилювача. Регулювання швидкості основного приводного двигуна здійснювалось внаслідок зміни напруги, прикладеної до його якоря. Автоматизація забезпечувалась згідно з законом зміни напруги на обмотці збудження генератора постійного струму за допомогою відповідного підсилювача. Система $\Gamma - Д$ мала задовільні регульовальні характеристики, була достатньо надійною. Її основні недоліки: громіздкість, велика кількість електромашин, що беруть участь у роботі, а тому порівняно велика інерційність і низький ККД, значні затрати на її спорудження та експлуатацію. На прикладі системи $\Gamma - Д$ добре видно тенденції розвитку елементної бази електропривода.

Із розвитком перетворювальної техніки оборотні електромашинні перетворювачі перших систем $\Gamma - Д$ було замінено економічнішими та надійнішими статичними перетворювачами (магнітними, тиристорними). Спочатку така заміна стосувалась лише перетворювачів, що живили обмотку збудження основного генератора. Однак з появою статичних перетворювачів великої потужності виникла можливість заміни також основного генератора магнітним підсилювачем, а потім тиристорним перетворювачем. Системи електропривода магнітний підсилювач – двигун постійного струму ($МП - Д$), тиристорний перетворювач – двигун ($ТП - Д$) почали енергійно скорочувати сферу використання системи $\Gamma - Д$, яка нині в основному використовується у промислових установках великої потужності.

Регульований привод змінного струму з регулюванням напруги живлення через м'якість механічних характеристик і порівняно низькі техніко-економічні показники тоді не знайшов розвитку. Тому все частіше швидкість двигуна почали регулювати зміною частоти струму. До 50-х років це питання вирішували за допомогою електромеханічних перетворювачів частоти, які із-за складності не дістали значного поширення. Поява тиристорних перетворювачів частоти дала змогу створити достатньо надійний регульований електропривод змінного струму з жорсткими характеристиками і широким діапазоном регулювання (привод ТПЧ – Д), що базувався на використанні асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором. З підвищенням надійності напівпровідникових пристроїв і поступовим зменшенням їх вартості система ТПЧ –Д застосовувалась все більше. Тепер вона є однією з найперспективніших сучасних систем регульованого електропривода.

Важливе місце у сфері застосування регульованого електропривода змінного струму великої потужності мають каскадні системи, характерним прикладом яких є електромашинний каскад з однакірним перетворювачем. Це спеціальна електрична машина, що перетворює електричну енергію ковзання ротора приводного асинхронного двигуна на енергію постійного струму. За її допомогою приводиться в рух двигун постійного струму. Отримана механічна енергія від двигуна постійного струму використовується для приведення в дію синхронних генераторів, що віддають енергію в мережу (електричні каскади) або для одержання додаткового моменту на валу основного приводного асинхронного двигуна (електромеханічний каскад). Швидкість приводного асинхронного двигуна регулюється зміною електрорушійної сили (ЕРС) на кільцях однакірного перетворювача внаслідок зміни сили струму в обмотці збудження.

Електромашинні каскадні системи досить складні, громіздкі і мають високу вартість. Їх переваги: високий ККД, зумовлений використанням енергії ковзання приводного двигуна, можливість плавної зміни швидкості потужного двигуна змінного струму. Недоліки електромашинних каскадів значною мірою було усунуто заміною обертових машинних перетворювачів на статичні. Це зумовило появу сучасних машино-напівпровідникових каскадів, в яких випрямлена ЕРС ковзання приводного двигуна за допомогою інвертора та узгоджуючого трансформатора віддається в мережу. Швидкість приводного двигуна регулюється зміною кута відкривання тиристорів інвертора.

У багатьох випадках зміна швидкості приводного механізму зумовлює необхідність розробки спеціальних двигунів, іноді порівняно вузького призначення з невеликим діапазоном регулювання, наприклад двигунів з переключанням полюсів обмотки. Вони дають змогу забезпечити ступінчасту зміну швидкості, наприклад у ліфтових підйомниках. Розробку і вивчення таких двигунів проводили в Інституті електродинаміки, у Харківському електромеханічному заводі. З

метою спрощення передачі енергії від електродвигуна до механізму, усунення перетворювачів обертального руху двигуна на поступальний, зменшення металомісткості електропроводів було розроблено так звані лінійні електродвигуни. Цікавою модифікацією електропривода з лінійним електродвигуном став магнітогідродинамічний привод (МГД-привод), в якому функції рухомої частини виконував розплавлений метал, завдяки чому МГД-привод забезпечував транспортування (перекачування) розплавленого металу.

Важливим сучасним напрямком вдосконалення електроприводів є розробка безредукторних електроприводів, в яких робочий орган самого об'єкта є рухомим елементом електродвигуна. В деяких випадках при поступальному русі робочого органу модифікацією такого електропривода може бути електропривод з лінійним двигуном.

Однією з основних сучасних тенденцій розвитку автоматизованого електропривода є створення локальної системи в системі автоматизації всього процесу.

Специфічні вимоги щодо електропривода ставить розвиток робототехніки. Основною з них у даній сфері є необхідність розробки високомоментних, малоінерційних, регульованих електроприводів невеликої потужності. Поява гнучких автоматизованих виробництв, у свою чергу, потребує розробки високоефективних, надійних мікропроцесорних електромеханічних систем. Необхідність підвищення надійності і економічності автоматизованих електроприводів поряд з більш жорсткими вимогами щодо якості їх виготовлення ставить завдання розробки принципово нових технічних рішень. Прикладом цього може бути використання кріогенного охолодження двигунів потужних електроприводів, принципів надпровідності при розробці нових типів електродвигунів та електричної апаратури.

Важливе технічне значення має розробка уніфікованих блочних систем керування, які дають змогу спростити діагностику, підвищити експлуатаційну надійність електроприводів. Особливо актуальною є необхідність підвищення надійності та техніко-економічних показників електроприводів, вдосконалення їх елементної бази, поліпшення якості роботи електромеханічних систем керування, широкого використання в автоматизованому електроприводі засобів обчислювальної техніки і мікропроцесорного керування.

Одним з найважливіших сучасних завдань є також поліпшення якості підготовки інженерних і наукових кадрів у сфері автоматизованого та автоматичного електроприводів.

Завдання теорії електропривода

Основним загальним теоретичним завданням сучасної теорії електропривода є вивчення загальних закономірностей поведінки електроприводів у статичному і динамічному режимах. Важливою особливістю сучасної теорії є дослідження динамічних особливостей замкнутих електромеханічних систем з електроприводами різних видів з урахуванням особливостей об'єктів керування – робочих машин і механізмів.

Важливими сучасними науковими напрямками в теорії електропривода є:

- розробка і вдосконалення систем регулювання електродвигунів постійного і особливо змінного струму;
- розробка і вдосконалення новітніх вентильних електроприводів для автотранспортній промисловості
- конструювання спеціалізованих регульованих електродвигунів і відповідних технічних засобів;
- дослідження, спрямовані на поліпшення якісних характеристик електропривода – швидкодії, точності, оптимізації режимів роботи тощо;
- дослідження надійності і техніко-економічних показників;
- вивчення автоматизованих електроприводів і замкнутих електромеханічних систем керування з урахуванням особливостей об'єкта і ланок системи (інерційності, пружності, нелінійностей тощо);
- розробка і дослідження цифрових, мікропроцесорних електромеханічних систем керування з електроприводами різних видів.

Основні завдання курсу «Теорія електропривода» для підготовки інженерів за спеціальністю « Електричні системи і комплекси транспортних засобів» — це забезпечити студентів необхідними знаннями і навичками в сфері дослідження, проектування, наладки та експлуатації сучасних систем електропривода створити необхідну теоретичну базу знань для вивчення інших спеціальних дисциплін.



Лекція № 1

ТЕМА №1: Електропривод, його різновиди та елементи

План

1. Визначення автоматизованого електропривода; типи руху, які здійснюються електроприводами
2. Структурна і кінематична схема електропривода.
3. Класифікація електроприводів.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АВТОМАТИЗОВАНОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА; ТИПЫ РУХУ, ЯКІ ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Автоматизованим електроприводом (ЕП) називається електромеханічна система, що складається з електричного двигуна та перетворюючого і передавального пристроїв, призначених для приведення в рух виконавчих органів робочої машини і управлінням цим рухом.

Основним елементом, безпосередньо перетворюючим електричну енергію в механічну, є електродвигун.

Призначення автоматизованого електроприводу полягає в передачі машині обертального і поступального руху, і, головним чином, в забезпеченні оптимального (з погляду статичних і динамічних характеристик – момент (сила); швидкість прискорення) режиму робіт машин, при якому досягається найбільша продуктивність при високій (достатньої) точності.

2. СТРУКТУРНА І КІНЕМАТИЧНА СХЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Структурна схема автоматизованого ЕП приведена на рис. 1.1

В структурній схемі можна виділити три основні частини (три основні елементи):

1) МЧ – механічна частина приводу. Включає робочий механізм РМ, передавальний пристрій ПП, призначений для передачі механічної енергії від пристрою з електродвигуном ЕД до виконавського органу робочої машини і для зміни вигляду і швидкості руху і зусилля (моменту обертання). РД – ротор двигуна.

2) ЕД – пристрій з електричним двигуном, призначений для перетворення електричної енергії в механічну, або механічної в електричну. На схемі ЕД пристрій (або водій) представлений двома елементами: електромеханічним перетворювачем енергії ЕМП (на вхід якого подаються електричні сигнали у вигляді напруги і струму), що перетворює електричну потужність в механічну потужність,

і масою ротора двигуна (РД), на яку впливає момент M двигуна при кутовій швидкості ω .

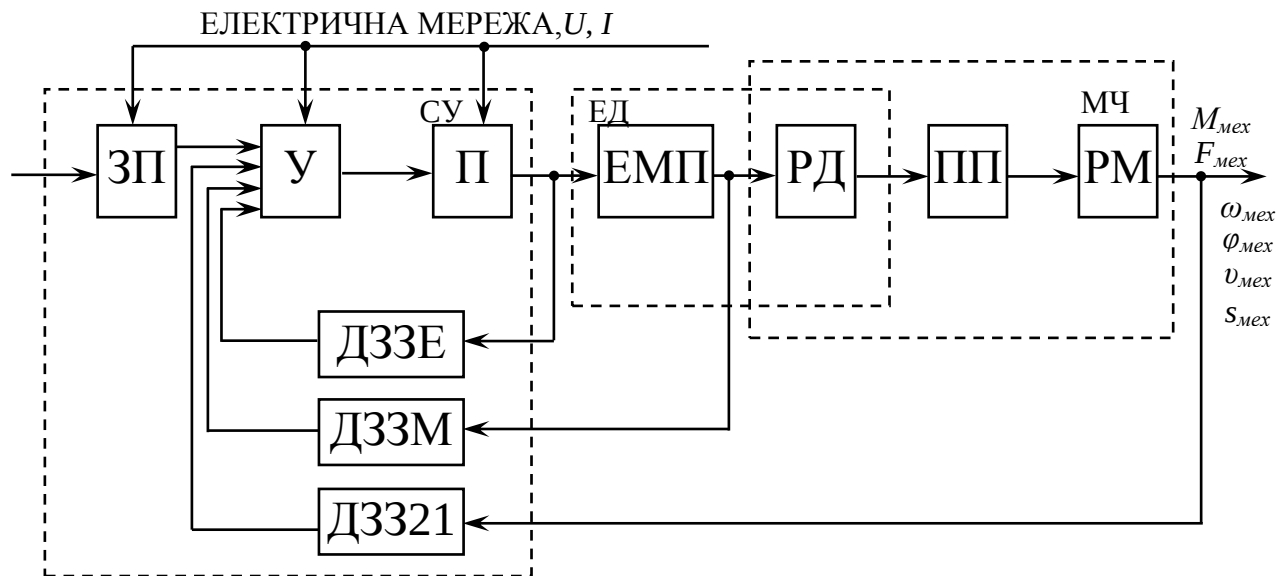


Рисунок 1.1 – Структурна схема автоматизованого ЕП

3) СУ – система управління, що складається з частини, що перетворює (П – перетворювача), управляючого пристрою (У), пристрою, що задає режим роботи (ЗП) і датчиків зворотного зв'язку – електричних ДЗЗЕ і механічних ДЗЗМ 1 і ДЗЗМ 2. Перетворювач П призначений для живлення двигуна і створення управляючого впливу на нього. Він перетворює струм, напругу та частоту або застосовує інші показники якості електричної енергії, що підводиться до двигуна. Пристрій У, управляюче перетворювачем П, Одержує командні сигнали від пристрою, що задає режим роботи ЗП, а інформацію про поточний стан електроприводу і технічного процесу – від датчиків зворотного зв'язку. За допомогою цих датчиків електричні і механічні характеристики двигуна перетворюються в пропорційні цим параметрам електричні сигнали, які подаються в пристрій управління У. В ньому поточний стан ЕП і технічного процесу порівнюється із заданим, і за наявності неузгодження виробляється управляючий сигнал, що впливає через перетворювач П на ЕП у напрямі усунення виниклого неузгодження з необхідною точністю і швидкістю.

З точки зору розподіл механічної енергії ЕП можна розділити на три групи:

Груповий електропривод забезпечує рух виконавських органів декількох робочих машин або декількох виконавських органів. Передача механічної енергії

від ЕД до декількох робочих машин проводиться за допомогою однієї або декількох трансмісій. Тому такий привід називають *трансмісійним* (рис. 1.2).

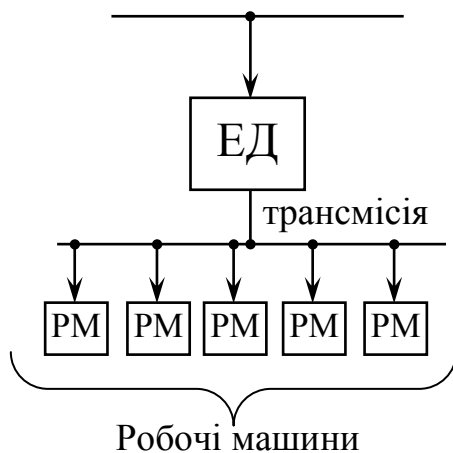


Рисунок 1.2 – Структурна схема трансмісійного електроприводу

Трансмісії вельми громіздкі, ускладнюють конструкцію і створюють значний шум.

Тому від трансмісійних приводів прагнули відмовитися шляхом установки ЕД на кожну робочу машину (РМ). Проте усередині РМ між окремими її частинами залишаються складні механічні зв'язки, тому такий привід також може вважатися груповим, оскільки в ньому має місце перерозподіл механічної енергії. Схема такого групового приводу приведена на рис. 1.3.

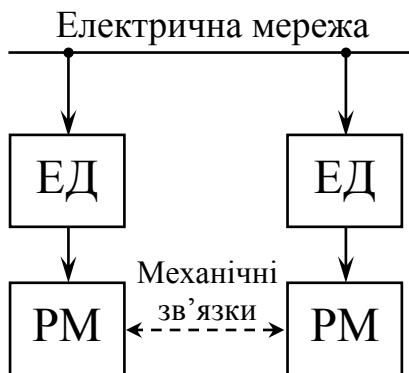


Рисунок 1.3 – Структурна схема групового ЕП

Недоліків, зв'язаних із застосуванням трансмісії прагнуть уникнути застосовуючи індивідуальну і взаємозв'язану ЕП. *Індивідуальний привід* відрізняється досліджуванням окремого ЕД для кожного виконавчого органу (ВО), що вигідно відрі-

зняє його від групового по енергетичних показниках (ЕД і ВО в точності відповідає один одному по потужності). Прикладом індивідуального ЕП є подовжньо-фрезерний верстат, в якому від різних ЕД приводяться вертикальне і подовжнє переміщення.

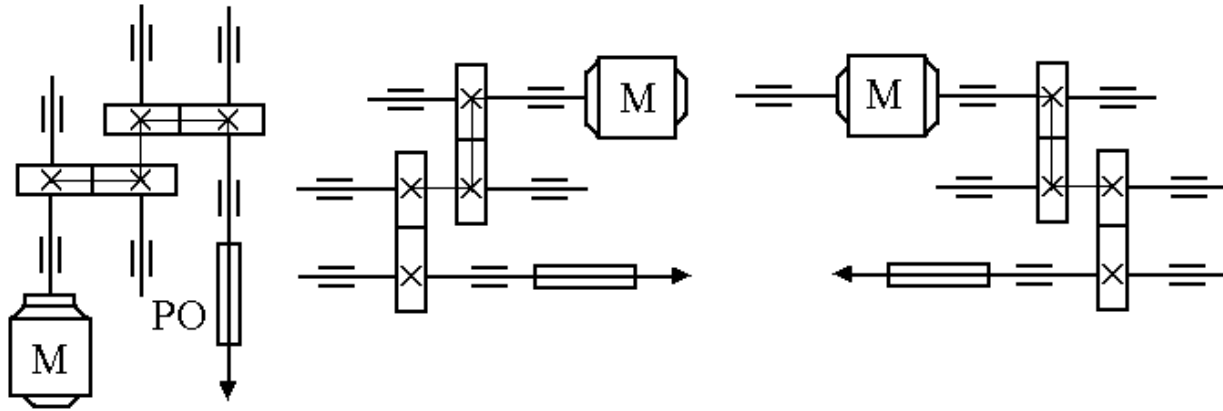


Рисунок 1.4 – Індивідуальні ЕП робочих органів (шпинделів) подовжньо-фрезерного верстата

Взаємозв'язаний ЕП містить два або декілька електрично або механічно зв'язаних ЕП, при роботі яких підтримується задане співвідношення або рівність швидкостей, або навантажень, або положення виконуваних органів робочих машин.

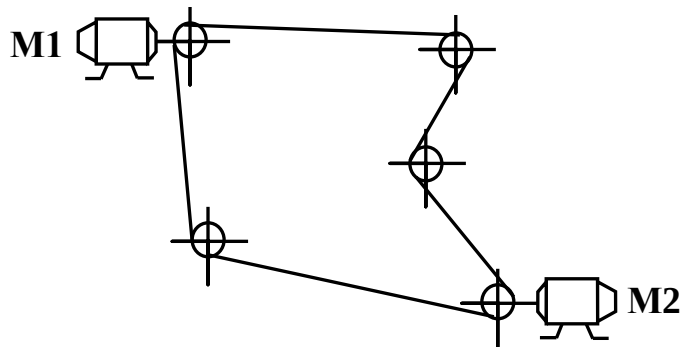


Рисунок 1.5 – Схема взаємозв'язаного приводу конвеєра

Прикладом взаємозв'язку ЕП може служити привід ланцюгового конвеєра: одне з різновидів взаємозв'язку. *Багатодвигунний ЕП* – це ЕП, двигуни якого спільно працюють на один вал. Робота декількох двигунів на один вал має на меті здійснювати рівномірний розподіл статичних і динамічних навантажень, тобто збалансувати роботу могутнього механізму.

3. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Різноманіття виробничих процесів і виконуваних приводом задач обумовлює можливість класифікувати ЕП по різних ознаках.

По виду руху

ЕП можуть забезпечувати:

1. обертання однонаправлене;
2. обертання реверсивне;
3. поступальне реверсивне;

1 і 2 забезпечується ЕД звичайного виконання; поступальне – ЕД звичайного виконання спільно з механізмом перетворення (кулісним, гвинтовим, шнековим, рейковим, черв'ячним і т.д.)

По ступеню керованості:

- 1) нерегульований – для приведення в дію ВО РМ з однією робочою швидкістю, параметри приводу змінюються тільки внаслідок обурюючих дій.
- 2) Регульований – для повідомлення змінної або незмінної швидкості ВО машини, параметри можуть змінюватися під впливом управляючого пристрою.
- 3) Програмно-управляємий – керований відповідно до заданої програми.
- 4) Що стежить – автоматично відпрацьовує переміщення ВО РМ з певною точністю відповідно до довільної зміни сигналу, що задає режим роботи.
- 5) Адаптивний – що автоматично вибирає структуру або параметри системи управління при зміні кутової роботи машини з метою вироблення оптимального режиму.

По роду передавального пристрою:

- 1) Редукторний – ЕД передає обертальний рух передавальному пристрою, що містить редуктор.
- 2) Безредукторний – ЕД передає рух або безпосередньо ВО, або передавальному пристрою, що не містить редуктор.

По рівню автоматизації:

- 1) неавтоматизований – управління здійснюється в ручну (зараз зустрічається дуже рідко);
- 2) автоматизований ЕП, керований автоматичним регулюванням параметрів;
- 3) автоматичний ЕП, в якому управляюча дія виробляється автоматичним пристроєм без участі оператора.

По роду струму:

- 1) ЕП постійного струму;
- 2) ЕП змінного струму.

Вентильним (напівпровідниковим, тиристорним, транзисторним) називається електропривод з відповідним перетворювальним пристроєм. За характером

зміни параметрів розрізняють два види електроприводів: регульовані і нерегульовані.

Основними системами регульованого електропривода є керований перетворювач – двигун (КП – Д), перетворювач частоти – двигун (ПЧ – Д), генератор – двигун (Г – Д), магнітний підсилювач – двигун (МП – Д). Крім перелічених, є також каскадні електроприводи електричні, електромеханічні, напівпровідникові, електромашинні, машинонапівпровідникові.

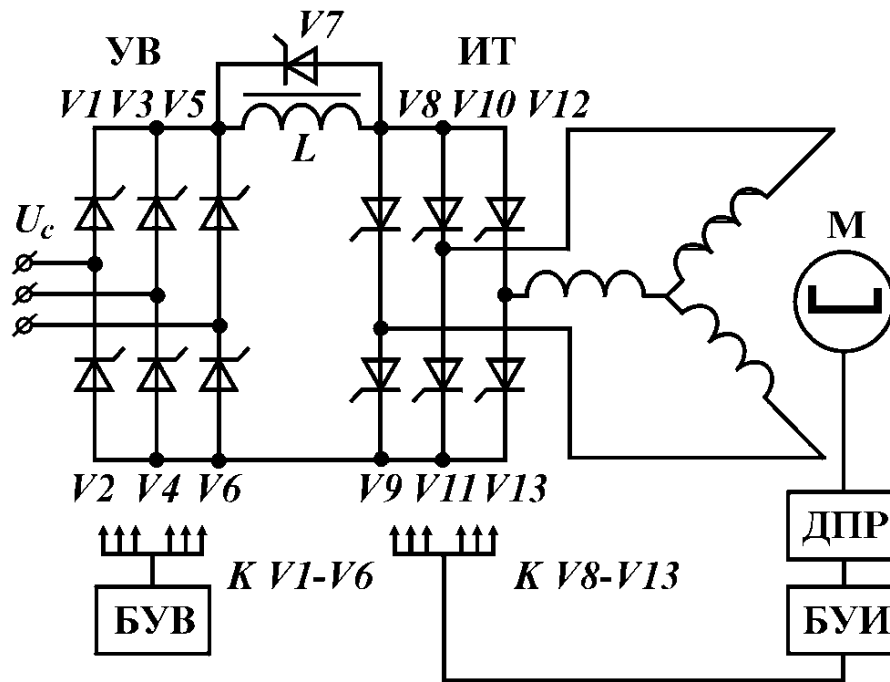


Рис. 1.6. Схема частотно регульованого електроприводу з вентильним двигуном



Лекція № 2

ТЕМА №1: Електропривод, його різновиди та елементи

Механіка електричного приводу

План

1. Приведення моментів і сил опору, інерційних мас і моментів інерції.
2. Моменти опору, їх види.

1. ПРИВЕДЕННЯ МОМЕНТІВ І СИЛ ОПОРУ, ІНЕРЦІЙНИХ МАС І МОМЕНТІВ ІНЕРЦІЇ

Звичайно двигун приводить в дію виробничий механізм через систему передач, окремі елементи якої рухаються з різними швидкостями. Зразкова кінематична схема електроприводу з обертальним рухом виконавчого механізму представлена на рис. 2.1.

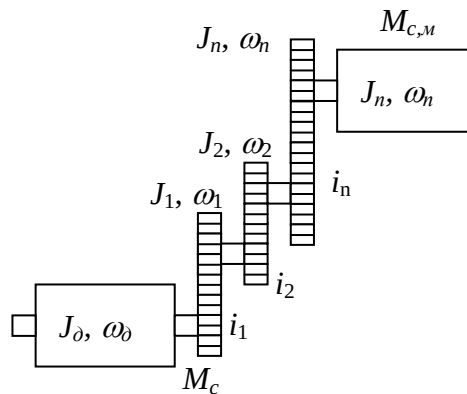


Рисунок 2.1 – Кінематична схема зв'язку двигуна з виконавчим механізмом

Часто в робочих механізмах один з елементів виконує обертальний рух, інші – поступальне, наприклад в таких машинах, як підйомник (рис. 2.2), кран, верстат і т.п. Механічна частина електроприводу може бути складним кінематичним ланцюгом з великим числом елементів, що рухаються. Кожний з елементів реального кінематичного ланцюга володіє пружністю, тобто деформується під навантаженням, а в з'єднаннях елементів є повітряні зазори. Якщо враховувати ці чинники, то розрахункова схема механічної частини приводу буде представлена багатомасовою механічною системою з пружними зв'язками і зазорами, розрахунок динаміки якої складає великі труднощі і можливий тільки за допомо-

гою ЕОМ. Проте основні закономірності рухи таких систем визначаються найбільшimi масами і зазорами і якнайменшими жорсткостями зв'язків системи, що дозволяє звести розрахункову схему механічної частини приводу або до трьохмасової, або до двохмасової механічної системи з еквівалентними пружними зв'язками і з сумарним зазором (або без нього), приведеним до кутової швидкості валу двигуна. Але ці розрахункові схеми не використовуються в тих відповідальних випадках, де нехтування пружністю і зазором приведе до великих помилок розрахунку (точні системи стеження радіотелескопів і металоріжучих верстатів; механізми з гнучкими зв'язками, довгими валами, канатами; різкі зміни стану системи і т. п.). Методика розрахунку електроприводів, механічна частина яких містить пружні зв'язки і зазори, розглянута в [1].

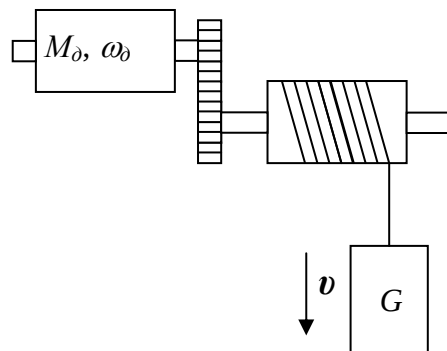


Рисунок 2.2 – Кінематична схема приводу підйомника

В більшості практичних випадків в інженерних розрахунках при рішенні задач, що не вимагають великої точності, і для механічних ланок, що володіють невеликими зазорами і незначною пружністю (великою жорсткістю), можна нехтувати зазорами і пружністю, прийнявши механічні зв'язки абсолютно жорсткими. При цьому допущенні рух одного елемента дає повну інформацію про рух всієї решти елементів, тому рух електроприводу можна розглядати на якому-небудь одному механічному елементі. Звичайно як такий елемент приймають вал двигуна.

2. МОМЕНТИ ОПОРУ, ЇХ ВИДИ

Розрахункову схему механічної частини приводу, отже, можна звести до однієї узагальненої жорсткої механічної ланки, що має еквівалентну масу з моментом інерції J , на яку впливає електромагнітний момент двигуна M і сумарний приведений до валу двигуна момент опору (статичний момент) M_c , що включає всі механічні втрати в системі, у тому числі механічні втрати в двигуні. Момент

опору механізму $M_{с,м}$ (рис. 2.1), що виникає на валу робочої машини, складається з двох складових, відповідних корисній роботі і роботі тертя.

Корисна робота, яка виконується виробничим механізмом, пов'язана з виконанням відповідної технологічної операції. Графік корисної роботи може бути побудований на підставі аналітичних розрахунків або за експериментальними даними. Такий графік, наприклад, для верстата, що працює по циклічному закону, представлений на рис. 2.3. Заштрихована область графіка відповідає корисній роботі; не заштрихована частина графіка відповідає роботі тертя. При здійсненні корисної роботи відбувається деформація матеріалу або змінюється запас потенційної енергії тіл, наприклад в підйомних пристроях. В деяких машинах здійснення корисної роботи пов'язано з незначним перевищенням моменту в порівнянні з моментом тертя (наприклад, друкарська машина, розмельний кульовий млин, кран, що пересувається по горизонтальним направляючим, і т. п.).

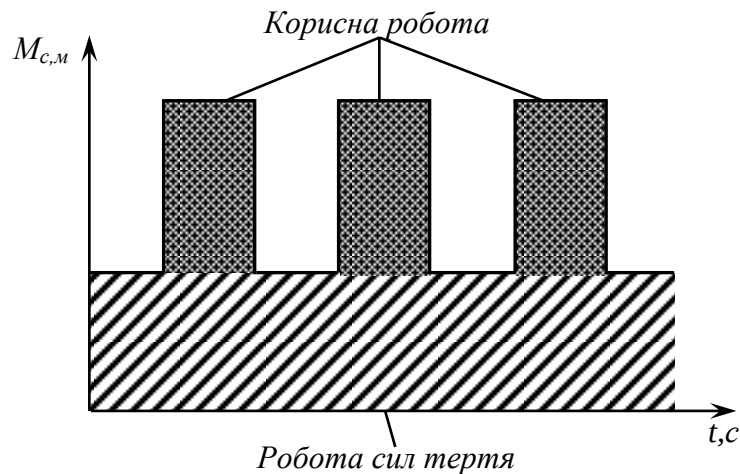


Рисунок 2.3 – Циклічний графік роботи електроприводу виробничого механізму

Робота тертя, яка виконується у виробничому механізмі, враховує звичайно ККД механічних зв'язків приводу. Роботу тертя можна іноді врахувати, користуючись даними, отриманими на підставі досвіду. Наприклад, при підйомі вантажу G_1 на висоту h можна вважати, що сили тертя як би збільшують вагу вантажу на деяке додаткове значення G_0 . Тоді робота підйому, Дж, записується таким чином:

$$A = h(G_1 + G_0). \quad (2.1)$$

В насосах втрати можуть враховуватися деякою фіктивною додатковою висотою подачі h_0 . Момент тертя завжди направлений проти рушійного моменту приводу.

Моменти опору можна розділити на дві категорії, а саме:

- 1) реактивні моменти;
- 2) активні або потенційні моменти.

В першу категорію включаються моменти опору від стиснення, різання, моменти тертя і т. п., перешкоджаючи руху приводу і які змінюють свій знак при зміні напрямку обертання. В другу категорію входять моменти від сили тяжіння, а також від розтягування, стиснення і скручування пружних тіл. Ці моменти можуть бути названі потенційними, оскільки вони пов'язані із зміною потенційної енергії окремих елементів приводу. Потенційні моменти можуть гальмувати рух приводу або, навпаки, сприяти його руху. Слід зазначити, що на відміну від реактивного статичного моменту активний момент зберігає свій знак при зміні напрямку обертання приводу. Наприклад, момент, створюваний вантажем підйомного механізму, зберігає свій знак, як при підйомі його, так і при опусканні. Отже, в даному випадку активний статичний момент при підйомі перешкоджає руху, а при опусканні сприяє йому.

Приведення моментів опору від однієї осі обертання до іншої може бути проведено на підставі енергетичного балансу системи. При цьому втрати потужності в проміжних передачах враховуються введенням в розрахунки відповідного ККД – η_n . Позначимо через ω_∂ кутову швидкість валу двигуна, а ω_m – кутову швидкість валу виробничого механізму. На підставі рівності потужностей отримаємо:

$$M_{c,m} \omega_m \frac{1}{\eta_n} = M_c \omega_\partial, \quad (2.2)$$

звідки

$$M_c = M_{c,m} \frac{\omega_m}{\omega_\partial} \frac{1}{\eta_n} = \frac{M_{c,m}}{i \eta_n}, \quad (2.3)$$

де $M_{c,m}$ – момент опору виробничого механізму, Н·м;

M_c – той же момент опору, приведений до швидкості валу двигуна, Н·м;

$i = \frac{\omega_\partial}{\omega_m}$ – передавальне число.

За наявності декількох передач між двигуном і механізмом (рис. 2.1) з передавальними числами $i_1, i_2 \dots, i_n$ і відповідними ККД $\eta_{n1} \eta_{n2} \dots \eta_{nn}$ момент опору, приведений до швидкості валу двигуна, визначається формулою:

$$M_c = M_{c,m} \frac{1}{i_1 i_2 \dots i_n} \frac{1}{\eta_{n1} \eta_{n2} \dots \eta_{nn}}. \quad (2.4)$$

Приведення сил опору проводиться аналогічно приведенню моментів. Якщо швидкість поступального руху v , м/с, а кутова швидкість валу двигуна ω_∂ , рад/с, тоді:

$$F_{c,m} v \frac{1}{\eta_n} = M_c \omega_\partial, \quad (2.5)$$

де $F_{c,m}$ – сила опору виробничого механізму, Н.

Звідси приведений до швидкості валу двигуна момент опору визначається:

$$M_c = \frac{F_{c,m} v}{\omega_\partial \eta_n}. \quad (2.6)$$

У разі приведення обертального руху до поступального приведенне зусилля визначається:

$$F_{c,m} = \frac{M_c \omega_\partial \eta_n}{v}, \quad (2.7)$$

Приведення моментів інерції до однієї осі обертання засновано на тому, що сумарний запас кінетичної енергії частин приводу, що рухаються, віднесений до однієї осі, залишається незмінним. За наявності обертаються частин, що володіють моментами інерції $J_\partial, J_1, J_2 \dots, J_n$ і кутовими швидкостями $\omega_\partial \omega_1 \omega_2 \dots \omega_n$ (рис. 2.1), можна замінити їх динамічну дію дією одного моменту інерції, приведенного наприклад, до швидкості валу двигуна. У такому разі можна написати:

$$J \frac{\omega_\partial^2}{2} = J_\partial \frac{\omega_\partial^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2}. \quad (2.8)$$

Звідки результуючий або сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна:

$$J = J_{\partial} + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_{\partial}} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_{\partial}} \right)^2 + \dots + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega_{\partial}} \right)^2, \quad (2.9)$$

де J_{∂} – момент інерції ротора двигуна і інших елементів (муфти, шестерні і т. п.), встановлених на валу двигуна. Іноді в каталогах для двигунів указується значення махового моменту GD^2 , Н·м². В цьому випадку моменти інерції ротора двигуна, кг·м², в системі СІ обчислюються по формулі:

$$J_p = \frac{GD^2}{4g}, \quad (2.10)$$

$$GD^2 = J_p \cdot 4g,$$

де D – діаметр інерції, м; G – сила тяжіння (вага), Н. Це співвідношення витікає з формули, що визначає момент інерції тіла масою m , кг:

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}, \quad (2.11)$$

де ρ – радіус інерції, м.

Якщо сила тяжкості виражена в ньютонах, тоді маса тіла визначається:

$$G = mg, \quad (2.12)$$

де $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

Момент інерції суцільного циліндра відносно подовжньої осі обчислюється за формулою:

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (2.13)$$

де R – радіус циліндра, м.

Для полого циліндра:

$$GD^2 = 2\pi m_* l (r_2^4 - r_1^4);$$

$$J = \frac{GD^2}{4g} = \frac{2\pi dm_*}{4g} (r_2^4 - r_1^4) = \frac{\pi dm_*}{2g} (r_2^4 - r_1^4); \quad (2.14)$$

$$m = \frac{\pi dm_* (r_2^2 - r_1^2)}{g}.$$

де m_* – питома вага, кг/м³.

Якщо шестерня обертається навкруги осі, співпадаючої з початком кола, то маховий момент:

$$GD_{u1}^2 = GD_u^2 + 4a^2G, \quad (2.15)$$

де a – радіус кола, м.

Приведення мас, що рухаються поступально, здійснюється також на підставі рівності запасу кінетичної енергії:

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega_d^2}{2}. \quad (2.16)$$

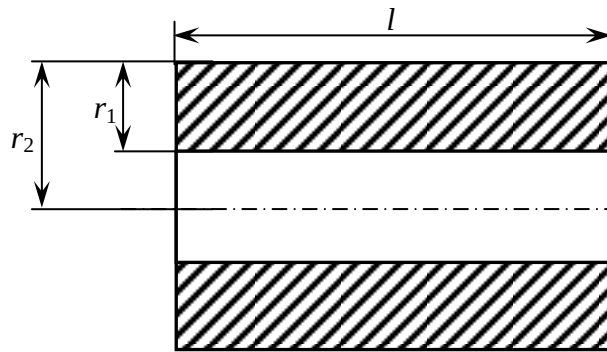


Рисунок. 2.4 – Полий циліндр

Звідси момент інерції, приведений до валу двигуна визначається:

$$J = m \left(\frac{v}{\omega_d} \right)^2. \quad (2.17)$$

Якщо механізм має елементи, що обертаються і поступально рухаються, то сумарний приведений до валу двигуна момент інерції визначається на підставі (2.9) і (2.14)

Якщо ККД не дано:

$$J = J_{\partial} + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2} + m \left(\frac{v}{\omega_{\partial}} \right)^2 \dots; \quad (2.18)$$

При розгоні:

$$J_{раз.} = J_0 + \frac{J_1}{i_1^2 \eta_1} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2 \eta_1 \eta_2} + \dots + \frac{J_n}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2 \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n} + \frac{mv^2}{\omega^2 \eta}; \quad (2.19)$$

При гальмуванні:

$$J_{тор.} = J_0 + \frac{J_1 \eta_1}{i_1^2} + \frac{J_2 \eta_1 \eta_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + \frac{J_n \eta_n}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2} + \frac{mv^2 \eta}{\omega^2}. \quad (2.20)$$

Для приведення моменту інерції до поступального руху потрібно момент інерції замінити приведеною масою, тобто:

$$m = J \left(\frac{\omega_{\partial}}{v} \right)^2. \quad (2.21)$$



Рівняння рівноваги моментів для обертаючого руху (рівняння руху приводу) має наступний вигляд:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (2.22)$$

У разі виконання операції приведення при підйомі вантажу (розрахувати приведений момент навантаження):

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot \rho}{\eta_p \cdot \eta_B}. \quad (2.23)$$

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ № 1

1. Які основні пристрої входять до складу електропривода?
2. Перерахуйте основні види електроприводів.
3. У чому полягають переваги і недоліки основних видів електроприводів?
4. Назвіть основні особливості автоматизованого й автоматичного електроприводів.
5. Перерахуйте основні етапи розвитку електропривода.
6. Які сучасні тенденції в розвитку електропривода є найважливішими?
7. У чому полягають основні завдання теорії електропривода?
8. Які функції виконує електропривод у системах автоматичного керування?
9. Назвіть основні етапи розвитку елементної бази електропривода.
10. Що представляє собою структурна схема ЕП?
11. Що представляє собою кінематична схема ЕП?
12. По яким ознакам проводять класифікацію ЕП?
13. Які моменти опору вам відомі? Поясніть їх фізичну сутність.
14. Поясніть циклічний графік роботи електроприводу виробничого механізму.
15. Що представляє собою момент інерції?
16. Поясніть математичний вираз для знаходження моменту інерції суцільного циліндра.
17. Що представляє собою маховий момент? Поясніть його фізичну сутність та математичний вираз його розрахунку.
18. Що представляє собою вентильний ЕП?

Лекція № 3

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів.
2. Сталі режими. Поняття статичної стійкості електричного приводу.

1. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИРОБНИЧИХ МЕХАНІЗМІВ І ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

При розгляді роботи електродвигуна, що приводить в дію виробничий механізм, необхідно перш за все виявити відповідність механічних характеристик двигуна характеристиці виробничого механізму. Тому для правильного проектування і економічної експлуатації електроприводу необхідно вивчити ці характеристики.

Залежність між приведеними до валу двигуна швидкістю і моментом опору механізму $\omega = f(M_c)$ називають *механічною характеристикою виробничого механізму*. Різні виробничі механізми володіють різними механічними характеристиками. Проте можна отримати деякі узагальнюючі висновки, якщо скористатися наступною емпіричною формулою для механічної характеристики виробничого механізму:

$$M_c = M_0 + (M_{c.ном} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x, \quad (3.1)$$

де M_c – момент опору виробничого механізму при швидкості ω ;

M_0 – момент опору тертя в частинах механізму, що рухаються;

$M_{c.ном}$ – момент опору при номінальній швидкості $\omega_{ном}$;

x – показник ступеня, що характеризує зміну моменту опору при зміні швидкості.

Приведена формула дозволяє класифікувати механічні характеристики виробничих механізмів орієнтовно на наступні основні категорії:

1. Не залежна від швидкості механічна характеристика (пряма 1 на рис. 3.1).

При цьому $x = 0$ і момент опору M_c не залежить від швидкості. Такою характеристикою володіють, наприклад, підйомні крани, лебідки, механізми подач металоріжучих верстатів, поршневі насоси при незмінній висоті подачі, конвеєри з постійною масою матеріалу, що пересувається. Сюди ж можуть бути віднесені з відомим наближенням всі механізми, у яких основним моментом опору є момент

тертя, оскільки звичайно в межах робочих швидкостей момент тертя змінюється мало.

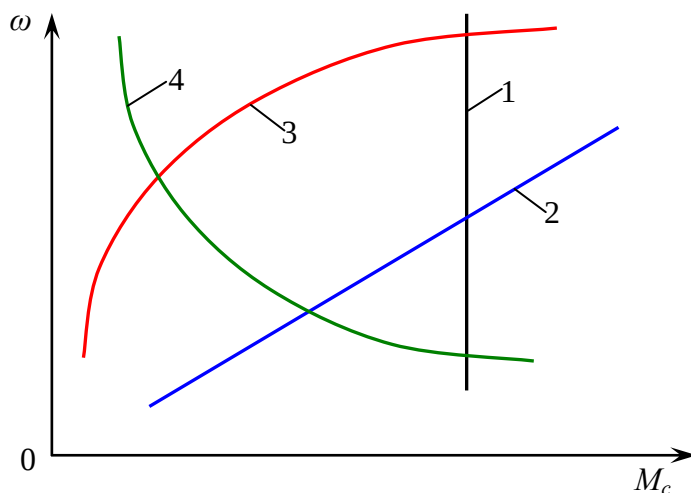


Рисунок 3.1– Механічні характеристики виробничих механізмів

2. Лінійно-зростаюча механічна характеристика (пряма 2 на рис. 3.1).

В цьому випадку $x = 1$ і момент опору лінійно залежить від швидкості ω , збільшуючись з її зростанням (для спрощення прийняте $M_0 = 0$). Такою характеристикою буде володіти, наприклад, привод генератора постійного струму з незалежним збудженням, якщо останній працюватиме на постійний зовнішній резистор.

3. Нелінійно-зростаюча (параболічна) механічна характеристика (крива 3 на рис. 3.1). Цій характеристиці відповідає $x = 2$; момент опору M_c тут залежить від квадрата швидкості. Механізми, що володіють такою характеристикою, називають іноді механізмами з моментом вентилятора, оскільки у вентиляторів момент опору залежить від квадрата швидкості. До механізмів, що володіють параболічною механічною характеристикою, відносяться також відцентрові насоси, гребні гвинти і т.п.

4. Нелінійно-спадаюча механічна характеристика (крива 4 на рис. 3.1). При цьому $x = -1$ і момент опору M_c змінюється обернено пропорційно до швидкості, а потужність, споживана механізмом, залишається постійною. Такою характеристикою володіють, наприклад, деякі токарні, розточувальні, фрезерні і інші металорізучі верстати, моталки в металургійній промисловості і т.п. Ці характеристики не вичерпують всіх практично можливих випадків, але дають уявлення про характеристики деяких типових виробничих механізмів.

Механічною характеристикою електродвигуна називається залежність його кутової швидкості від обертаючого моменту, тобто $\omega = f(M)$. Майже всі електродвигуни володіють тією властивістю, що швидкість їх є убываючою функцією моменту двигуна. Це відноситься майже до всіх звичайних електродвигунів, вживаних в промисловості, тобто до двигунів постійного струму незалежного, послідовного і змішаного збудження, а також до асинхронних безколекторних і колекторних двигунів змінного струму. Проте ступінь зміни швидкості із зміною моменту у різних двигунів різний і характеризується так званою *жорсткістю* їх механічних характеристик.

Жорсткість механічної характеристики (β) електроприводу – це відношення різниці електромагнітних моментів, що розвиваються пристроєм з електродвигуном, до відповідної різниці кутових швидкостей електроприводу, тобто:

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (3.2)$$

Звичайно на робочих ділянках механічні характеристики двигунів мають негативну жорсткість $\beta < 0$. Лінійні механічні характеристики володіють постійною жорсткістю. У разі нелінійних характеристик їх жорсткість не постійна і визначається в кожній крапці як похідна моменту по кутовій швидкості:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}. \quad (3.3)$$

Поняття жорсткості може бути застосовано і до механічних характеристик виробничих механізмів. Ці характеристики можна оцінювати жорсткістю:

$$\beta_c = \frac{dM_c}{d\omega}. \quad (3.4)$$

Механічні характеристики електродвигунів можна розділити на чотири основні категорії:

1. *Абсолютно жорстка механічна характеристика* ($\beta = \infty$) – це характеристика, при якій швидкість із зміною моменту залишається незмінною. Такою характеристикою володіють синхронні двигуни (пряма 1 на рис. 3.2).
2. *Жорстка механічна характеристика* – це характеристика, при якій швидкість із зміною моменту хоча і зменшується, але в малому ступені. Жорсткою механічною характеристикою володіють двигуни постійного струму неза-

лежного збудження, а також асинхронні двигуни в межах робочої частини механічної характеристики (крива 2 на рис. 3.2). Для асинхронного двигуна жорсткість в різних точках механічної характеристики різна (рис. 3.3). Між максимальними (критичними) значеннями моментів в руховому $M_{кр.д}$ і генераторному $M_{кр.г}$ режимах характеристика асинхронного двигуна має порівняно велику жорсткість.

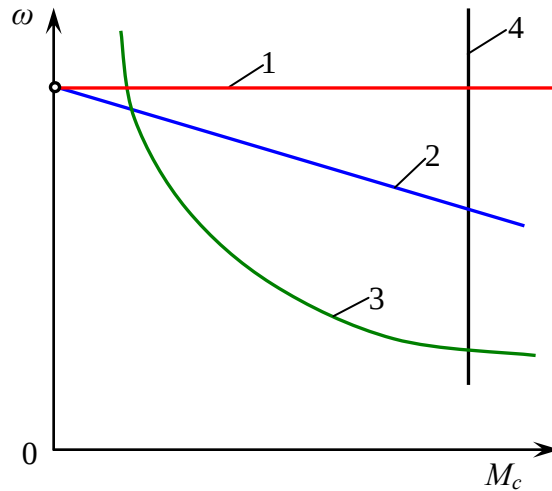


Рисунок 3.2 – Механічні характеристики електродвигунів

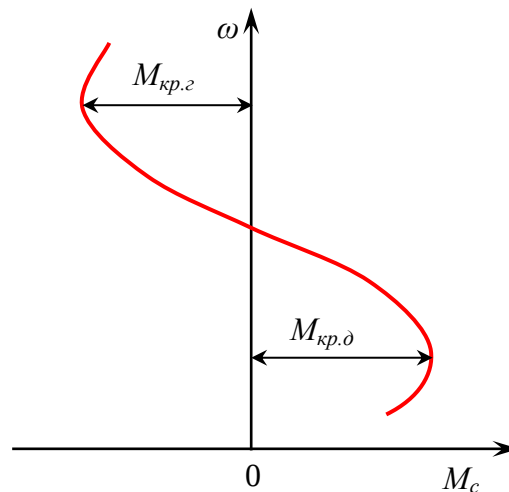


Рисунок 3.3 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

3. *М'яка механічна характеристика* – це характеристика, при якій із зміною моменту швидкість значно змінюється. Такою характеристикою володіють двигуни постійного струму послідовного збудження, особливо в зоні малих моментів (крива 3 на рис. 3.2). Для цих двигунів жорсткість не залишається постій-

ною для всіх точок характеристик. Двигуни постійного струму змішаного збудження можуть бути віднесені до другої або третьої групи залежно від значення жорсткості механічної характеристики.

4. *Абсолютно м'яка механічна характеристика* ($P = 0$) – це характеристика, при якій момент двигуна із зміною кутової швидкості залишається незмінним. Такою характеристикою володіють, наприклад, двигуни постійного струму незалежного збудження при живленні їх від джерела струму або при роботі в замкнених системах електроприводу в режимі стабілізації струму якоря (пряма 4 на рис. 3.2).

2. СТАЛІ РЕЖИМИ. ПОНЯТТЯ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ

Роботі електричного двигуна і виробничого механізму в сталому режимі відповідає рівновага моменту опору механізму і обертаючого моменту двигуна при певній швидкості, тобто $M = M_c$.

Зміна моменту опору на валу двигуна призводить до того, що швидкість двигуна і момент, який він розвиває, можуть автоматично змінюватися і привід продовжуватиме стійко працювати при іншій швидкості з новим значенням моменту. Для відновлення рівноваги між моментом опору і моментом двигуна, що змінився, у всіх неелектричних двигунах потрібна участь спеціальних регуляторів, які впливають на джерело енергії, збільшуючи або відповідно зменшуючи подачу води, палива або пари. В електричних двигунах роль автоматичного регулятора може виконувати ЕРС двигуна. Ця особливість електродвигунів автоматично підтримувати рівновагу системи при моменті опору, що змінюється, є вельми цінною властивістю, оскільки у багатьох випадках момент може змінюватися в тому або іншому ступені.

Висловлене ілюструється рис. 3.3, де приведена механічна характеристика двигуна постійного струму незалежного збудження і дві характеристики 1 і 2 виробничого механізму, наприклад конвеєра, що приводиться в рух цим двигуном.

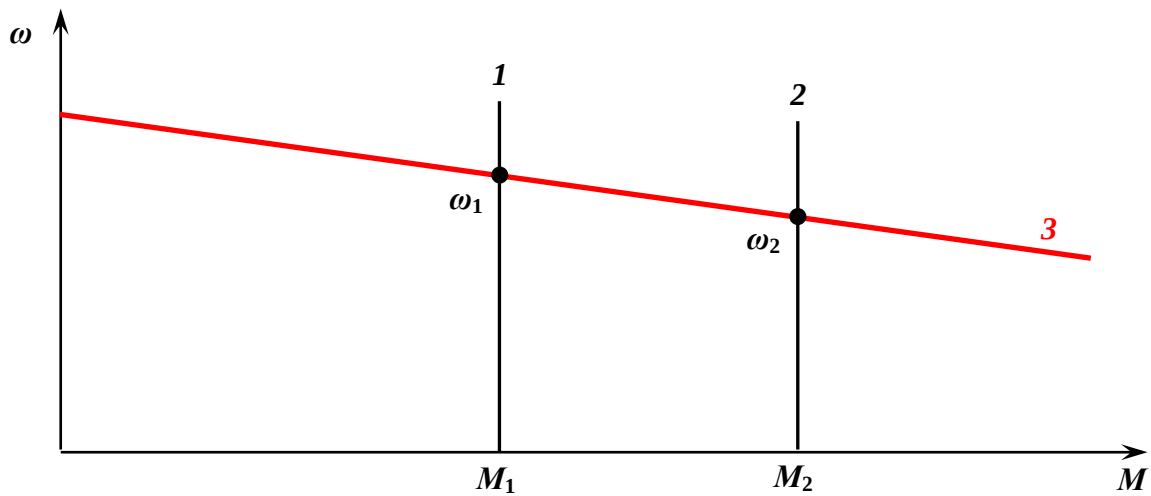


Рисунок 3.3 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження і приводного їм механізму

Характеристика 1 відповідає моменту опору M_1 при холостому ході конвеєра. Характеристика 2 виходить при великому моменті опору M_2 після того, як на конвеєр деталі, які він транспортує. Спочатку при холостому ході конвеєра $M=M_1$ двигун працює з швидкістю ω_1 . Із збільшенням навантаження двигун гальмується, швидкість його знижується, завдяки чому зменшується ЕРС. При зменшенні ЕРС зростають струм в якірному ланцюзі двигуна і момент, що розвивається двигуном. Зростання моменту двигуна продовжується до тих пір, поки не наступить рівновага моментів $M = M_2$ (крапка ω_2). Ця нова крапка також є загальною для механічної характеристики конвеєра (2) і механічної характеристики електродвигуна (3). Розглянуті умови роботи електроприводу в сталому режимі характеризують статичну стійкість приводу, коли зміна в часі швидкості і моменту відбувається відносно поволі на відміну від динамічної стійкості, що має місце при перехідних режимах.

Під *статичною стійкістю* розуміється такий стан сталого режиму роботи приводу, коли при випадковому відхиленні швидкості від сталого значення привід повернеться в точку сталого режиму.

Механічні характеристики виробничого механізму для зручності зображаються в першому квадранті, хоча момент опору має негативний знак. При нестійкому русі будь-яке, навіть найменше, відхилення швидкості від сталого значення приводить до зміни стану приводу – він не повертається в точку сталого режиму.

Привід статично стійкий, якщо в точці сталого режиму виконується умова:

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} < 0, \quad (3.5)$$

або

$$\beta - \beta_3 < 0. \quad (3.6)$$

Умова (3.5) означає, що привід статично стійкий, якщо при позитивному прирості кутової швидкості у момент двигуна виявиться менше статичного моменту (моменту опору) і привід внаслідок цього загальмується до колишнього значення швидкості. При негативному прирості кутової швидкості момент двигуна виявиться більше моменту опору і привід внаслідок цього розженеться до колишнього значення швидкості при постійному моменті навантаження (пряма 1 на рис. 3.3)

Статична стійкість визначатиметься тільки жорсткістю механічної характеристики двигуна, оскільки $\frac{dM_c}{d\omega} = 0$. Якщо вона негативна, то робота в сталому режимі стійка $\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} = \frac{dM}{d\omega} < 0$, як це мало місце в розглянутому випадку (рис. 3.3).

При роботі того ж двигуна на механізм з характеристикою (рис. 3.4) вентилятора легко довести, що у всіх крапках робота буде стійкою.

На рисунок 3.4 приведені механічна характеристика вентилятора 1, механічна характеристика двигуна 2, що приводить вентилятор, і сумісна механічна характеристика агрегату вентилятора 3.

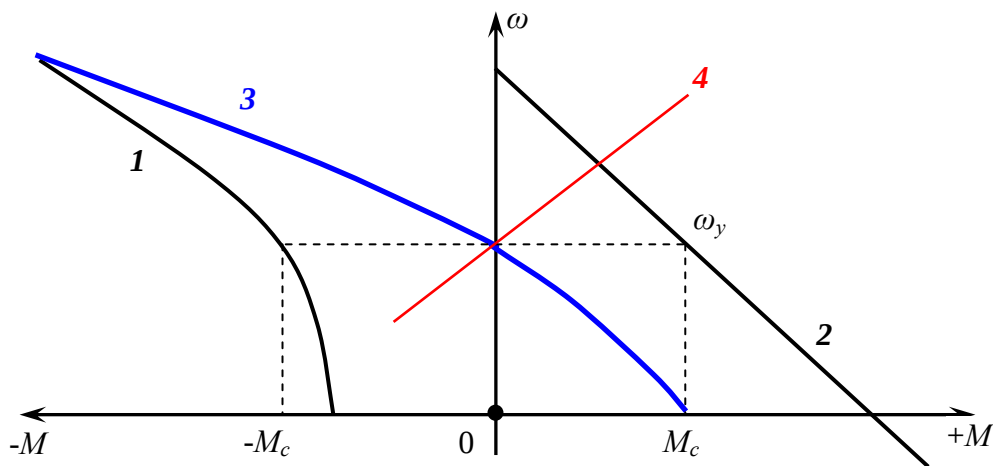


Рисунок. 3.4 – Сумісна механічна характеристика вентиляторного агрегату

При сталій швидкості агрегату ω_{cm} двигун розвиває момент $M=M_c$; в цьому випадку момент сумісної механічної характеристики агрегату буде рівний нулю. Робота електроприводу при швидкості ω_{cm} стійка, оскільки із збільшенням швидкості приріст моменту виявляється негативним, а при зменшенні швидкості – позитивним. Крива 3 на рис. 3.4 є прикладом сумісної характеристики, при якій агрегат працюватиме стійко. Якби сумісна характеристика агрегату мала вигляд 4, то робота була б нестійкою.

Розглянуті умови роботи ЕП в сталому режимі характеризують статистичну стійкість приводу, коли зміна в часі швидкості і моменту відбувається відносно поволі у відмінності від динамічної стійкості, що має місце при перехідних режимах.

Звичайно при проектуванні електроприводу механічна характеристика виробничого механізму є вже заданою. Тому для отримання стійкої роботи в сталому режимі для певних швидкостей і моментів опору виробничих механізмів необхідно підбирати механічну характеристику електродвигуна відповідної форми. Цього може бути досягнуто підбором електродвигуна відповідного типу і зміною електричних параметрів його ланцюгів. Іноді для отримання необхідних механічних характеристик доводиться застосовувати спеціальні схеми включення електричних машин і апаратів.

Лекція № 4

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження
2. Вплив опору якірного кола на швидкість двигуна електропривода

1. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Звичайна схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження представлена на рис. 4.1. Якір двигуна M і його обмотка збудження OZ одержують живлення від різних, незалежних один від одного джерел (перетворювачів) напруги U і U_z , що дозволяє окремо регулювати напругу на якорі двигуна і на обмотці збудження і виконувати їх на різну номінальну напругу. Лише за наявності мережі постійного струму або при нерегульованому перетворювачі в якірному ланцюзі обмотка збудження харчується від того ж джерела напруги, що і якір двигуна. Але і в цьому випадку струм збудження I_z не залежить від струму I якоря двигуна.

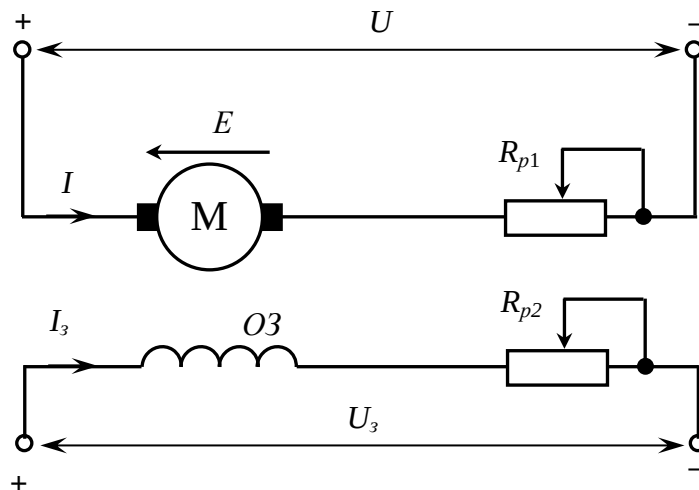


Рисунок 4.1– Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження

Напрями струму I і ЕРС обертання двигуна E , показані на рис. 4.1, відповідають режиму роботи двигуна, коли електрична енергія споживається двигуном з мережі (від джерела напруги) перетворюється в механічну енергію, поту-

жність якої рівна $P = M\omega$. Залежність же між M і ω двигуна визначається його механічною характеристикою.

Аналітичний вираз механічної характеристики двигуна може бути отриманий з рівняння рівноваги напруг, складеної для якірного кола схеми (рис. 4.1). При сталому режимі роботи двигуна прикладена напруга U , врівноважується падінням напруги в якірному колі IR і наведеної в якорі ЕРС обертання E , тобто:

$$U = IR + E, \quad (4.1)$$

де I – струм в якірному колі двигуна, А;

R – сумарний опір якірного кола, Ом, який включає зовнішній опір резистора R_p і внутрішній опір якоря двигуна $R_{\text{я}}$ (за наявності додаткових полюсів враховується і їх опір);

$$E = k\Phi\omega, \quad (4.2)$$

де k – коефіцієнт, залежний від конструктивних даних двигуна, $k = pN / 2\pi a$ (p – число пар полюсів двигуна; N – число активних провідників обмотки якоря; a – число пар паралельних гілок обмотки якоря);

Φ і ω – відповідно магнітний потік, Вб, і кутова швидкість двигуна, рад/с.

Якщо в (4.1) підставимо значення E з (4.2), то отримаємо рівняння для швидкості двигуна:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}. \quad (4.3)$$

Рівняння (4.3) є залежністю швидкості двигуна від струму якоря. Таку залежність $\omega = f(I)$ називають *електромеханічною характеристикою двигуна*. Для отримання рівняння механічної характеристики необхідно знайти залежність швидкості від моменту двигуна. Це легко зробити, якщо врахувати, що момент, Н·м, що розвивається двигуном, пов'язаний із струмом якоря і магнітним потоком простою залежністю. Приведеним рівнянням визначається електромагнітний момент двигуна. Момент на валу двигуна буде менше електромагнітного моменту на значення, відповідне втратам в сталі і механічним втратам. Проте для практичних розрахунків можна користуватися рівняннями механічних характеристик, де приводиться електромагнітний момент), а саме:

$$M = k\Phi I. \quad (4.4)$$

Підставивши в (4.3) значення струму I , знайдене з (4.4) отримаємо вираз для механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{k^2\Phi^2}, \quad (4.5)$$

або

$$\omega = \frac{U}{c} - M \frac{R}{c^2}, \quad (4.6)$$

де

$$c = k\Phi. \quad (4.7)$$

Коефіцієнт c приймається постійним, не залежним від навантаження, якщо у двигуна з незалежним збудженням є компенсаційна обмотка. Він може вважатися незмінним, якщо для звичайних двигунів нехтувати реакцією якоря.

Механічна характеристика двигуна при незмінних параметрах U , Φ і R представляється прямою лінією. Нижче показано, що, змінюючи той або інший параметр механічної характеристики, можна при певному моменті опору на валу двигуна одержувати різні швидкості двигуна, тобто регулювати швидкість електроприводу.

2. ВПЛИВ ОПОРУ ЯКІРНОГО КОЛА НА ШВИДКІСТЬ ДВИГУНА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Тут же розглянемо вплив лише одного параметра, а саме опору якірного кола, оскільки це необхідне для з'ясування основних визначень, пов'язаних з поняттям про механічну характеристику для різних режимів роботи двигуна.

На рис. 4.2 представлені механічні характеристики двигуна незалежного збудження для різних опорів якірного кола. Як видно з (4.5), при $M = 0$ всі характеристики проходять через одну крапку, що лежить на осі ординат. Кутова швидкість в цій крапці має цілком певне значення, не залежне від опору якірного кола. Ця швидкість носить назву *швидкості ідеального холостого ходу* ω_0 і визначається виразом:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}. \quad (4.8)$$

При швидкості ідеального холостого ходу, коли струм в якірному колі рівний нулю, ЕРС якоря, направлена назустріч прикладеній напрузі, рівна йому по абсолютному значенню. Якщо двигун до прикладення навантаження працював з кутовою швидкістю ω_0 , то при появі на його валу моменту опору кутова швидкість знижуватиметься. Следством цього буде зменшення ЕРС обертання E згідно (4.2) і збільшення струму якоря у відповідності з (4.1) і моменту двигуна по (4.4).

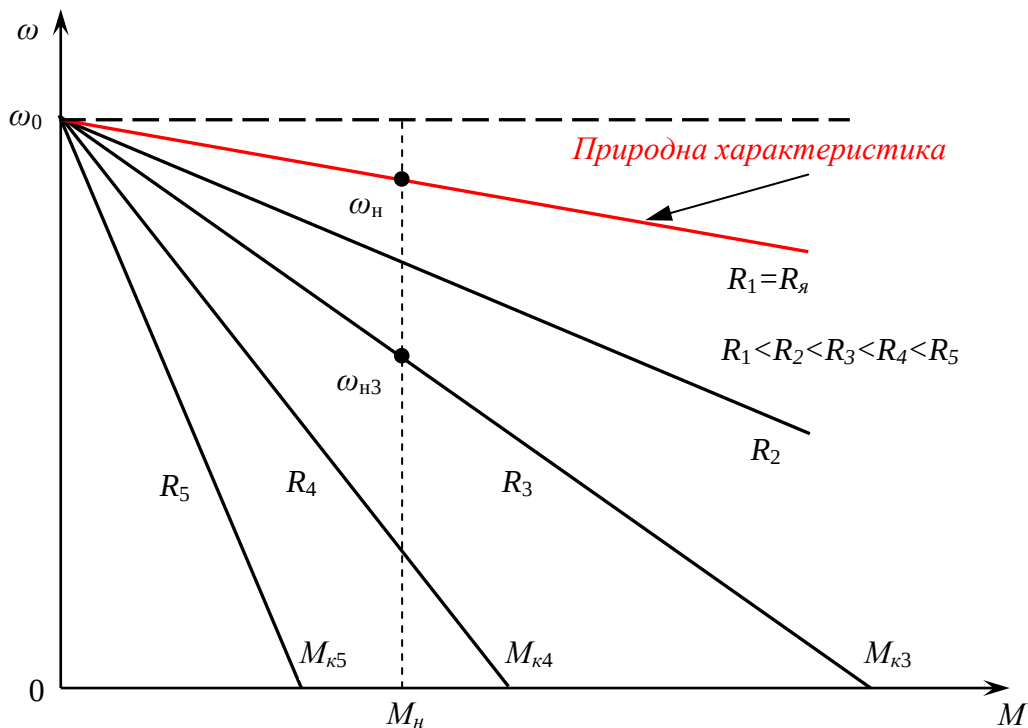


Рисунок 4.2 – Природна характеристика і сімейство реостатних механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження

Кутова швидкість знижуватиметься до тих пір, поки момент двигуна не порівняється з моментом опору. Різниця значень сталих швидкостей електроприводу до і після прикладення заданого статичного навантаження називається *статичним падінням (перепадом) швидкості електроприводу*. Другий член (4.6) характеризує собою статичне падіння кутової швидкості (перепад) щодо кутової швидкості ідеального холостого ходу:

$$\Delta\omega = M \frac{R}{k^2 \Phi^2}. \quad (4.9)$$

Таким чином, рівняння для швидкості двигуна може бути записано так:

$$\omega = \omega_0 - \Delta \omega. \quad (4.10)$$

Верхня характеристика з сімейства, приведеного на рис. 4.2, носить назву природної. *Природною характеристикою* називається така характеристика двигуна, яка виходить за відсутності зовнішніх резисторів в якірному колі і номінальних значеннях напруги і магнітного потоку двигуна. Жорсткість природної характеристики залежить від внутрішнього опору якірного кола двигуна $R_{\text{я}}$. Внутрішній опір якірного кола включає власний опір якірної обмотки, опір обмотки додаткових полюсів, компенсаційної обмотки і щіток. Відповідно перепад швидкості для природної характеристики:

$$\Delta \omega = M \frac{R_{\text{я}}}{k^2 \Phi^2}. \quad (4.11)$$

По (4.9) визначається статичне падіння швидкості для будь-якої з характеристик двигуна незалежного збудження, представлених на рис. 4.2. Наприклад, при додатково включеному реостаті, що має опір R_p , статичне падіння швидкості визначиться із співвідношення:

$$\Delta \omega = M \frac{R_{\text{я}} + R_p}{k^2 \Phi^2}. \quad (4.12)$$

Розділивши (4.10) на ω_0 , отримаємо статичне падіння швидкості у відносних одиницях:

$$\Delta \omega_* = \Delta \omega / \omega_0 = (\omega_0 - \omega) / \omega_0. \quad (4.13)$$

Статичне падіння швидкості у відносних одиницях $\Delta \omega_*$ аналогічно ковзанню асинхронного двигуна, хоча ковзання для двигунів постійного струму не має того фізичного сенсу, як у асинхронних двигунів.

Якщо в якірне коло двигуна включений додатковий резистор (реостат), то механічні характеристики, одержувані при цьому, називаються *штучними або реостатними*. Ці характеристики перетинаються все в одній крапці ω_0 . Реостатні характеристики так само лінійні, як і природна характеристика, але мають

значно більший нахил до осі моментів, тобто Володіють меншою жорсткістю. Чим більше введене в коло якоря опір резистора, тим крутіше йде характеристика, тим менше її жорсткість.

Лекція № 5

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Побудова механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження.
2. Побудова механічної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях.

1. ПОБУДОВА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Для побудови механічної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження, природної або реостатної, достатньо знати лише дві її крапки, оскільки всі механічні характеристики теоретично є прямими лініями (рис. 4.2). Ці дві крапки для кожної характеристики можуть бути будь-які, проте побудову природної механічної характеристики зручно проводити по крапках, одна з яких відповідає номінальному електромагнітному моменту двигуна і номінальній швидкості ($M = M_{ном}$ і $\omega = \omega_{ном}$), а інша – швидкості ідеального холостого ходу ($M = 0$ і $\omega = \omega_0$). Номінальна швидкість двигуна визначається за паспортними даними. Номінальний електромагнітний момент обчислюється по формулі:

$$M_{ном} = cI_{ном}. \quad (5.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу для природної характеристики може бути отриманий з $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$, якщо чисельник і знаменник її помножити на $\omega_{ном}$ і врахувати, що

$$E_{ном} = k\Phi\omega_{ном} = U_{ном} - I_{ном}R_{я}, \quad (5.2)$$

тоді

$$\omega_0 = \frac{U}{U - I_{ном}R_{я}} \cdot \omega_{ном}. \quad (5.3)$$

Оскільки в каталогах внутрішній опір якоря $R_{\text{я}}$ звичайно не указується, то його орієнтовно визначають, приймаючи, що половина всіх втрат в двигуні при номінальному навантаженні пов'язана з втратами в міді якоря.

Тому

$$I_{\text{ном}}^2 R_{\text{я}} \approx 0,5(1 - \eta_{\text{ном}}) I_{\text{ном}} U.$$

Звідси

$$R_{\text{я}} \approx 0,5(1 - \eta_{\text{ном}}) \frac{U}{I_{\text{ном}}}. \quad (5.4)$$

Користуючись природною механічною характеристикою, легко побудувати і реостатну характеристику при будь-якому опорі реостата R_p . Вона також будується по двом крапкам: кутової швидкості ідеального холостого ходу $\omega = \omega_0$ (при $M = 0$) і кутової швидкості, відповідної номінальному моменту при заданому опорі резистора R_p , тобто $\omega = \omega_{\text{ном}, p}$ (при $M = M_{\text{ном}}$). Кутова швидкість $\omega_{\text{ном}, p}$ визначається по формулі:

$$\omega_{\text{ном}, p} = \omega_0 \left[1 - \frac{I_{\text{ном}} (R_{\text{я}} + R_p)}{U} \right]. \quad (5.5)$$

Механічна характеристика може бути побудований також по точці ідеального холостого ходу і крапці, відповідній режиму короткого замикання (*режимом короткого замикання двигуна називається такий режим його роботи, при якому кутова швидкість двигуна, підключеного до джерела напруги, рівна нулю*) де $M = M_{\text{кз}}$, а швидкість $\omega = 0$. Кутову швидкість ω_0 визначаємо по (5.3), а момент $M_{\text{кз}}$, нехтуючи реакцією якоря, – по формулі:

$$M_{\text{кз}} = M_{\text{ном}} \frac{I_{\text{кз}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (5.6)$$

де $I_{\text{кз}} = U/R$ – струм короткого замикання.

Опір якірного кола $R = R_{\text{я}} + R_p$ може бути різним залежно від опору зовнішнього резистора. Відповідно до цього будуть різними для різних реостатних характеристик і струми короткого замикання $I_{\text{кз}}$ і моменти короткого замикання $M_{\text{кз}}$.

Для природної механічної характеристики значення моменту короткого замикання $M_{кз}$ є найбільшим, оскільки при цьому струм короткого замикання обмежується лише внутрішнім опором обмоток якоря двигуна. З урахуванням сказаного рівняння механічної характеристики представляється в наступному вигляді:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{M}{M_{кз}} \right). \quad (5.7)$$

Згідно (5.7) при $M = 0$ швидкість $\omega = \omega_0$. Якщо в (5.7) представити $M = M_{кз}$, то швидкість $\omega = 0$. Це будуть (при різних реостатних характеристиках) крапки, що лежать на осі абсцис (рис. 4.2) і визначувані опорами, що обмежують струм і момент короткого замикання. Так, якщо у декількох двигунів механічні характеристики володіють однаковою жорсткістю, то вказані характеристики, виражені у відносних одиницях, будуть для всіх цих двигунів представлені однією і тією ж прямою.

2. ПОБУДОВА МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ У ВІДНОСНИХ ОДИНИЦЯХ

Рівняння характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях легко може бути отримано з $\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}$, якщо виразити його таким чином:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{IR}{U} \right). \quad (5.8)$$

Розділивши потім ліву і праву частини на ω_0 , отримаємо:

$$\omega_* = 1 - \frac{IR}{U}, \quad (5.9)$$

після перетворень

$$\omega_* = 1 - I_* R_*, \quad (5.10)$$

або відповідно (при $\Phi = \Phi_{ном} = const$)

$$\omega_* = 1 - M_* R_*, \quad (5.11)$$

де $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_0}$; $I_* = \frac{I}{I_{ном}}$; $M_* = \frac{M}{M_{ном}}$ – відповідно кутова швидкість, струм і момент двигуна у відносних одиницях;

$$R_* = \frac{R}{R_{ном}} \text{ – опір у відносних одиницях;}$$

$$R_{ном} = \frac{U}{I_{ном}} \text{ – номінальний опір двигуна.}$$

Номінальним опором двигуна постійного струму називається такий опір, який при нерухомому якорі і номінальній напрузі обмежує струм в якорі до номінального значення.

В (5.10) і (5.11) другий член правої частини є перепадом (статичне падіння) кутової швидкості, вираженим у відносних одиницях і рівний:

$$\Delta\omega_* = I_* R_* = M_* R_*. \quad (5.12)$$

Остання рівність дозволяє за відомих умов значно спростити розрахунок механічних характеристик. Дійсно, якщо розглядати точки механічних характеристик, що відповідають номінальному моменту, то для них $I_* = 1$ і $M_* = 1$ і, отже, рівність (5.12) приймає вигляд:

$$\Delta\omega_* = R_*. \quad (5.13)$$

Це означає, що при номінальному моменті відносний перепад кутової швидкості двигуна чисельно рівний відносному опору якорного кола двигуна.

Проведемо тепер як приклад побудову механічних характеристик двигуна незалежного збудження, схема включення якої представлена на рис. 5.1. Процес пуску двигуна полягає в тому, що спочатку замикається вимикач K , потім через деякі проміжки часу у міру збільшення кутової швидкості замикаються послідовно вимикачі K_1 , K_2 і K_3 . Коли ж всі контакти замкнуться і пусковий резистор

виявиться повністю зашунтованим, двигун почне працювати з певною кутовою швидкістю на природній механічній характеристиці.

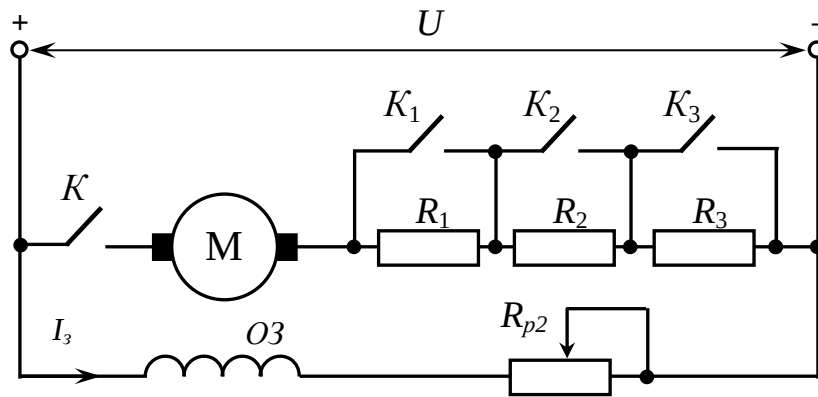


Рисунок 5.1 – Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження при пуску

Природна характеристика у відносних одиницях легко може бути побудована, якщо прийняти згідно (5.10) і (5.11):

$$\omega_* = \omega_{0*} = 1 \text{ і } \Delta\omega_* = R_* \text{ при } M_* = 1.$$

Координати однієї точки характеристики:

$$\omega_* = 1, M_* = 0;$$

інший

$$\omega_{ном*} = 1 - \Delta\omega_{ном*}, M_* = 1.$$

Проведена через ці дві крапки пряма і буде природною механічною характеристикою. Вказана побудова проведена на рис. 5.2. Там же дана побудова реостатних характеристик і графічне визначення опорів.

Побудова реостатних характеристик і розрахунок опорів резисторів мають значення при проектуванні схем автоматизованого пуску двигуна. Для побудови реостатних характеристик прийнято, що момент і струм двигуна при пуску змінюються в межах від M_{1*} до M_{2*} і від I_{1*} до I_{2*} . Значення M_{1*} (I_{1*}) при номінальному потоці двигуна звичайно приймається за умов комутації рівним 2 – 2,5. Що стосується значення M_{2*} (I_{2*}), то його потрібно прийняти принаймні на 10 – 20 % більше моменту опору механізму.

Відповідно до характеристики 1 – 2 двигун збільшує кутову швидкість до значення, визначеного положенням крапкою 2, потім повинна бути зашунтована перший ступінь резистора (замикається вимикач K_1 схеми на рис. 5.2.). Кутова швидкість двигуна через інерційність електроприводу не може змінитися відразу, а момент, якщо нехтувати індуктивністю якоря, зростає миттєво до значення

M_{1*} , тому перехід на нову характеристику здійснюється по лінії 2 – 3, паралельної осі абсцис.

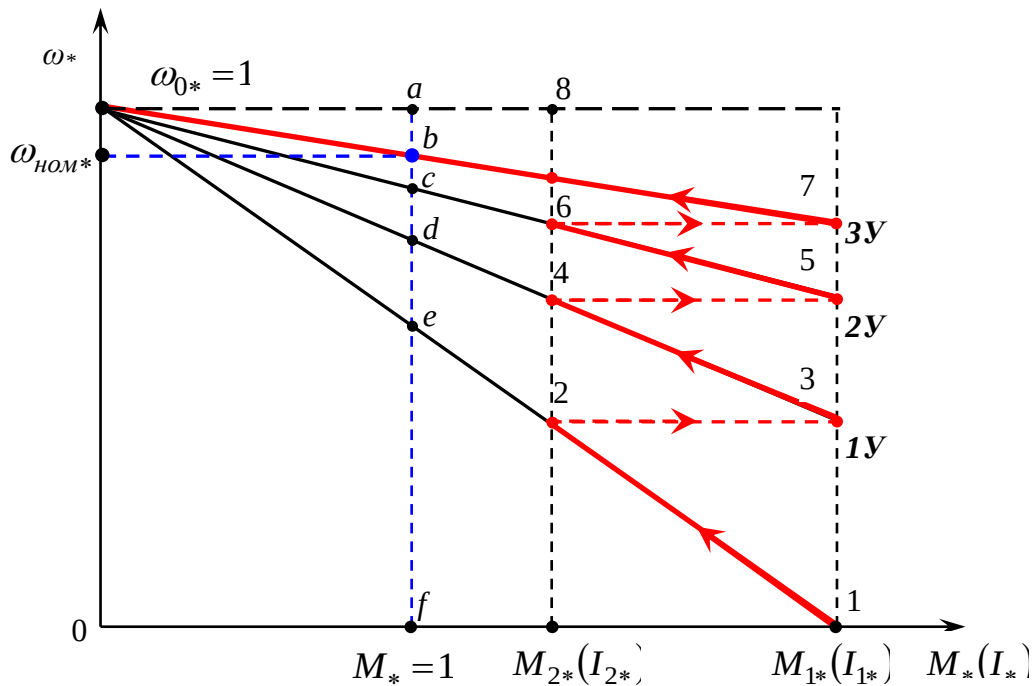


Рисунок 5.2 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях

Далі двигун збільшуватиме кутову швидкість відповідно прямій 3 – 4 до точки 4, і коли замкнеться вимикач K_2 , відбудеться перехід на наступну характеристику. Після замикання вимикача K_3 настає перехід на природну характеристику (6 – 7). Якщо при пуску навантаження на валу двигуна відповідає номінальному моменту, то двигун після закінчення пуску працює на природній характеристиці з швидкістю, відповідною $\omega_{ном*}$.

Згідно (5.13) вертикальні відрізки на лінії, проведеній через точку $M_* = 1$, відповідають окремим ступеням опору якорного кола у відносних одиницях (рис. 5.2). Ордината af у відносних одиницях рівна номінальному опору, тобто $R_{ном*} = 1$. Ординати ae , ad , ac , ab рівні відповідно відносним опорам окремих ступенів якорного кола двигуна. Якщо з вказаних відносних величин відняти відносний внутрішній опір двигуна, відзначений відрізком ab , то вийдуть відносні опори окремих ступенів реостата (відповідні ординатам be , bd і bc). Окремі секції реостата R_1 , R_2 і R_3 (рис. 5.1) мають відносні опори R_{1*} , R_{2*} і R_{3*} , відповідні відрізкам de , cd і bc (рис. 5.2).

Для переходу від опорів, виражених у відносних одиницях, до значень опорів в Омах, проводиться відповідний перерахунок по виразу:

$$R = R_* \cdot R_{ном}. \quad (5.14)$$

Лекція № 6

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження в гальмівних режимах.
2. Гальмування з віддачею енергії в мережу.
3. Динамічне гальмування.
4. Гальмування протиповмикуванням.

1. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ В ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ

Вже розглянута робота двигуна незалежного збудження в режимі двигуна, чому відповідали механічні характеристики, представлені на рис. 5.1 (Лекція № 5) і розташовані в першому квадранті координатних осей. Проте цим не вичерпуються можливі режими роботи електродвигуна і його механічні характеристики.

Вельми часто в сучасних електроприводах необхідно швидко і точно зупинити механізм або змінити напрям його руху. Швидкість і точність, з якою будуть виконані ці операції, у багатьох випадках визначають продуктивність механізму, а іноді і якість продукту, що виробляється.

Під час гальмування або зміни напрям руху (реверсу) електродвигун працює в гальмівному режимі на одній з механічних характеристик відповідних здійснюваному способу гальмування. Графічне зображення механічних характеристик двигуна незалежного збудження для різних режимів роботи представлено на рис. 6.1. Тут, окрім ділянки характеристик, відповідних руховому режиму (квадрант I), показані ділянки характеристик в квадрантах II і IV, які характеризують три можливі способи генераторного електричного гальмування, а саме:

- 1) гальмування з віддачею енергії в сіть (рекуперативне);
- 2) динамічне гальмування;
- 3) гальмування протиповмикуванням.

Кожний гальмівний режим є генераторним, оскільки енергія поступає в машину з валу, перетворюється в електричну і або віддається в мережу, або затрачується на нагрів елементів якірного кола, що володіють активним опором, і розсіюється в оточуюче середовище.

Розглянемо докладніше особливості механічних характеристик при вказаних способах гальмування.

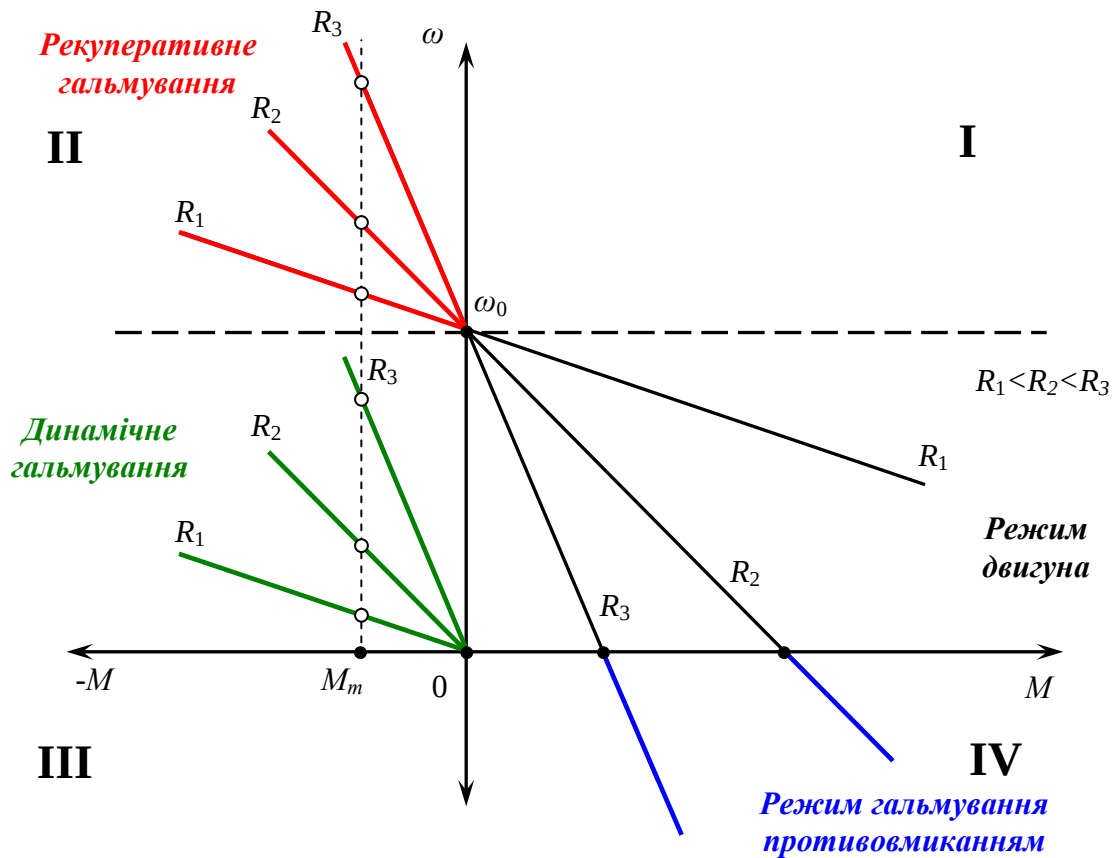


Рисунок 6.1– Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при різних режимах роботи

2. ГАЛЬМУВАННЯ З ВІДДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖУ

1. Гальмування з віддачею енергії в мережу (генераторний режим роботи паралельно з мережею) здійснюється у тому випадку, коли швидкість двигуна виявляється вище за швидкість ідеального холостого ходу і його ЕРС E більше прикладеної напруги U . Двигун тут працює в режимі генератора паралельно з мережею, якої він віддає електричну енергію; струм при цьому змінює свій напрям. Останнє очевидно з виразу:

$$I = \frac{U - E}{R} = -\frac{E - U}{R}, \quad (6.1)$$

отже, змінює знак і момент двигуна, тобто він стає гальмівним $M = -k\Phi I$. Якщо позначити гальмівний момент через $M_m = -M$, тоді рівняння

$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{k^2\Phi^2}$ (див. лекцію № 4, формула (4.5)) при $\omega > \omega_0$ прийме наступний вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M_m \frac{R}{k^2\Phi^2}. \quad (6.2)$$

Перший член в правій частині рівняння показує, що механічна характеристика двигуна незалежного збудження в цьому генераторному режимі при $M = 0$ проходить через крапку, відповідну кутовій швидкості ідеального холостого ходу, як і у разі режиму двигуна. Нахил (жорсткість) механічної характеристики визначається співмножником другого члена рівняння $\frac{R}{k^2\Phi^2}$, який по абсолютному значенню (при заданому опорі R) залишається незмінним. Отже, нахил механічної характеристики в даному генераторному режимі буде таким же, як і в режимі двигуна. Тому графічно механічні характеристики двигуна в режимі гальмування з віддачею енергії в мережу є продовженням характеристик режиму двигуна в область квадранта II (рис. 6.1). Цей спосіб гальмування, можливий, наприклад, в приводах транспортних і підйомних механізмів при спуску вантажу і при деяких способах регулювання швидкості, коли двигун, переходячи до низьких швидкостей, проходить значення $\omega > \omega_0$. Таке гальмування є вельми економічним, оскільки воно супроводиться віддачею в мережу електричної енергії (за вирахуванням втрат в двигуні), яку двигун перетворить з механічної, що поступає до нього з валу. Але гальмування цим способом може бути здійснено в обмежених рамках, оскільки не у всіх приводах можливо дотримання умови $\omega > \omega_0$.

Необхідно відзначити, що чим більше опір в якорному колі двигуна, тим вище його кутова швидкість в генераторному режимі роботи паралельно з мережею при тому ж гальмівному моменті (рис. 6.1).

3. ДИНАМІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ

Динамічне гальмування відбувається при відключенні якоря двигуна від мережі і замиканні його на резистор (рис. 6.2), тому іноді його називають *реостатним гальмуванням*. Обмотка збудження при цьому повинна залишатися приєднаною до сіті. Режим динамічного гальмування також відповідає роботі машини як генератор. Проте цей режим відрізняється від описаного вище гальмування з віддачею

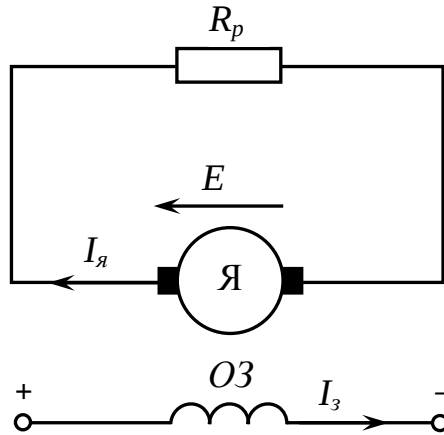


Рисунок 6.2 – Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження при динамічному гальмуванні

енергії в мережу. При динамічному гальмуванні, так само як і у попередньому випадку, механічна енергія, що поступає з валу, наприклад, у вигляді кінетичної енергії, запасеної в двигуні і в елементах що приводиться їм механізму, що рухаються, перетвориться в електричну. Проте ця енергія не віддається в мережу, а виділяється у вигляді теплоти в опорах кола якоря.

Унаслідок того, що ЕРС двигуна зберігає при гальмуванні такий же знак, як і в руховому режимі, а напруга ззовні до якоря не прикладається, струм якоря визначається по формулі:

$$I = \frac{-E}{R}, \quad (6.3)$$

де R – опір якірного кола.

Гальмівний момент при динамічному гальмуванні, якщо нехтувати реакцією якоря, може бути виражений рівністю:

$$-M_m = k\Phi I = -k^2 \frac{\Phi^2}{R} \omega. \quad (6.4)$$

При $\Phi = const$ отримаємо:

$$\omega = M_m \frac{R}{c^2}. \quad (6.5)$$

При динамічному гальмуванні механічна характеристика двигуна, як це видно з (6.5), є прямою, що проходить через початок координат. Сімейство характеристик динамічного гальмування при різних опорах R якірного кола показано в квадранті II на рис. 6.1. Як видно з цього рисунка, жорсткість характеристик зменшується із збільшенням опору якірного кола.

Динамічне гальмування широко використовується для зупинки приводу при відключенні його від мережі (особливо при реактивному характері моменту), при спуску вантажів в підйомних механізмах. Воно достатнє економічно, хоча і поступається в цьому відношенні гальмуванню з віддачею енергії в мережу.

4. ГАЛЬМУВАННЯ ПРОТИВОВМИКАННЯМ

Гальмування протівовмиканням (генераторний режим роботи послідовно з мережею) здійснюється у тому випадку, коли обмотки двигуна включені для одного напрямку обертання, а якір двигуна під впливом зовнішнього моменту або сил інерції обертається в протилежну сторону. Це може відбуватися, наприклад, в приводі підйомника, коли двигун включений на підйом, а момент, що розвивається вантажем, примушує привід обертатися у бік спуску вантажу. Такий же режим виходить і при перемиканні обмотки якоря (або обмотки збудження) двигуна для швидкої зупинки або для зміни напрямку обертання на протилежну.

Графічне зображення механічної характеристики для гальмування протівовмиканням, коли має місце, наприклад, так званий гальмівний спуск вантажу, приведено на рис. 6.3. Як видно з цього рисунка, а також з рис. 6.1, механічна характеристика при гальмуванні протівовмиканням є продовженням характеристики режиму двигуна в область квадранта IV. Останнє, витікає з рівняння механічної характеристики двигуна, якщо вважати момент більшим за момент короткого замикання і позитивним по знаку.

При включенні обмоток двигуна для підйому двигун може бути пущений в хід лише тоді, коли момент опору вантажу M_{c1} буде менше моменту $M_{кз}$ (рис. 6.3). В цьому випадку після включення двигуна в мережу кутова швидкість його збільшується і досягає сталого значення (крапка **A**).

При цьому струм в якорі, як завжди в руховому режимі, визначається по формулі:

$$I = \frac{U - E}{R}. \quad (6.6)$$

Із збільшенням моменту вантажу кутова швидкість двигуна зменшується відповідно характеристиці **AB**, і якщо момент вантажу буде рівний $M_{кз}$, двигун зу-

пиниться. В цьому стані, при $\omega = 0$, ЕРС двигуна рівна нулю, тому струм визначається виразом:

$$I = I_{\kappa 3} = \frac{U}{R}.$$

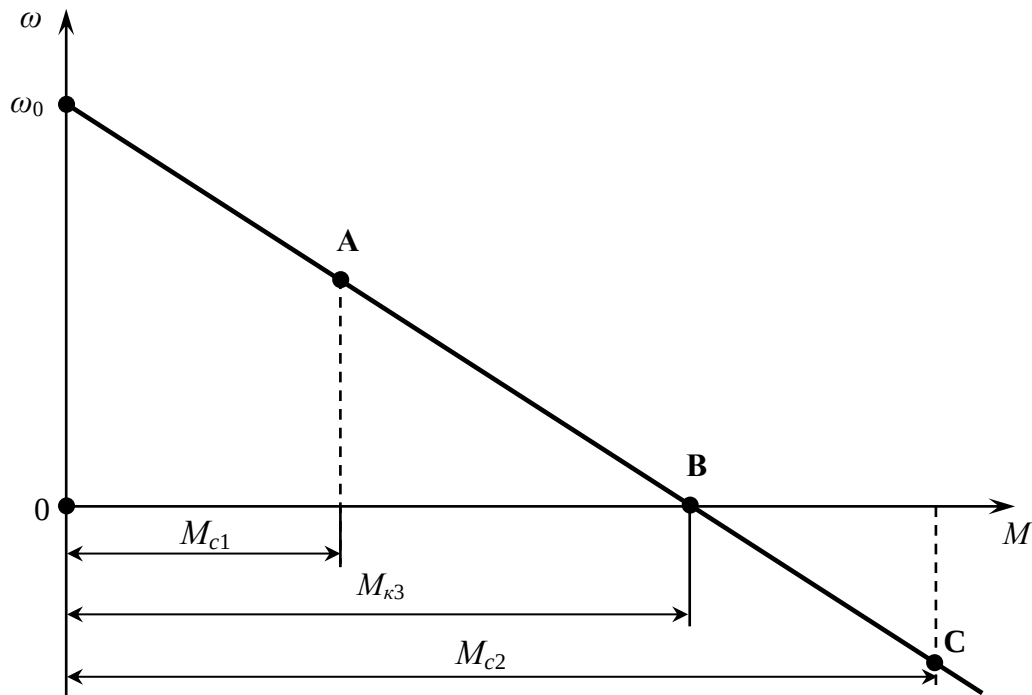


Рисунок 6.3 – Механічна характеристика двигуна постійного струму незалежного збудження при гальмуванні противовмиканням у разі гальмівного спуску

Коли момент опору при подальшому збільшенні вантажу перевищить момент двигуна в нерухомому стані, останній почне обертатися в протилежному напрямі і вантаж стане опускатися. При моменті, рівному M_{c2} , буде досягнута стала швидкість спуску відповідна крапці С на приведений характеристиці. Оскільки якор тепер обертається у зворотний бік, а напрям магнітного потоку не змінився, ЕРС двигуна змінить напрям на зворотний. Струм, визначуваний рівнянням:

$$I = \frac{U + E}{R}, \quad (6.7)$$

буде більше, ніж в руховому режимі, і відповідно момент, що розвивається двигуном при гальмуванні противовмиканням, теж зросте.

В таблиці на рис. 6.4 стрілками показані напрями напруги, ЕРС і падіння напруги, а також дані співвідношення для струмів якоря у разі режиму двигуна, короткого замикання і гальмування протитовмиканням при одному і тому ж значенні опору якірного кола. Для обмеження струму і моменту при гальмуванні доводиться включати додатковий резистор.

Розглянуте гальмування протитовмиканням при сталій швидкості використовується, наприклад, в підйомних пристроях при спуску вантажу G (рис. 6.4). Як видно з таблиці на рис. 6.4, при гальмуванні протитовмиканням ЕРС двигуна направлена послідовно-згідний з напругою мережі, тобто двигун працює в генераторному режимі послідовно з мережею, одержуючи механічну енергію з валу і перетворюючи її в електричну енергію.

Споживається електрична енергія і з мережі. Енергія, яка виробляється двигуном і споживається з мережі виділяється у вигляді теплоти в опорах кола якоря, тому гальмування протитовмиканням не економічно, вимагає великих витрат енергії.

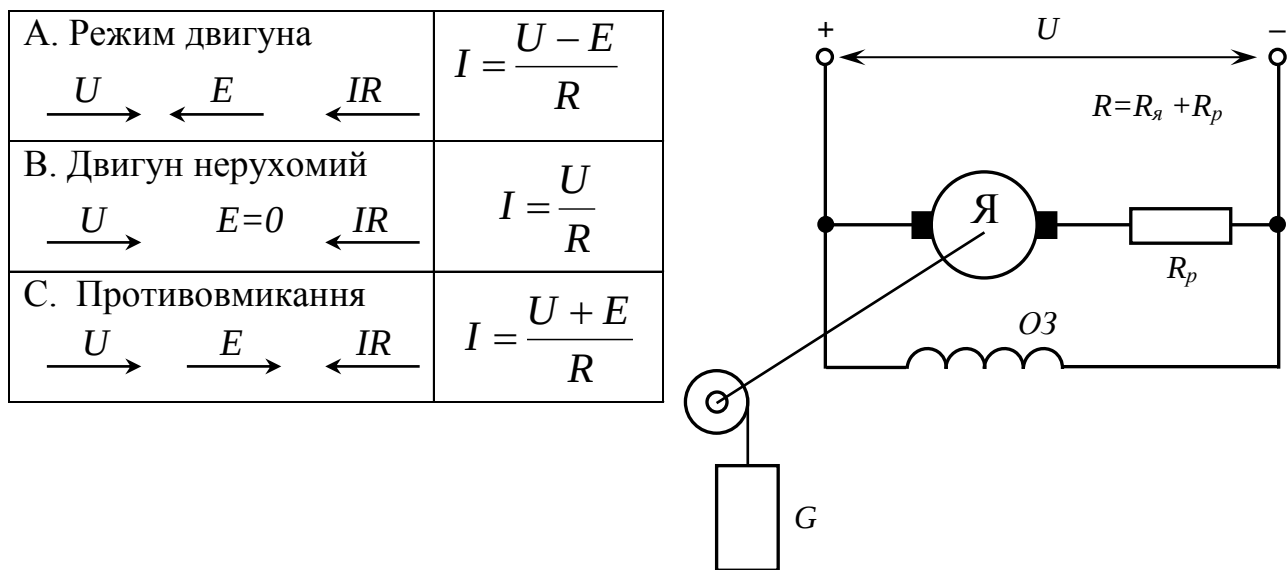


Рисунок 6.4 – Ілюстрація можливих режимів роботи двигуна при підйомі і спуску вантажу

Значно частіше, ніж за рахунок вантажу, гальмування протитовмиканням одержують, змінюючи полярність напруги, що підводиться до якоря двигуна при його обертанні. В цьому випадку, так само як і в попередньому (при спуску вантажу), ЕРС направлена згідно з напругою мережі, а момент двигуна направлений проти обертання якоря. Як було сказано вище, в режимі протитовмикання необхідно включати додатковий резистор в якірне коло для обмеження струму і мо-

менту. При цьому механічні характеристики матимуть великий нахил до осі абсцис.

На рис. 6.5 представлені механічні характеристики при гальмуванні противовмиканням. Тут при зміні полярності напруги, що підводиться до якоря, двигун, що працював до цього з швидкістю, відповідній крапці А квадранта **I**, переходить на роботу по характеристики **BC** (індуктивністю якірного кола нехтуємо) в крапку В квадранта **II**. Збереження незмінної швидкості в перший момент перемикавання двигуна обумовлюється механічною інерцією електроприводу. Під впливом гальмівного моменту швидкість двигуна зменшується відповідно характеристиці **BC** до нульового значення. При швидкості, рівній нулю (крапка **C**, рис. 6.5), двигун у разі гальмування для зупинки, а не реверсу, повинен бути відключений від мережі.

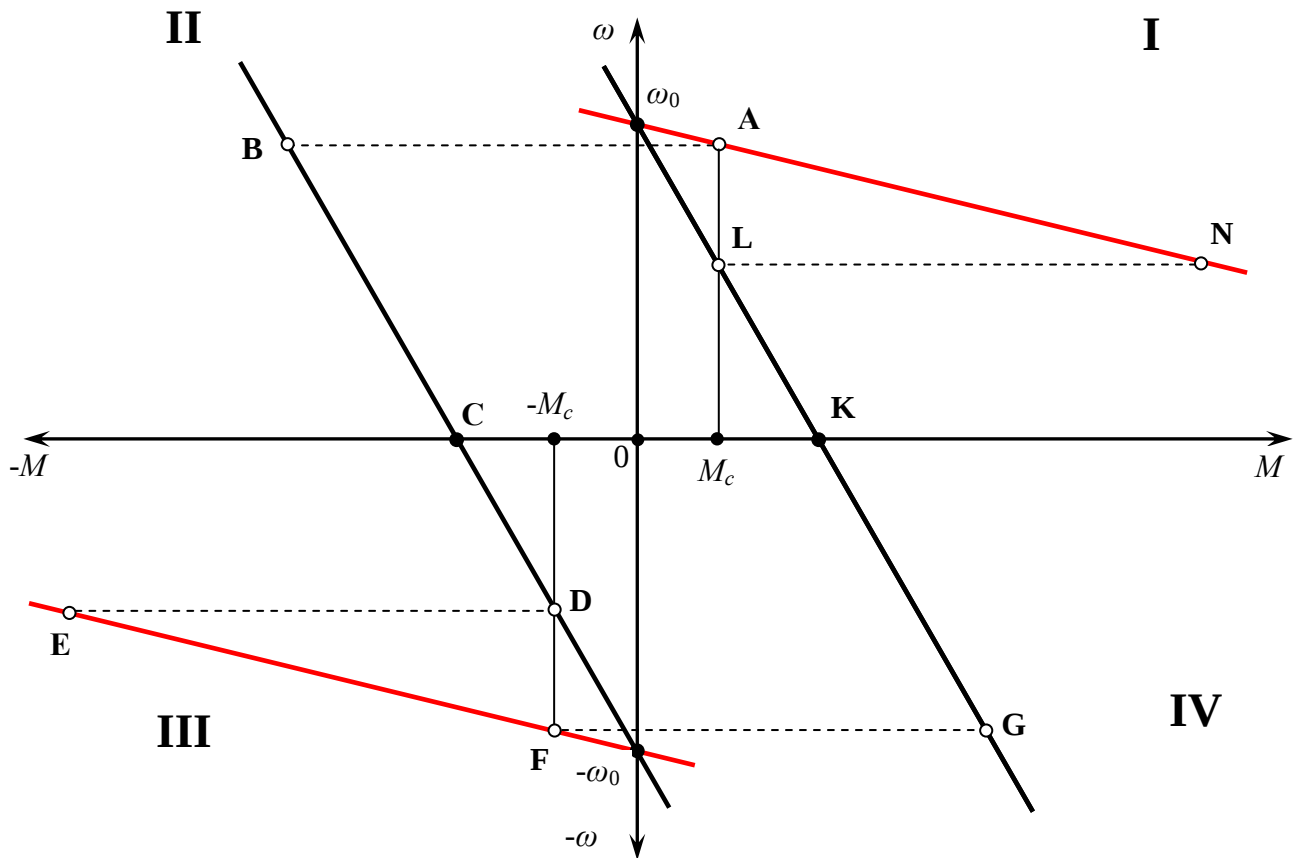


Рисунок 6.5 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при гальмуванні противовмиканням

Якщо такого відключення не відбудеться, швидкість двигуна почне збільшуватися у зворотному напрямі (характеристика **CD** квадранта **III**). Разом із

змінною напрямку обертання змінює напрям ЕРС якоря яка знову в руховому режимі направлена зустрічно напрузі мережі. Тепер привід знов працює в режимі двигуна з постійною кутовою швидкістю, будучи перекладеним на природну характеристику протилежного напрямку обертання (точка **F** характеристики **FE**).

Якщо ще раз змінити полярність напруги на висновках якоря, то двигун знов перейде в режим противовмикання. Гальмування і подальше збільшення кутової швидкості двигуна у зворотному напрямі відбуваються по характеристиці **GKL**.

Зміна напрямку обертання двигуна може бути здійснений двояко. Щоб отримати режим противовмикання, можна перемкнути або обмотку якоря, або обмотку збудження. Проте перемикання обмотки збудження практикується рідше, оскільки унаслідок значної її індуктивності час гальмування зростає в порівнянні з часом гальмування при перемиканні обмотки якоря.

Електричне гальмування отримало в даний час широке застосування, особливо в приводах, що часто пускаються. Для забезпечення необхідного часу гальмування і необхідної точності зупинки в практиці частіше за все застосовується динамічне гальмування або гальмування противовмиканням. Для нереверсивних приводів частіше застосовують динамічне гальмування, оскільки воно здійснюється по більш простій схемі. Для реверсивних приводів, де гальмування і пуск двигуна у зворотному напрямі є єдиним процесом, доцільно застосовувати гальмування противовмиканням, яке дає вигоду в часі.

Лекція № 7

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження.
2. Побудова механічних характеристик двигуна послідовного збудження.

1. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Для електродвигуна послідовного збудження, принципова схема включення якого представлена на рис. 7.1, рівняння електромеханічної характеристики, так само як і для двигуна незалежного збудження, має вигляд:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}, \quad (7.1)$$

де R – сумарний опір якірного кола, що складається з опору обмотки якоря, обмотки збудження і опору зовнішнього резистора (за наявності додаткових полюсів враховується і їх опір).

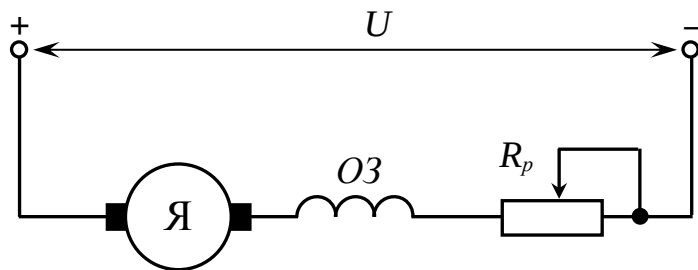


Рисунок 7.1. Схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження

На відміну від двигуна незалежного збудження тут магнітний потік Φ є функцією струму якоря I . Ця залежність, приведена на рис. 7.2, носить назву *кривої намагнічування*. Оскільки немає точного аналітичного виразу для кривої намагнічування, то важко дати і точний аналітичний вираз для механічної характеристики двигуна послідовного збудження.

Якщо для спрощення аналізу припустити, нехтуючи насиченням магнітної системи, лінійну залежність між потоком і струмом якоря, тобто рахувати $\Phi = \alpha I$, то момент двигуна:

$$M = k\Phi I,$$

$$M = \alpha k I^2. \quad (7.2)$$

Підставивши в рівність для кутової швидкості двигуна значення струму з (7.2), отримаємо вираз для механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{\alpha k \sqrt{M/\alpha k}} - \frac{R}{\alpha k} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B. \quad (7.3)$$

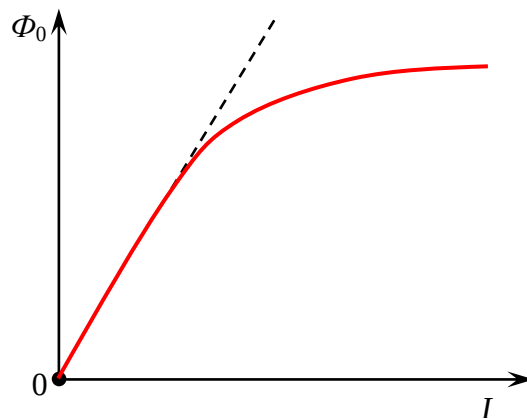


Рисунок 7.2 – Крива намагнічування двигуна постійного струму послідовного збудження

Звідси витікає, що при ненасиченому магнітному колі двигуна механічна характеристика зображається кривій (рис. 7.3), для якої вісь ординат є асимптою.

Особливістю механічної характеристики двигуна послідовного збудження є її велика крутизна в області малих значень моменту. Значне збільшення кутової швидкості при малих навантаженнях обумовлюється відповідним зменшенням магнітного потоку. Вираз (7.3) дає лише загальне уявлення про механічну характеристику двигуна послідовного збудження. При розрахунках цим рівнянням користуватися не можна, оскільки машин з ненасиченою магнітною систе-

мою звичайно в сучасній практиці не будують. Унаслідок того, що дійсні механічні характеристики сильно відрізняються від кривої, вираженої рівнянням (7.3), побудова характеристик доводиться вести графоаналітичними способами. Звичайно побудова штучних характеристик проводиться на підставі даних каталогів, де приводяться природні характеристики: $n = f(I)$ і $M = \psi(I)$.

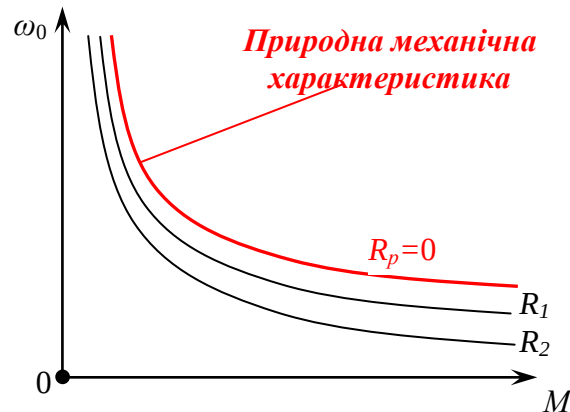


Рисунок 7.3 – Сімейство механічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження

Для серії двигунів певного типу ці характеристики можуть бути приведені у відносних одиницях: $\omega_* = f(I_*)$ і $M_* = \psi(I_*)$. Такі характеристики називаються *універсальними* і представлені на рис. 7.4.

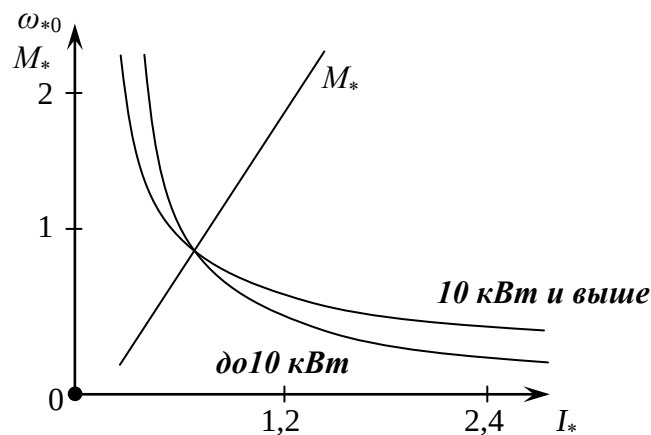


Рисунок 7.4 – Залежність моменту і кутової швидкості від струму якоря двигуна постійного струму послідовного збудження (у відносних одиницях)

Відзначимо, що в каталогах дається залежність моменту на валу двигуна від струму. При побудові механічних характеристик приймається залежність кутової швидкості від електромагнітного моменту. Це практично допустимо зважаючи на невелику різницю між електромагнітним моментом і моментом на валу.

Для побудови штучних (реостатних) характеристик можна скористатися наступним методом. Рівняння природної характеристики:

$$\omega_e = \frac{U - IR_D}{k\Phi} \quad (7.4)$$

де $R_D = R_s + R_a$
або

$$\omega_e = \frac{U}{k\Phi} \left(1 - \frac{IR_D}{U} \right) \quad (7.5)$$

У разі включення в якірне коло додаткового резистора R_p двигун працюватиме на реостатній характеристиці, для якої:

$$\omega_e = \frac{U}{k\Phi} \left[1 - \frac{I(R_D + R_P)}{U} \right] \quad (7.6)$$

При розподілі (7.5) на (7.6) отримаємо:

$$\frac{\omega}{\omega_e} = \frac{U - I(R_D + R_P)}{U - IR_D} \quad (7.7)$$

звідси

$$\omega = \omega_e \frac{U - I(R_D + R_P)}{U - IR_D} \quad (7.8)$$

або у відносних одиницях

$$\omega_* = \omega_{e*} \frac{1 - I_* R_{*}}{1 - I_* R_{D*}} \quad (7.9)$$

де $R_* = \frac{R_D + R_P}{R_{ном}}$ – сумарний опір якірного кола у відносних одиницях;

$$R_{Д*} = \frac{R_D}{R_{ном}}; \quad \omega_* = \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad \omega_{e*} = \frac{\omega_e}{\omega_{ном}}; \quad I_* = \frac{I}{I_{ном}}.$$

2. ПОБУДОВА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Порядок побудови реостатної характеристики зводиться до того, що, задаючись деякими довільними значеннями струму I_1^* , по наявній природній характеристиці знаходять ω_{e1}^* . Потім по (7.9) при визначеному $R_* = R_1^*$ (для якого будується реостатна характеристика) і тому ж I_1^* визначають шукане значення ω_1^* . Таким же чином для інших значень I^* визначають шукані значення швидкості ω_2^* , ω_3^* і т.д. На рис. 7.5 показана природна характеристика двигуна послідовного збудження R_D^* і реостатна R_1^* , побудована по вказаному методу.

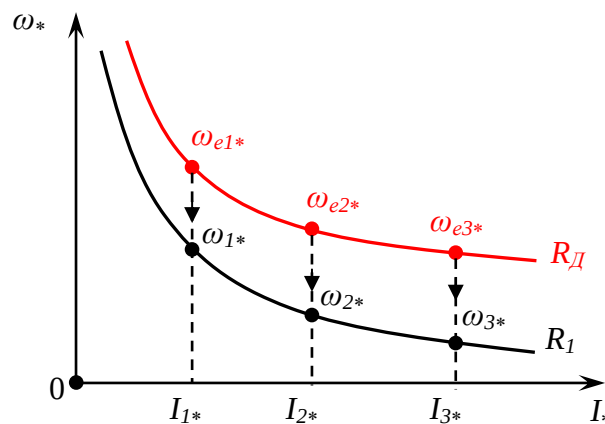


Рисунок 7.5 – Природна і реостатні швидкісні характеристик двигуна послідовного збудження

Користуючись кривою $\omega_* = f(I_*)$ (див. рис. 7.4) і швидкісними характеристиками, легко побудувати криві $\omega_* = f(M_*)$, тобто механічні характеристики двигуна.

На рис. 7.6 приведена природна R_D і реостатна $R_1 - R_3$ механічні характеристики двигуна послідовного збудження, побудовані у відносних одиницях. Із

збільшенням опору швидкість двигуна при тому ж моменті зменшується і характеристика зміщується вниз. Жорсткість характеристики зменшується із зростанням додаткового опору в якірному колі.

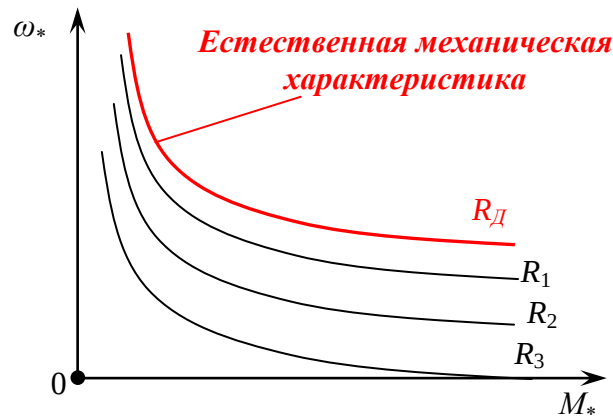


Рисунок 7.6 – Природна і реостатні механічних характеристик двигуна послідовного збудження

Особливістю механічних характеристик даного двигуна є неможливість отримання режиму ідеального холостого ходу.

При навантаженні нижче 15 – 20 % номінальної робота двигуна практично недопустима через надмірне збільшення швидкості якоря.

Розрахунок опорів резисторів для пуску двигунів послідовного збудження може бути проведений наступним графоаналітичним методом, що не вимагає побудови самих реостатних характеристик двигуна.

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} = A - BR. \quad (7.10)$$

Скористаємося природною характеристикою двигуна $\omega = f(I)$ і, відзначивши на ній точки допустимих струмів при перемиканні з одного ступеня резистора на інший I_1 і I_2 (рис. 7.7), проведемо через ці крапки пунктиром дві паралельні лінії до перетину з вертикаллю Af в точках f і e . Вертикаль Af розташована ліворуч від початку координат на відстані $0A$, відповідному внутрішньому опору двигуна. Відкладаємо в тому ж масштабі відрізки $0a = R_1 = U/I_1$ і $0g = R_2 = U/I_2$. З'єднуючи крапки a і e а також g і f , одержуємо дві прямі, які характеризують лінійну залежність між швидкістю двигуна і опором його якірного кола при незмінному струмі якоря. Останнє витікає з виразу:

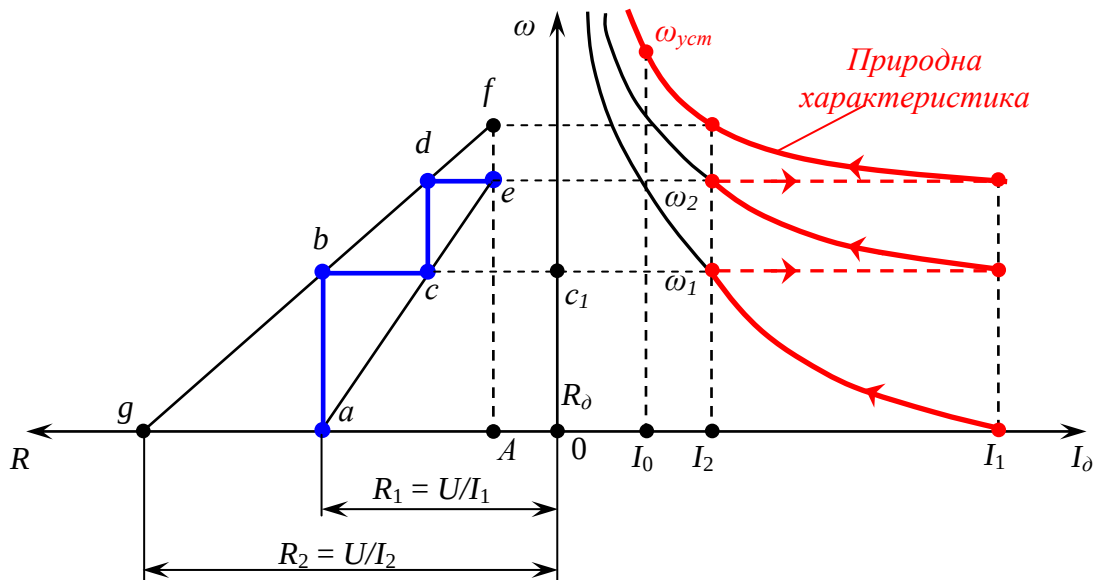


Рисунок 7.7 – Графічна побудова ступенів пускового резистора двигунів постійного струму послідовного збудження

Для визначення числа пускових ступенів і їх опорів поступають таким чином. Проводять вертикаль через точку a до перетину з gf в точці b . Потім через точку b проводять лінію, паралельну осі абсцис, до точки c на лінії ae . Аналогічно проводяться лінії cd і de . Побудова вважається вдалою, якщо остання горизонталь проходить через точку e . Якщо цього не відбудеться, то побудову слід повторити, змінивши нахил однієї з прямих ae або gf за рахунок вибору нових значень I_1 і I_2 (частіше змінюють тільки I_2).

На рис. 7.7 дана побудова з числом ступенів реостата, рівним двом. З побудови ясно, що відрізок bc відповідає опору першого ступеня реостата, а de – другий. У момент пуску (при $\omega = 0$) струм в якорі буде рівний I_1 , а опір всього якірного кола $R_1 = U / I_1$. При розгоні двигуна до швидкості ω_1 струм зменшується, а опір якірного кола не змінюється. В точці b опір той же, але струм рівний I_2 . Потім при $\omega = \omega_1$ відбувається шунтування першого ступеня, загальний опір якірного кола стає відповідним відрізку cc_1 , а струм знов досягає значення I_1 і т.д., поки двигун не почне працювати на природній характеристиці.

Лекція № 8

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження в гальмівних режимах.
2. Механічні характеристики двигуна постійного струму змішаного збудження.

1. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ В ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ

Для двигуна послідовного збудження можливі два гальмівні режими: гальмування противовмиканням і динамічне гальмування. Гальмування з віддачею енергії в мережу для цих двигунів здійснити неможливо, оскільки їх ЕРС не може бути більше прикладеної напруги мережі.

При гальмуванні противовмиканням в коло якоря двигуна вводиться додатковий резистор для обмеження струму.

Механічні характеристики для цього гальмування є продовженням характеристик рухового режиму в область негативної кутової швидкості. Це ілюструється характеристиками, які проходять в квадрантах **I** і **IV** (рис. 8.1).

Гальмування противовмиканням можливо, якщо рушійний момент навантаження стає більше моменту короткого замикання $M_{кз}$ двигуна. Навантаження двигуна при противовмиканням повинна бути обмежено допустимим струмом в якірному колі.

Так само як і для двигуна паралельного збудження, тут можливо гальмування противовмиканням при зміні полярності напруги, що підводиться до якоря. В цьому випадку витікає, змінивши напрям струму якоря, залишити без зміни напрям струму в обмотці збудження.

Механічні характеристики при зміні полярності напруги на якорі представлені на рис. 8.2 побудованими за тим же принципом, що і на рис. 6.5 (Лекція № 6). Динамічне гальмування двигуна послідовного збудження може бути здійснено двома способами: з самозбудженням і з незалежним збудженням.

При гальмуванні з самозбудженням (рис. 8.3) якір і обмотка збудження двигуна відключаються від мережі і замикаються на резистор.

Слід зазначити, що при перекладі машини з режиму двигуна в режим динамічного гальмування з самозбудженням необхідно щоб уникнути розмагнічування машини перемкнути обмотку збудження або якоря так, щоб напрям струму в

обмотці збудження не змінювався. В цьому випадку машина самозбуджується при даному опорі кола якоря лише при певних значеннях швидкості; збудившись, вона створює гальмівний момент.

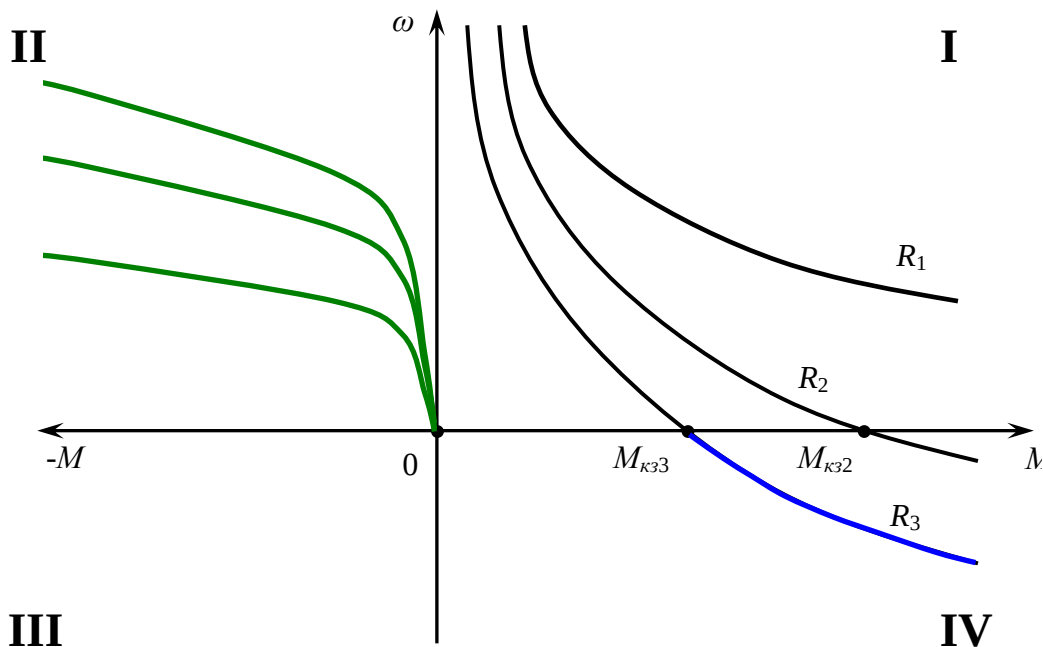


Рисунок 8.1 – Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження при різних режимах роботи

Практично гальмівний момент виникає і при швидкостях, близьких до нуля, унаслідок наявності залишкового магнетизму, але при низьких швидкостях гальмівний момент вельми малий. Механічні характеристики машини для цього випадку приведені в квадранті II на рис. 8.1.

При цьому способі гальмування може спочатку відбуватися інтенсивне самозбудження, яке приводить до значного стрибка гальмівного моменту. Останній при порівняно великих махових масах механізму може викликати небажані удари в механізмі. Тому частіше застосовується динамічне гальмування з незалежним збудженням двигуна послідовного збудження по схемі, представленій на рис. 8.4. Обмотка збудження в цьому випадку підключається до мережі через резистор, обмежуючий струм до номінального значення. Оскільки двигун працює як генератор з незалежним збудженням, його характеристики подібні характеристикам машини незалежного збудження при динамічному гальмуванні, які були приведені на рис. 6.1. (Лекція № 6) Ці характеристики лінійні і всі перетинаються на початку координат, володіючи більшою жорсткістю при менших опорах.

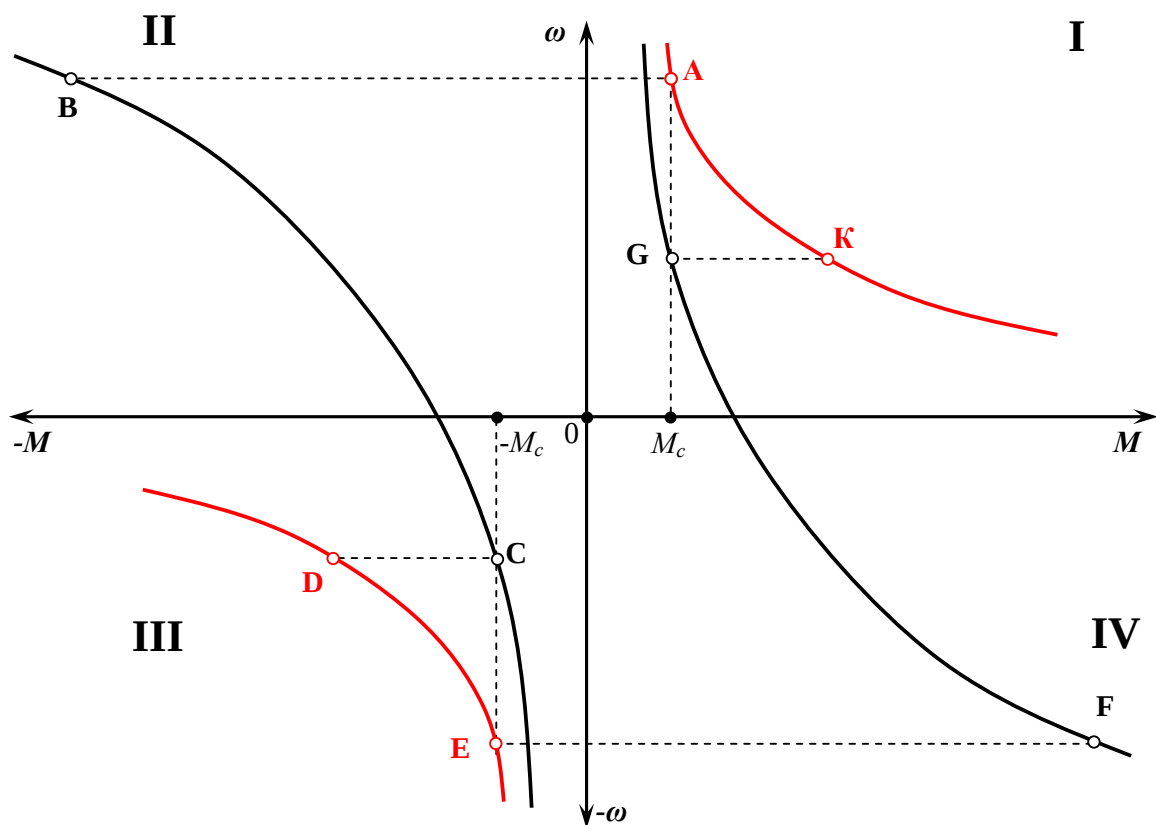


Рисунок 8.2 – Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження при гальмуванні протитовмиканням

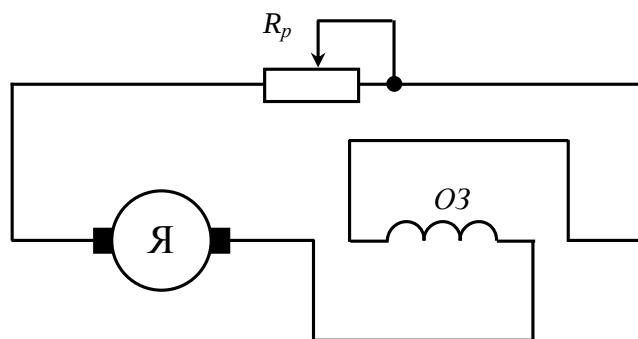


Рисунок 8.3 – Схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження при динамічному гальмуванні з самозбудженням

Іноді для двигунів малої потужності відмовляються від включення послідовної обмотки по схемі рис. 8.4 і здійснюють підтримку потоку при динамічному гальмуванні короткозамкнутими мідними кільцями на полюсах. Такі схеми

з метою економії апаратів були виконані, наприклад, для двигунів потужністю 0,52 кВт в системі управління завантаженням доменної печі.

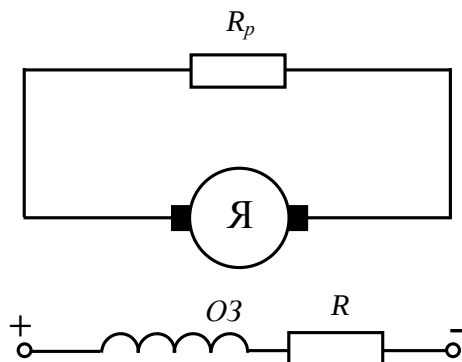


Рисунок 8.4 – Схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням

2. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Двигун змішаного збудження (рис. 8.4) має два обмотки збудження: незалежну $O32$ і послідовну $O31$, тому його механічні характеристики займають проміжне положення між відповідними характеристиками двигунів незалежного і послідовного збудження. Механічна характеристика даного двигуна унаслідок зміни магнітного потоку при зміні навантаження не має аналітичного виразу, тому при розрахунках звичайно користуються природними універсальними характеристиками моменту і швидкості від струму якоря, які даються в каталогах. Такі характеристики у відносних одиницях представлені на рис. 8.5.

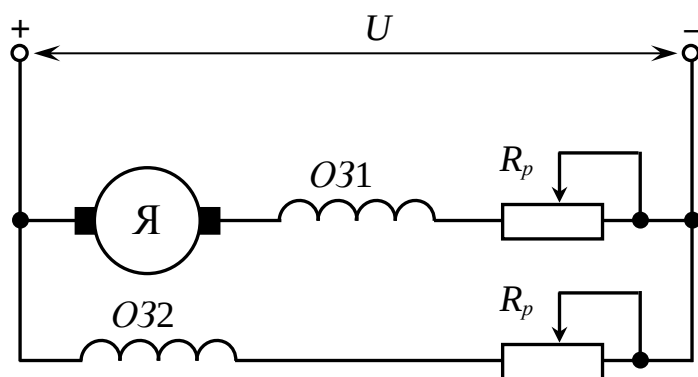


Рисунок. 8.4 – Принципова схема включення двигуна постійного струму змішаного збудження

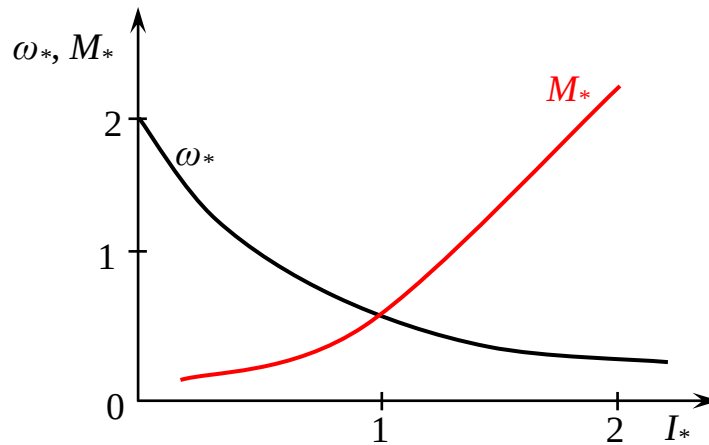


Рисунок 8.5 – Залежність моменту M_* , і кутової швидкості ω_* від струму якоря I_* , для двигуна постійного струму змішаного збудження (у відносних одиницях)

На відміну від двигуна послідовного збудження двигун змішаного збудження має кінцеве значення швидкості ідеально холостого ходу. Ця швидкість визначається тільки магнітним потоком, створеним магніторушійної сили (МРС) незалежної обмотки, і рівна:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_0} \quad (8.1)$$

де Φ_0 – магнітний потік, створений струмом збудження незалежної обмотки.

Співвідношення СН (сила, що намагнічує) незалежної і послідовної обмоток різні для двигунів різних серій. Самим споживаним є співвідношення, яке при номінальному струмі дає рівність СН обох обмоток збудження. Швидкість двигуна змішаного збудження при малих навантаженнях змінюється значно, а потім при збільшенні навантаження поволі зменшується майже по прямій, як у двигуна незалежного збудження. Відбувається це унаслідок того, що при великих навантаженнях настає насичення машини, і хоча СН послідовної обмотки зростає, магнітний потік вже майже не змінюється. Для розрахунку реостатних характеристик може бути застосований розглянутий вище метод побудови характеристик двигуна послідовного збудження.

Двигун змішаного збудження допускає три способи електричного гальмування;

- 1) з віддачею енергії в мережу,
- 2) динамічне і

3) протитовмиканням.

При гальмуванні з віддачею енергії в мережу струм в якорі і в послідовній обмотці змінює напрям і може розмагнітити машину. Щоб уникнути дії розмагнічування, звичайно під час переходу через кутову швидкість ω_0 послідовну обмотку шунтують, і тому механічні характеристики в квадранті II (рис. 8.6) мають вид прямих. Такий же вигляд мають і характеристики динамічного гальмування унаслідок того, що воно здійснюється звичайно при включенні тільки незалежної обмотки, коли магнітний потік практично постійний. Характеристики при гальмуванні протитовмиканням нелінійні унаслідок впливу СН послідовної обмотки збудження, що змінюється, при зміні навантаження.

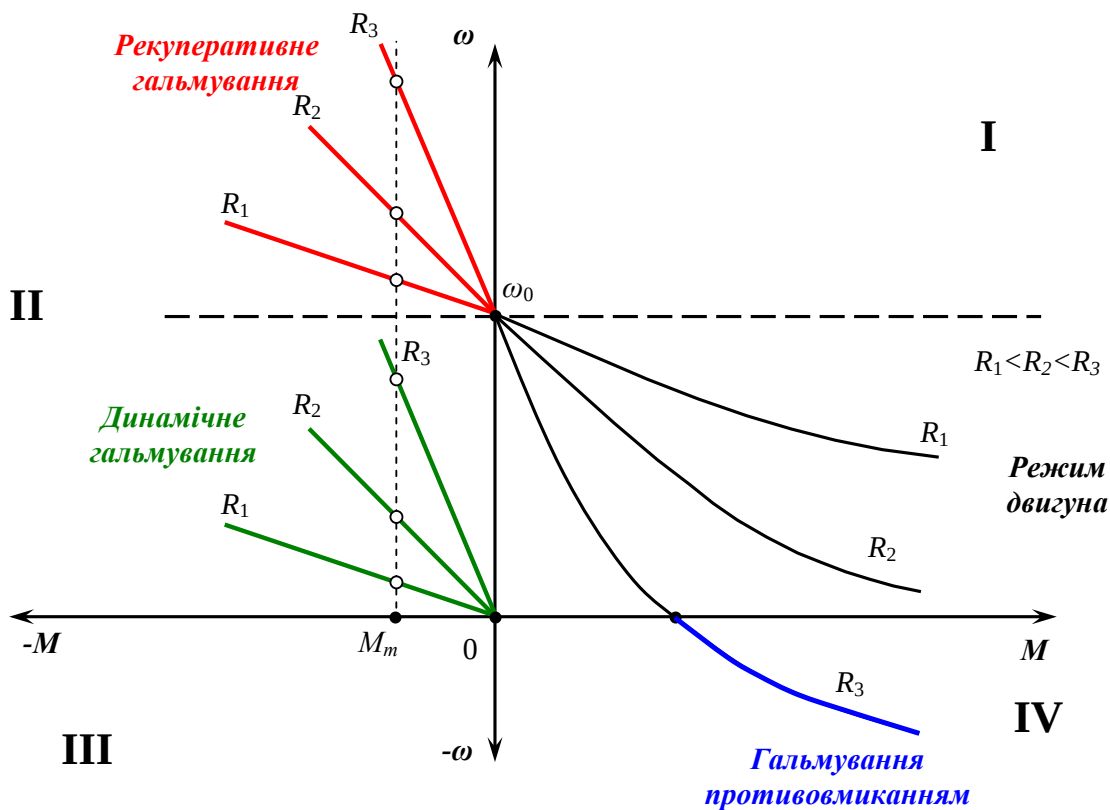


Рисунок 8.6 – Механічні характеристики двигуна постійного струму змішаного збудження для різних режимів роботи

Лекція № 9

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна.
2. Механічні характеристики асинхронного двигуна.

1. РІВНЯННЯ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Асинхронні двигуни (АД) отримали в промисловості широке застосування завдяки ряду істотних переваг в порівнянні з іншими типами двигунів. Асинхронний двигун простий і надійний в експлуатації, оскільки не має колектора; асинхронні двигуни дешевше і значно легше за двигуни постійного струму.

Трифазний АД має обмотку статора, що підключається до трифазної мережі змінного струму з напругою U_1 і частотою f_1 і обмотку ротора, що може бути виконана за двома варіантами (рис. 9.1).

Перший варіант передбачає виконання звичайної трифазної обмотки з провідників з виводами на три контактних кільця. Така конструкція відповідає АД з фазним ротором (рис. 9.1. а) і дозволяє включати в роторне коло різні електротехнічні елементи, наприклад резистори, для регулювання швидкості, струму і моменту ЕП і створювати з тією ж метою спеціальні схеми включення АД. Інший вид обмотки одержують заливанням алюмінію в пази ротора, у результаті чого утвориться конструкція, відома під назвою «біляча клітка». Схема АД з такою обмоткою, яка не має виводів і отримала назву короткозамкнута, представлена на рис. 9.1. б.

Для отримання виразів для електромеханічної і механічної характеристик АД використовується його схема заміщення, на якій коло статора і ротора представлені своїми активними й індуктивними опорами. Особливість схеми заміщення АД полягає в тому, що струм, ЕРС і параметри кола ротора перераховані (приведені) до кола статора, що і дозволяє зобразити ці два кола на схемі з'єднаними електрично, хоча в дійсності зв'язок між ними здійснюється через електромагнітне поле.

Приведення здійснюється за допомогою коефіцієнта трансформації АД за ЕРС:

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{0,95U_{\phi.ном}}{E_{2k}}, \quad (9.1)$$

де E_1 і E_2 – фазні ЕРС статори і ротора при нерухомому роторі;
 $U_{\phi,ном}$ – фазна номінальна напруга мережі.

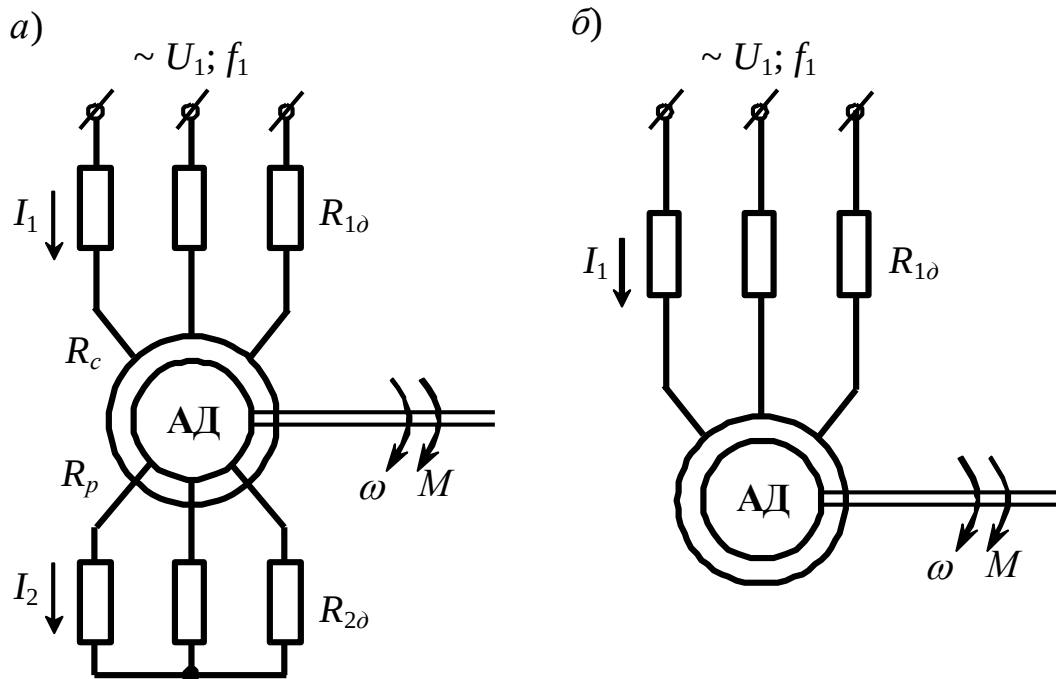


Рисунок 9.1 – Схема включення АД с фазним ротором (а)
і з коротко замкнутим ротором (б)

Розрахункові формули приведення мають такий вигляд:

$$E'_2 = E_2 k = E_1; I'_2 = \frac{I_2}{k}; R'_2 = R_2 k^2 X'_2 = X_2 k^2, \quad (9.2)$$

де штрихом позначені приведені значення.

У теорії електричних машин розроблені і застосовуються дві основні схеми заміщення АД: більш точна Т-подібна і спрощена П-подібна. На рис. 9.2 представлено П-подібну схему заміщення, що надалі і використовується при виведенні формул для характеристик АД.

На схемах (рис. 9.1 та рис. 9.2) прийняті такі позначення:

U_1, U_ϕ – діючі значення лінійної і фазної напруги мережі;

I_1, I_μ, I'_2 – фазні струми статора, намагнічування і приведений струм ротора;

X_1, X'_2 – індуктивні опори від потоків розсіювання фази обмотки статора і приведеної фази ротора;

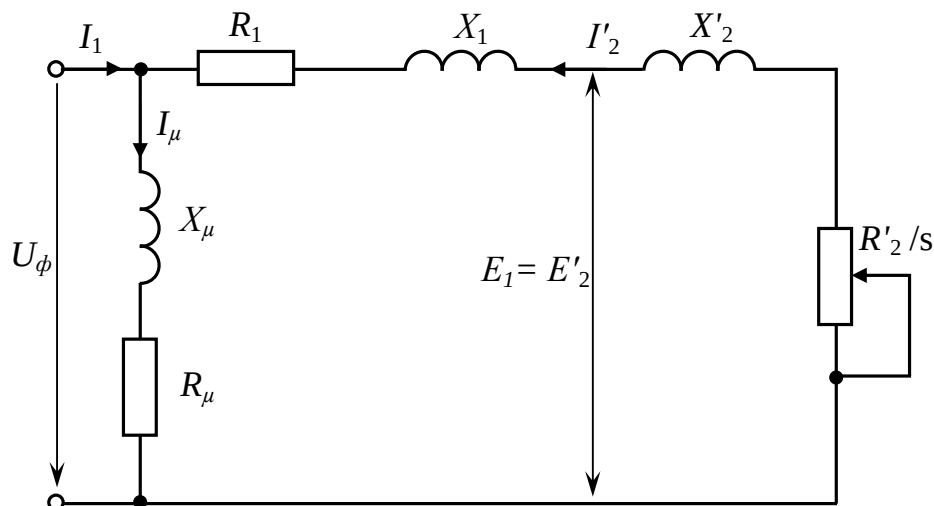


Рисунок 9.2 – Схема заміщення АД

X_μ – індуктивний опір контуру намагнічування;

R_μ – активний опір контуру намагнічування;

$R_c, R_{1\sigma}, R_1 = R_c + R_{1\sigma}$ – активні фазні опори обмотки статора, додаткового резистора і сумарний опір статора;

$R'_p, R'_{2\sigma}, R'_2 = R'_p + R'_{2\sigma}$ – активні приведені до обмотки статора фазні опори обмотки ротора, додаткового резистора і сумарний опір ротора;

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – ковзання АД;

$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ – кутова швидкість магнітного поля АД (швидкість ідеального холостого ходу);

f_1 – частота живильної напруги;

p – число пар полюсів АД.

Як видно зі схеми, ЕРС статора дорівнює приведеній ЕРС ротора, а струм намагнічування I_μ , який визначає магнітний потік АД, протікає під дією U_ϕ за визначеним колом, що складається з опорів контуру намагнічування X_μ і R_μ , і являє собою векторну суму струмів статора і приведеного роторного, тобто $I_\mu = I_1 + I'_2$.

Відповідно до приведеної схеми заміщення можна отримати вираз для вторинного струму:

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (9.3)$$

Момент асинхронного двигуна може бути визначений з виразу втрат, звідки:

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s}. \quad (9.4)$$

Підставляючи значення струму I_2' в (9.4), одержуємо:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right] s}, \quad (9.5)$$

Крива моменту $M = f(s)$ має два максимуми: один – в генераторному режимі, інший – в режимі двигуна (при значних опорах роторного кола максимум моменту може опинитися в режимі гальмування протитовмикуванням.).

Прирівнюючи, визначаємо значення критичного ковзання s_{kp} , при якому двигун розвиває максимальний (критичний) момент:

$$s_{kp} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (9.6)$$

Підставляючи значення s_{kp} в (9.5), знаходимо вираз для максимального моменту:

$$M_{kp} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (9.7)$$

Знак “+” в рівності (9.6) і (9.7) відноситься до режиму двигуна (або гальмування противовмиканням), знак “–” до генераторного режиму роботи паралельно з мережею (при $\omega > \omega_0$).

Якщо вираз (9.5) розділити на (9.7) і провести відповідні перетворення, то можна отримати:

$$M = \frac{2M_{кр}(1 + as_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2as_{кр}}, \quad (9.8)$$

де $M_{кр}$ – максимальний момент двигуна;

$s_{кр}$ – критичне ковзання, відповідне максимальному моменту;

$$a = \frac{R_1}{R'_2}.$$

Тут слід підкреслити дуже важливу для практики обставину – вплив зміни напруги мережі на механічні характеристики АД. Як видно з (9.6), при даному ковзанні момент двигуна пропорційний квадрату напруги, тому двигун цього типу чутливий до коливань напруги мережі.

2. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Критичне ковзання і кутова швидкість ідеального холостого ходу не залежать від напруги.

На рис. 9.3 приведена механічна характеристика АД.

Її характерні точки:

1) $s = 0$; $M = 0$, при цьому швидкість двигуна дорівнює синхронній;

2) $s = s_{ном}$; $M = M_{ном}$, що відповідає номінальній швидкості і номінальному моменту;

3) $s = s_{кр}$; $M = M_{кр,д}$ – максимальний момент в режимі двигуна;

4) $s = 1,0$; $M = M_{II} = \frac{2M_{кр}(1 + as_{кр})s_{кр}}{1 + s_{кр}^2(1 + 2a)}$ – початковий пусковий

момент;

5) $s = -s_{кр}$; $M = M_{кр,г}$ – максимальний момент в генераторному режимі роботи паралельно з мережею.

При $s > 1,0$ двигун працює в режимі гальмування противовмиканням, при $s < 0$ має місце генераторний режим роботи паралельно з мережею (рекуперативного гальмування).

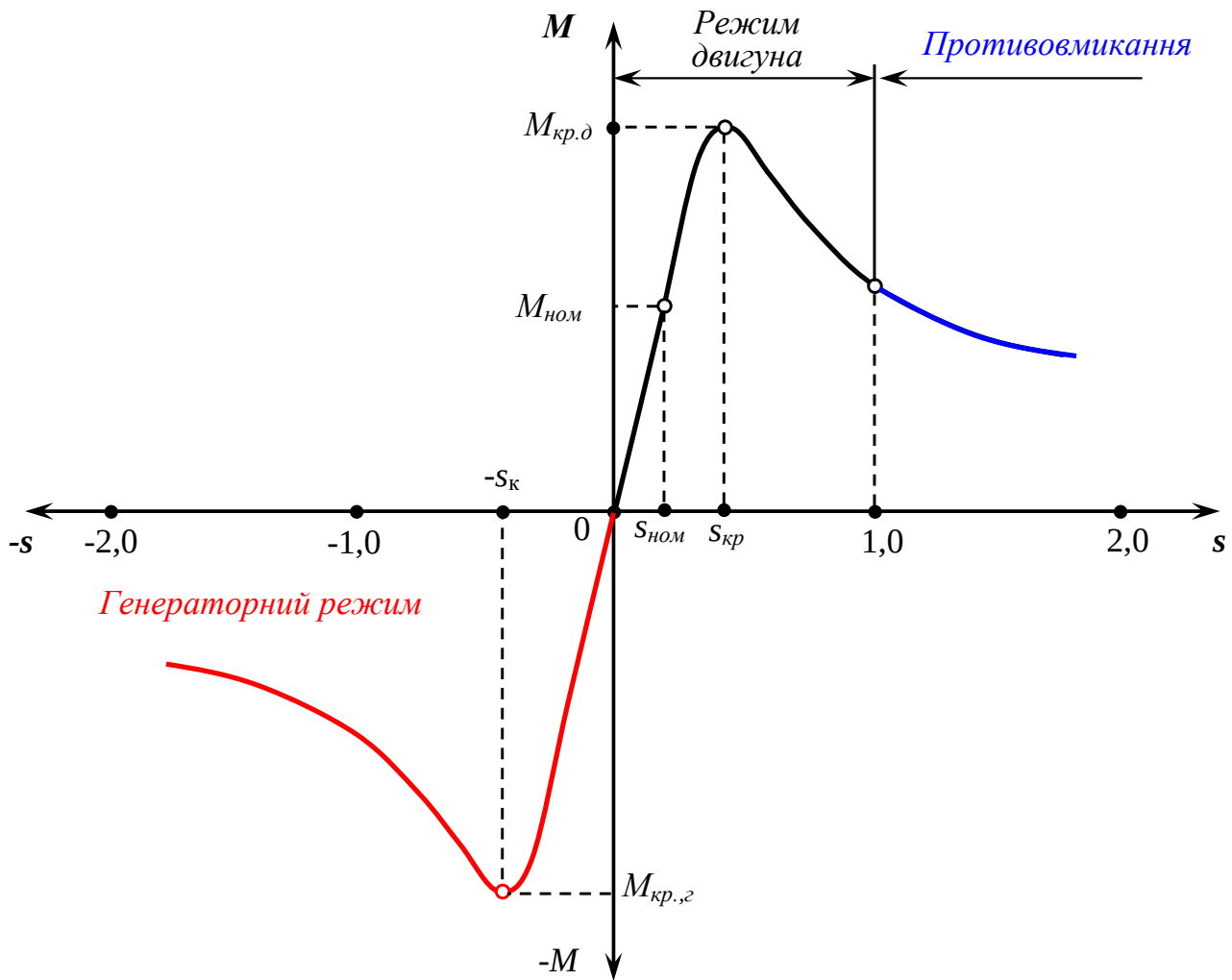


Рисунок 9.3 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Необхідно підкреслити, що абсолютні значення в режимі двигуна і генераторному паралельно з мережею однакові.

Проте з (7) витікає, що максимальні моменти в режимі двигуна і генераторному режимі різні. У генераторному режимі роботи паралельно з мережею максимальний момент по абсолютному значенню більше, що виходить із співвідношення:

$$M_{кр.г} = M_{кр.д} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}, \quad (9.9)$$

де $X_{\kappa} = X_1 + X_2'$.

Якщо в рівнянні (9.8) нехтувати активним опором статора, то вийде формула, зручніша для розрахунків:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (9.10)$$

$$\text{де } s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{X_{\kappa}}; M_{кр} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 X_{\kappa}}$$

Підставивши у вираз (9.10) замість поточних значень M і s їх номінальні значення і позначивши кратність максимального моменту $\frac{M_{кр}}{M_{ном}}$ через λ – перевантажувальна здатність, отримаємо:

$$s_{кр} = s_{ном} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (9.11)$$

Аналіз формули (9.10) показує, що при $s > s_{кр}$ (неробоча частина характеристики) вийде рівняння гіперболи, якщо в цьому випадку нехтувати другим членом знаменника в рівнянні (9.10), тобто:

$$M = 2M_{кр} \frac{s_{кр}}{s}, \quad (9.12)$$

або

$$M = A/s, \quad (9.13)$$

де $A = 2M_{кр} s_{кр}$.

Ця частина характеристики практично відповідає лише пусковим і гальмівним режимам.

При малих значеннях ковзання ($s < s_{кр}$) для $M = f(s)$ вийде рівняння прямої, якщо нехтувати першим членом в знаменнику (9.10):

$$M = 2M_{кр} \frac{s}{s_{кр}}, \quad (9.14)$$

або

$$M = B \cdot s, \quad (9.15)$$

де $B = \frac{2M_{кр}}{s_{кр}}$.

Ця лінійна частина характеристики, є її робочою частиною, на якій двигун працює в сталому режимі. На цій же частині характеристики знаходяться точки, відповідні номінальним даним двигуна: $M_{ном}$, $I_{ном}$, $n_{ном}$, $s_{ном}$.

Статичне падіння (перепад) швидкості у відносних одиницях на природній механічній характеристиці асинхронного двигуна при номінальному моменті визначається його номінальним ковзанням.

Величина номінального ковзання залежить від опору ротора. Найменшим номінальним ковзанням при однаковій потужності і числі полюсів володіють звичайно двигуни з короткозамкнутим ротором нормального виконання. У цих двигунів через конструктивні особливості опір ротора має відносно невелике значення, що веде до зменшення значень критичного ковзання $s_{кр}$ (9.6) і номінального ковзання $s_{ном}$. З тих же причин при збільшенні потужності двигуна зменшується його номінальне ковзання і росте жорсткість власної механічної характеристики. Останнє ілюструється кривий рис. 9.4, побудованої за середніми даними для двигунів різної потужності.

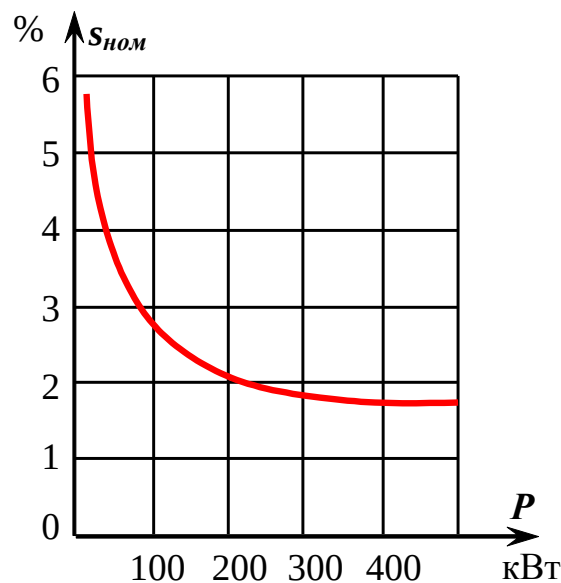


Рисунок 9.4 – Крива номінального ковзання для АД різної потужності

Величина критичного моменту, як це видно з (9.7), не залежить від активного опору ротора, критичне ж ковзання згідно (9.6) збільшується у міру збільшення опору ротора. Внаслідок цього у двигунів з фазним ротором при введенні

резисторів в коло ротора максимум кривої моменту зміщується у бік великих ковзань.

Значення опору, необхідне для побудови природної і реостатних характеристик двигуна з фазним ротором, визначається з виразу:

$$R_2 = \frac{s_{ном} E_{2к}}{\sqrt{3} I_{2ном}}, \quad (9.16)$$

де $E_{2к}, I_{2ном}$ – лінійна напруга при нерухомому роторі і номінальний струм ротора.

На рис. 9.5 приведені сімейство реостатних характеристик в режимі двигуна в координатних осях M і ω для різних значень опорів роторного кола. З відомим наближенням реостатні характеристики в робочій їх частині можуть бути прийняті лінійними. Це дає можливість при розрахунку опорів резисторів, що включаються в роторне коло АД, користуватися методами, аналогічними методами, вживаним для розрахунку опору кола якоря двигуна постійного струму незалежного збудження. Деяка неточність у визначення опору резистора вноситься при цьому за рахунок того, що характеристика АД на ділянці графіка від $M = 0$ до максимального моменту при пуску вважається лінійною.

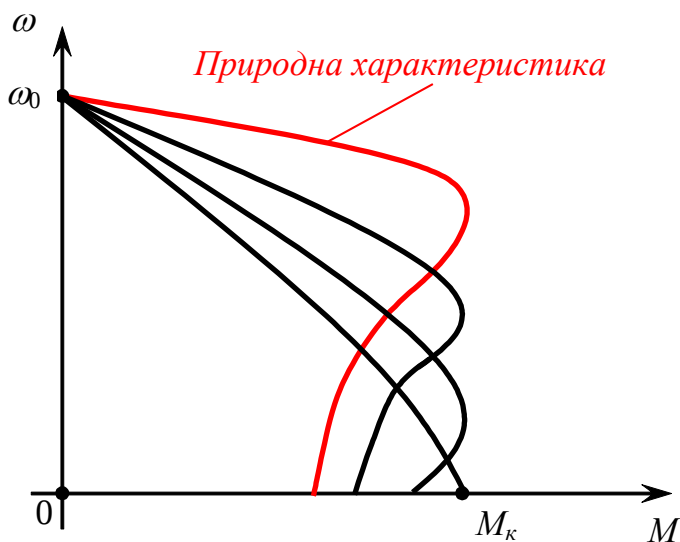
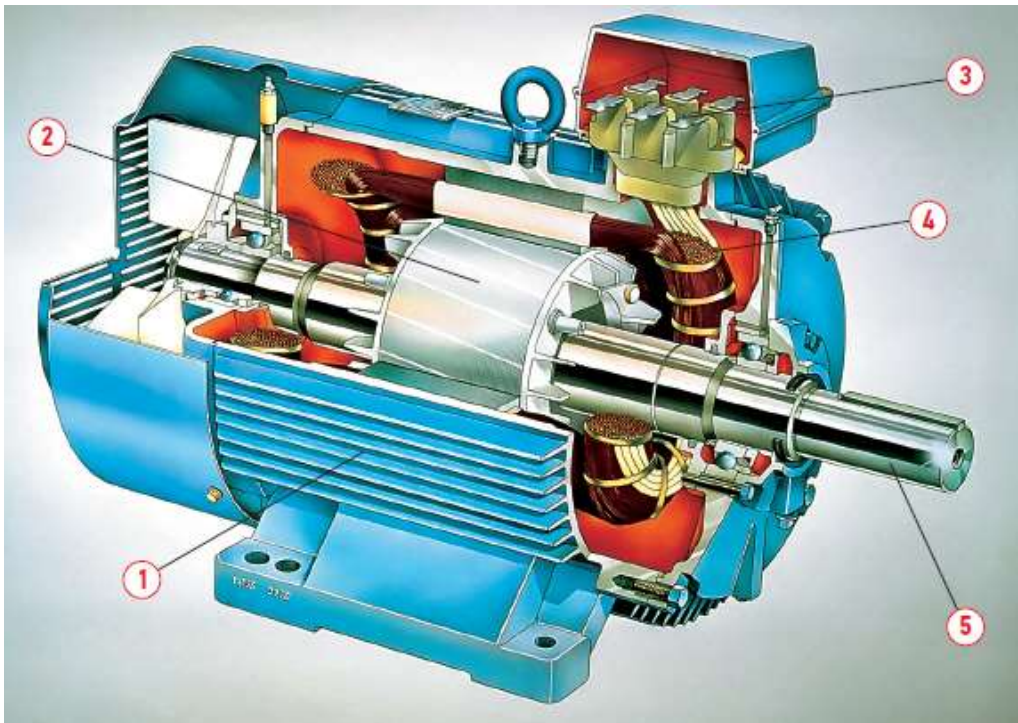


Рисунок 9.5 – Власна і реостатні механічні характеристики АД з фазним ротором

Точнішим є метод, коли випрямлення характеристик проводиться на меншій ділянці. Кратність максимального моменту через $\lambda = \frac{M_{кр.д}}{M_{ном}}$ повинна бути у

двигунів нормального виконання з фазним ротором не нижче 1,8, а у двигунів з короткозамкнутим ротором не нижче 1,7. Двигуни, кранів, відрізняються вищою кратністю максимального моменту. Наприклад, для двигунів з короткозамкнутим ротором серії МТК $\lambda = 2,3 \div 3,4$. Двигуни з фазним ротором згаданих серій мають приблизно ті ж величини λ .

Для двигунів з короткозамкнутим ротором істотне значення з погляду електроприводу мають кратності початкового пускового моменту і початкового пускового струму.



1 - корпус з ребрами для охолодження; 2 - ротор; 3 - роз'їм для підключення; 4 - обмотки статора; 5 - вал ротора

Лекція № 10

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Гальмування з віддачею енергії в мережу.
2. Гальмування протитовмиканням.
3. Динамічне гальмування асинхронного двигуна.

1. ГАЛЬМУВАННЯ З ВІДДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖУ

Раніше були розглянуті механічні характеристики асинхронної машини, що працює режимі двигуна. Проте АД може працювати і в гальмівних режимах: при гальмуванні з віддачею енергії в мережу, при гальмуванні протитовмиканням і при динамічному гальмуванні.

Гальмування з віддачею енергії в мережу (генераторний режим роботи паралельно з мережею) можливо при швидкості вище за синхронну. Механічні характеристики АД в координатах M і ω представлені на рис 10.1.

У квадранті **I** розташовані ділянки характеристик режиму двигуна для трьох різних опорів роторного кола. У міру наближення швидкості двигуна до швидкості ідеального холостого ходу, або синхронної швидкості момент двигуна наближається до нуля.

При подальшому збільшенні кутової швидкості під впливом зовнішнього моменту, коли $\omega > \omega_0$, двигун працює в режимі генератора паралельно з мережею, якої він може віддавати електричну енергію, споживаючи при цьому реактивну потужність для збудження. Гальмуванню з віддачею енергії в мережу відповідають ділянки характеристик, розташовані у верхній частині квадранта **II**. У цьому режимі, як видно з виразу для $M_{кр}$ (9.9), максимальний момент має більше значення, ніж в режимі двигуна. Режим гальмування з віддачею енергії в мережу застосовується до двигунів при перемиканні полюсів, а також для приводів вантажопідйомних машин (підйомники, екскаватори і т. п.) і в деяких інших випадках.

2. ГАЛЬМУВАННЯ ПРОТИТОВМИКАННЯМ

Гальмування протитовмиканням має значно більше застосування на практиці. Режим гальмування протитовмиканням може бути одержаний, так само як і для двигуна постійного струму, при моменті навантаження $M_c > M_n$ (рис. 10.1).

Для обмеження струму і отримання відповідного моменту необхідно при використанні двигуна з фазним ротором в його роторне коло включити додатко-

вий резистор. Сталому режиму при гальмуванні протитовмиканням відповідає, наприклад, точка $\omega_{уст}$, M_c на характеристиці R_{p2} (рис. 10.1).

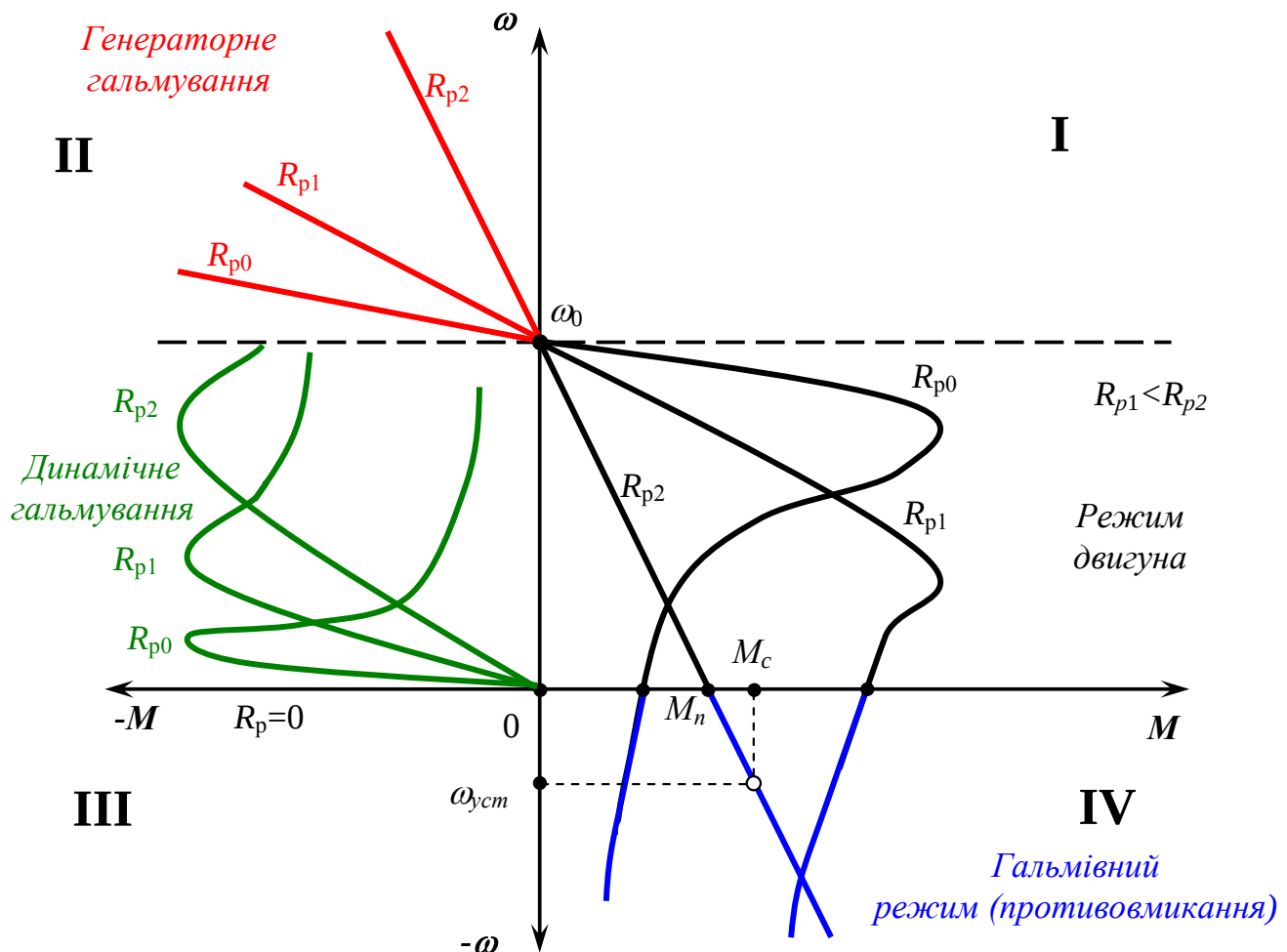


Рисунок 10.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна для різних його режимів роботи

Механічна характеристика для R_{p1} у режимі гальмування протитовмиканням і $M_c = const$ не забезпечує стійкої роботи. Гальмування протитовмиканням може бути отримано також шляхом перемикавання на ходу двох фаз обмотки статора, що веде до зміни напрямку обертання магнітного поля (перехід з точки **A** в точку **B** на рис. 10.2). Ротор при цьому обертається проти напрямку руху поля і поступово сповільнюється. Коли кутова швидкість спаде до нуля (точка **C** на рис. 10.2), двигун потрібно відключити від мережі, інакше він може знов перейти в режим двигуна, причому ротор його обертатиметься в напрямі, зворотному попередньому (точка **D**).

3. ДИНАМІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Динамічне гальмування асинхронного двигуна здійснюється звичайно включенням обмотки статора на мережу постійного струму; обмотка ротора при цьому замикається на зовнішні резистори. Для переходу з режиму двигуна в режим динамічного гальмування перемикач **В** (рис. 10.3) відключає статор від мережі змінного струму і приєднує обмотку статора до мережі постійного струму. Для обмеження струму і отримання різних гальмівних характеристик в колі ротора передбачені зовнішні резистори.

Проходячи по обмотці статора, постійний струм утворює нерухоме поле, основна хвиля якого дає синусоїдальний розподіл індукції. У роторі, що обертається, виникає змінний струм, що створює своє поле, яке також нерухомо щодо статора. В результаті взаємодії сумарною магнітного потоку із струмом ротора виникає гальмівний момент, який залежить від СН статора, опору ротора і кутової швидкості двигуна.

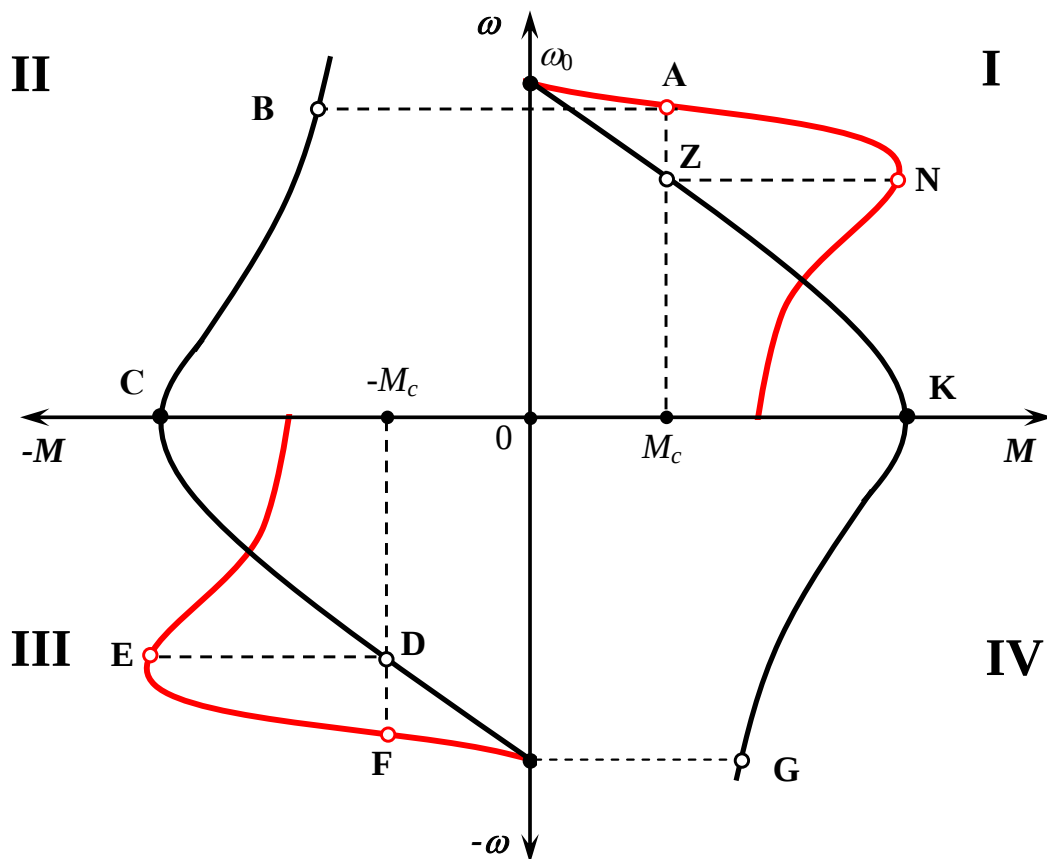


Рисунок 10.2 – Механічна характеристика АД для режиму гальмування протиповмиканням шляхом перемикавання на ходу двох фаз обмотки статора

Механічні характеристики для цього режиму приведені в нижній частині квадранта II (див. рис. 6). Вони проходять через початок координат, оскільки при кутовій швидкості, рівній нулю, гальмівний момент в цьому режимі також рівний нулю. Максимальний момент пропорційний квадрату прикладеної до статора напруги (якщо нехтувати насиченням) і зростає із зростанням напруги. Критичне ковзання залежить від опору роторного кола. Воно збільшується пропорційно зростанню опору. Максимальний момент при цьому не змінюється. На рис. 6 характеристики динамічного гальмування приведені для трьох різних опорів кола ротора і одному і тому ж струму статора.

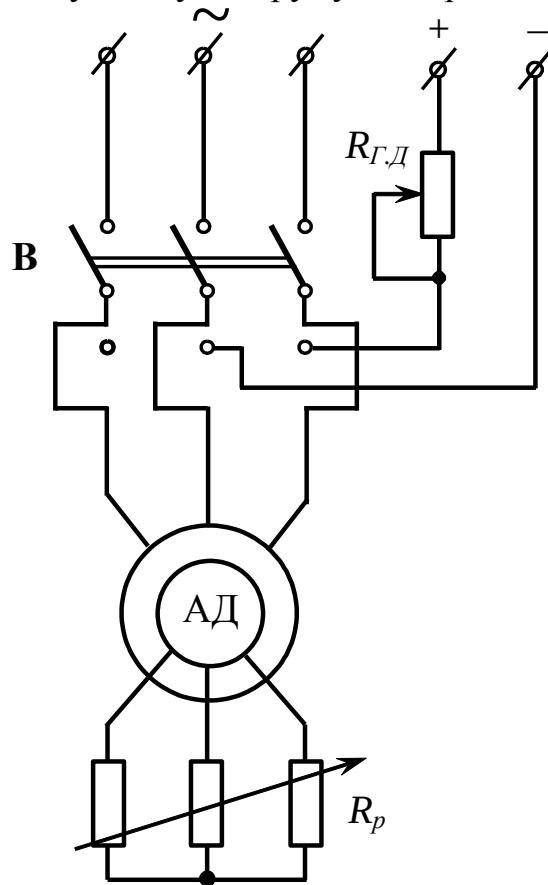


Рисунок 10.3 – Принципова схема динамічного гальмування

На рис. 10.4, представлені різні схеми включення обмоток статора при живленні їх від джерел постійного струму. У схемах на рис. 10.4, в, д, е навантаження всіх фаз обмотки статора рівномірне, проте схема перемикання статора складна. Простішими, часто вживаними на практиці є схеми на рис. 10.4, а, г.

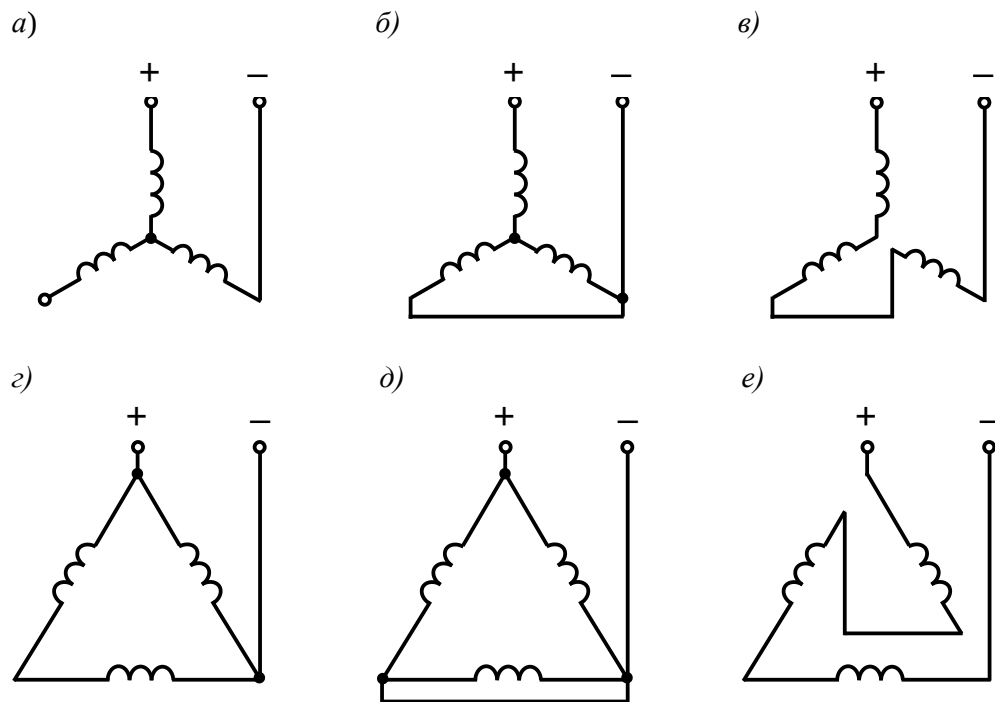


Рисунок 10.4 – Схеми включення обмоток статора при динамічному гальмуванні асинхронного двигуна

Лекція № 11

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Динамічне гальмування асинхронного двигуна.

1. ДИНАМІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Живлення обмоток статора АД при здійсненні динамічного гальмування може проводитися від мережі змінного струму через напівпровідниковий випрямляч В, як це показано на рис. 11.1.

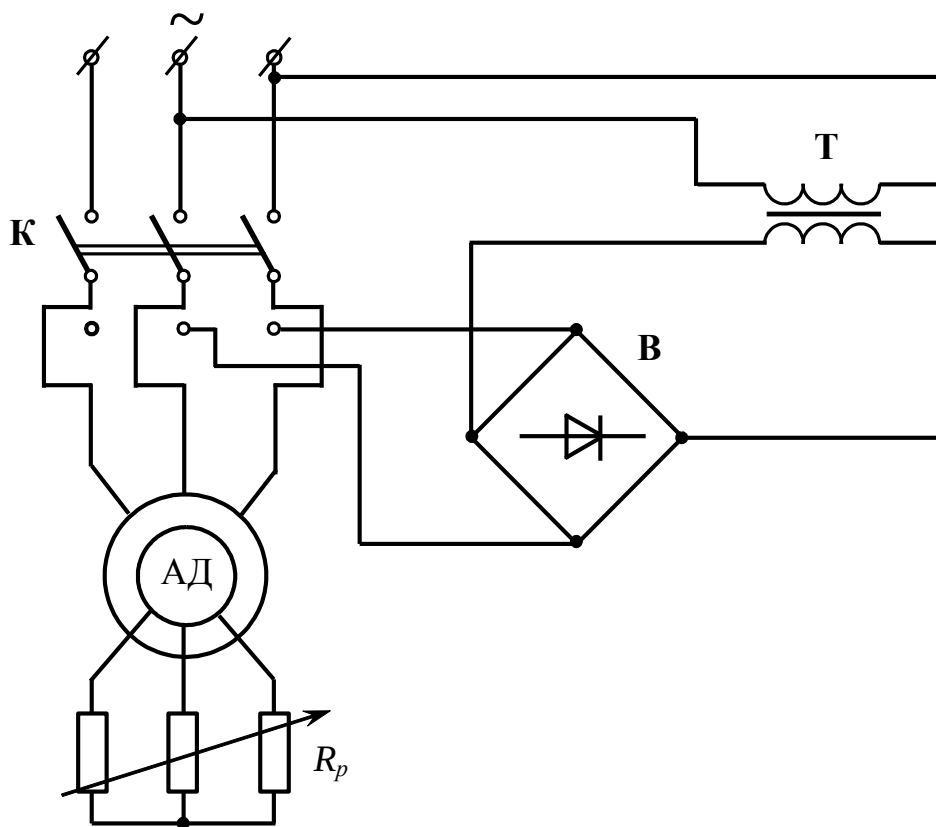


Рисунок 11.1 – Схема включення АД в мережу змінного струму з використанням напівпровідникового випрямляча при динамічному гальмуванні

Аналіз роботи АД в режимі динамічного гальмування доцільно провести, вважаючи, що статор живиться не постійним, а еквівалентним трифазним змін-

ним струмом $I_{екв}$. Ця заміна припускає рівність СН, створених постійним струмом і еквівалентним змінним струмом. Амплітуда СН, створюваної змінним струмом визначається:

$$F = \frac{3\sqrt{2}}{2} I_{екв} \omega_1, \quad (11.1)$$

де ω_1 – число послідовно з'єднаних витків фази статора.

СН, яка створювана постійним струмом, пропорційна величині постійного струму, числу витків фази статора і залежить від схеми з'єднання. Наприклад, при з'єднанні статора в зірку і проходженні постійного струму тільки по двом фазах (рис. 10.4) СН постійного струму, визначається геометричною сумою НС двох фаз, рівна:

$$F = \sqrt{3} I_{II} \omega_1. \quad (11.2)$$

Виходячи з рівності, визначають значення еквівалентного змінного струму для даного випадку:

$$I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{II}. \quad (11.3)$$

Визначивши еквівалентний струм, можна побудувати спрощену векторну діаграму для АД в гальмівному режимі (рис. 11.2). На діаграмі I_{μ} – струм намагнічування, I_2' – вторинний струм приведений до статора, $I_{екв}$ – первинний еквівалентний струм, E_2' , E_1 – відповідно вторинна приведена і первинна ЕРС.

Струм намагнічування I_{μ} визначається геометричною сумою еквівалентного струму $I_{екв}$ і вторинного приведенного до статора струму I_2' . Величина еквівалентного струму не залежить від швидкості обертання ротора, тоді як зі зміною швидкості змінюється вторинний струм. Кінець вектора $I_{екв}$ при зменшенні швидкості обертання ротора переміщатиметься по колу вправо і при нерухомому роторі вектор $I_{екв}$ співпадає зі I_{μ} , оскільки вторинна ЕРС і відповідно вторинний струм виявляться рівними нулю. Тому при малих швидкостях обертання ротора і порівняно великому еквівалентному струмі двигун в режимі динамічного гальмування виявляється з сильно насиченою магнітною системою. Навпаки, при великих швидкостях і тому ж еквівалентному струмі, магнітна система буде не насиченою. Зразкова залежність $I_{\mu} = f[s(\omega)]$ приведена на рис. 11.3.

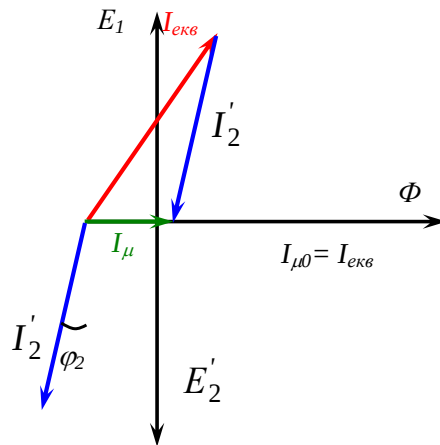


Рисунок – 11.2 Векторна діаграма струмів для АД в режимі динамічного гальмування

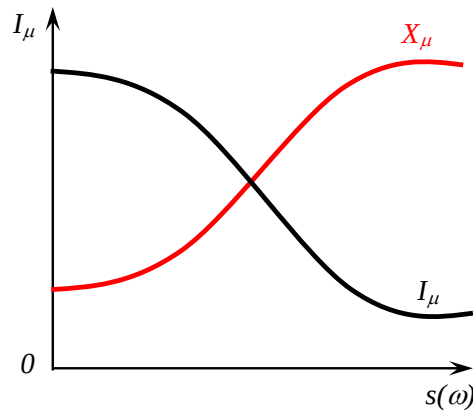


Рисунок – 11.3 Залежність I_μ і X_μ від ковзання (s) або швидкості ω

У зв'язку з явищем насичення магнітної системи не залишається постійною і реактивність намагнічування X_μ (рис. 11.3).

З діаграми (рис. 11.2):

$$I_{екв} = I_2'^2 + 2I_\mu I_2' \sin \varphi_2 + I_\mu^2; \quad (11.4)$$

$$I_2' = \frac{E_{20}' \cdot s}{\sqrt{R_2'^2 + (X_2' \cdot s)^2}} = \frac{I_\mu X_\mu \cdot s}{\sqrt{R_2'^2 + (X_2' \cdot s)^2}}, \quad (11.5)$$

де E'_{20} – приведена вторинна ЕРС при синхронній швидкості двигуна і струмі, що намагнічує, I_μ (вторинна ЕРС може бути знайдена по кривій намагнічування двигуна);

$$X_\mu = \frac{E'_{20}}{I_\mu} - \text{реактивність намагнічування};$$

$$s = \frac{\omega}{\omega_0} - \text{ковзання при динамічному гальмуванні.}$$

Вирішуючи спільно (11.4) і (11.5) знаходимо:

$$I'_2 = \frac{I_{екв} X_\mu}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_\mu + X'_2)^2}}. \quad (11.6)$$

Електромагнітний момент що розвивається двигуном:

$$M = \frac{3I'_2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_0} = \frac{3I_{екв}^2 X_\mu^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_0 \left[\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_\mu + X'_2)^2 \right]}. \quad (11.7)$$

Якщо припустити в першому наближенні машину ненасиченої, то (11.7) $X_\mu = const$ і M буде функцією s , оскільки інші параметри приймаються постійними, тому, диференціюючи M по s знайдемо:

$$s_{max} = \frac{R'_2}{X_\mu + X'_2}, \quad (11.8)$$

при якій момент має максимум:

$$M_{max} = \frac{3I_{екв}^2 X_\mu^2}{2\omega_0 (X_\mu + X'_2)}. \quad (11.9)$$

Після нескладних перетворень (11.7) приймає вигляд:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}}. \quad (11.10)$$

Рівняння (11.10) по своїй структурі аналогічно рівнянню механічній характеристиці АС в режимі двигуна.

Відзначимо, що критичне ковзання в режимі двигуна істотно більше за критичне ковзання в режимі динамічного гальмування при тому ж опорі кола ротора, тобто:

$$s_{кр} \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \gg \frac{R_2'}{X_\mu + X_2'}, \quad (11.11)$$

у наслідку того що $X_\mu \gg X_1$.

Лекція № 12

ТЕМА № 2. Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

План

1. Схема включення і механічна характеристика синхронного двигуна.
2. Пускові характеристики синхронного двигуна.
3. Кутова характеристика синхронного двигуна. Режими роботи синхронного двигуна

1. СХЕМА ВКЛЮЧЕННЯ І МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Синхронні двигуни, якщо вони працюють при постійній частоті з незмінною кутовою швидкістю, застосовуються для приводів, що не вимагають регулювання швидкості. До таких приводів відносяться: компресори, холодильні машини, каменедробарки і т.п. Основна перевага синхронного двигуна, полягає в можливості працювати з високим коефіцієнтом потужності, що приводить до все більш широкого його застосування.

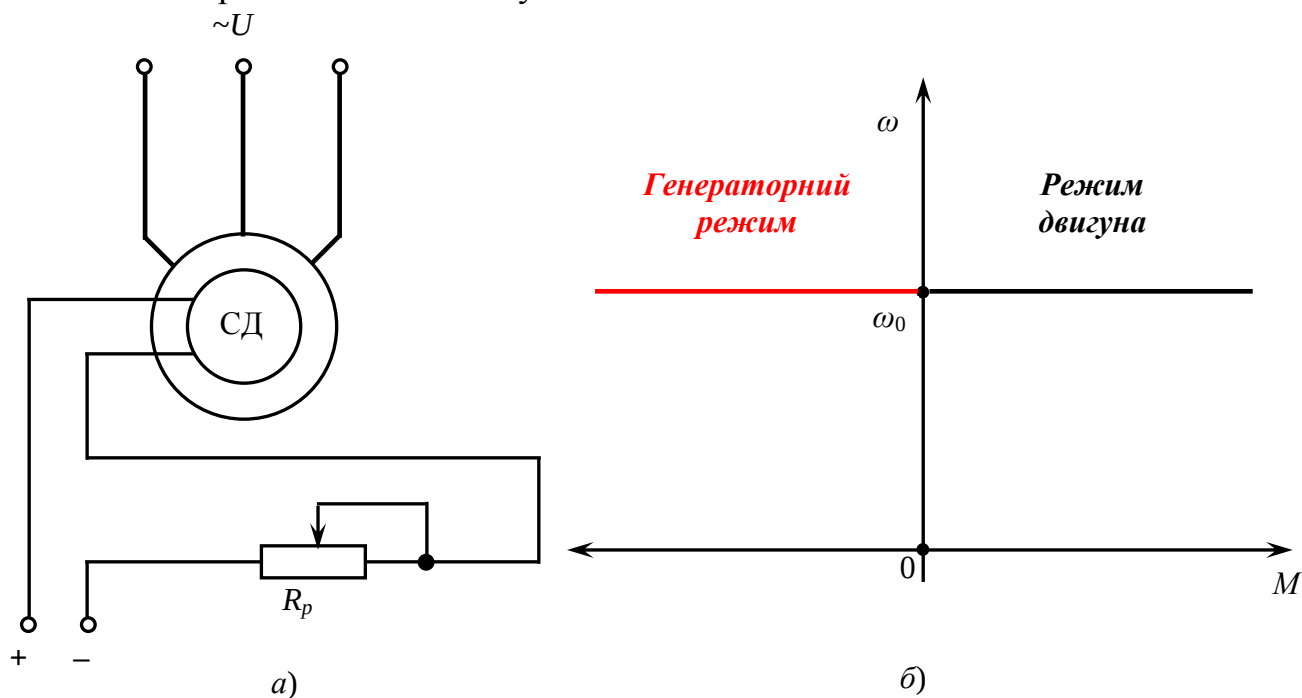


Рисунок 12.1 – Схема включення (а) і механічна характеристика (б) синхронного двигуна

Кутова швидкість синхронного двигуна (рис. 12.1, б) при роботі в сталому режимі із зростанням навантаження на валу до певного значення, не перевищуючого максимального моменту M_{max} , залишається строго постійною і рівна синхронній кутовій швидкості:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (12.1)$$

Тому механічна характеристика його має вид прямої лінії, паралельної осі абсцис. Якщо момент навантаження перевищує M_{max} , то двигун може випасти з синхронізму і показана на рисунку 11.1, б залежність ω від M порушиться.

2. ПУСКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Сучасні синхронні двигуни мають в роторі, окрім нормальної робочої обмотки, яка живиться постійним струмом, ще і спеціальну пускову короткозамкнуту обмотку. За допомогою цієї обмотки двигун пускається в хід як асинхронний, і тому в пускових режимах він володіє асинхронною характеристикою. На рис. 12.2 представлено дві пускові характеристики синхронного двигуна, одна з них 1 відповідає пуску із зниженим початковим пусковим моментом M_{n1} і значним «вхідним моментом» M_{e1} , під яким розуміється момент, що розвивається при швидкості, рівній $0,95 \omega_0$. При цій швидкості можливо входження двигуна в синхронізм після включення постійного струму в обмотку збудження.

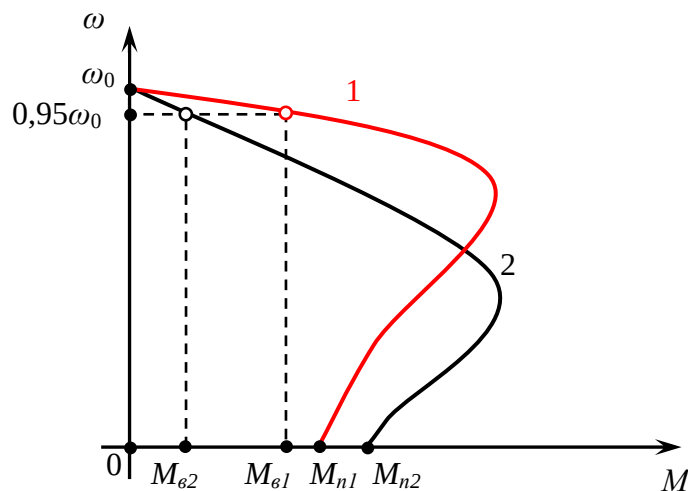


Рисунок 12.2 – Пускові характеристики синхронного двигуна

Якщо пускова клітка має збільшений активний опір, то початковий пусковий момент M_{n2} буде більше, ніж у попередньому випадку, а вхідний момент M_{e2} зменшиться (крива 2 на рис. 12.2). Вибір однієї з двох вказаних пускових характеристик залежить від моментів опору, яким володіють виробничі механізми.

3. КУТОВА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ДВИГУНА. РЕЖИМИ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

При пульсації навантаження на валу двигуна в сталому режимі значення миттєвої швидкості коливається біля середнього значення. Ці коливання відбуваються за рахунок зміни кута між напругою і ЕРС синхронної машини. Коливання швидкості мають практичне значення при роботі синхронного двигуна на пульсуюче навантаження, наприклад на поршневий компресор. Для вирішення питання про стійку роботу двигуна в таких випадках необхідно знати залежність моменту M від кута θ між напругою і ЕРС в градусах. Цьому куту θ відповідає просторовий кут зсуву між віссю результуючого поля машини і віссю полюсів (просторовий кут в p раз менше кута θ). Залежність моменту синхронної машини від кута θ носить назву *кутової характеристики*.

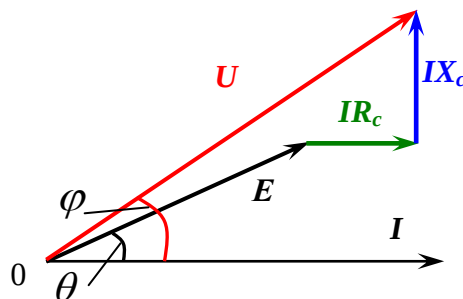


Рисунок 12.3 – Спрощена векторна діаграма синхронного двигуна

Для знаходження кутової характеристики звернемося до спрощеної векторної діаграми неявнополісної машини, представленій на рис. 12.3. Якщо нехтувати втратами в активному опорі статора, вважаючи $R_c = 0$ (рис. 12.4), то потужність, що підводиться до синхронного двигуна може бути прийнята рівній електромагнітній потужності:

$$P = 3IU \cdot \cos \varphi, \text{ Вт} \quad (12.1)$$

де IU – фазні струм і напруга статора.

З векторної діаграми (рис. 12.4) виходить, що

$$U \cdot \cos \varphi = E \cos(\varphi - \theta). \quad (12.2)$$

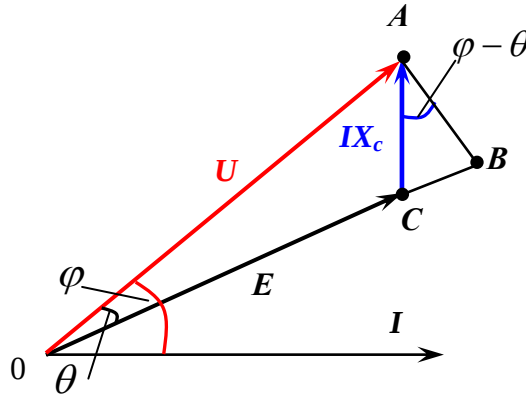


Рисунок 12.4 – Спрощена векторна діаграма синхронного двигуна, якщо нехтувати втратами в активному опорі статора

З розгляду допоміжного трикутника ABC видно, що

$$\cos(\varphi - \theta) = \frac{AB}{AC} = \frac{U \sin \theta}{IX_c},$$

отже

$$U \cdot \cos \varphi = EU \frac{\sin \theta}{IX_c}. \quad (12.3)$$

Тепер підставивши отриманий вираз в рівність (12.1) і замінивши кут φ кутом θ , отримаємо рівняння електромагнітної потужності:

$$P = 3EI_\kappa \sin \theta, \text{ Вт} \quad (12.4)$$

де I_κ – струм короткого замикання:

$$I_\kappa = \frac{U}{X_c}. \quad (12.5)$$

Звідси електромагнітний момент:

$$M = \frac{P}{\omega_0} = \frac{3}{\omega_0} EI_{\kappa} \sin \theta. \quad (12.6)$$

У разі явнополюсної машини з'являється ще додатковий реактивний момент. Проте для практичних розрахунків їм можна нехтувати і користуватися формулою (12.6).

При $\theta = 90^\circ$ момент має максимальне значення:

$$M_{\text{макс}} = \frac{3}{\omega_0} EI_{\kappa}. \quad (12.7)$$

Тому рівняння кутової характеристики приймає наступний вигляд:

$$M = M_{\text{макс}} \sin \theta. \quad (11.8)$$

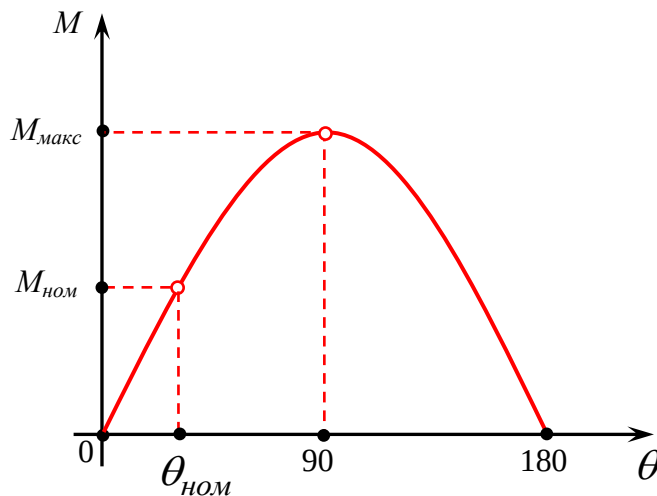


Рисунок. 12.5 – Кутова характеристика синхронного двигуна

Із збільшенням навантаження кут θ зростає. З (12.8) видно, що спочатку із збільшенням кута θ росте момент, що розвивається двигуном (рис. 12.5), що задовольняє вимозі стійкої роботи двигуна. В правій частині графіка при $\theta > 90^\circ$ умова стійкої роботи двигуна порушується, оскільки при збільшенні навантаження кут θ продовжує зростати, а момент, що розвивається двигуном, зменшується, унаслідок чого двигун випадає з синхронізму. Ліва частина характеристики є робочою частиною, а права, де кут θ змінюється від 90° до 180° , є нестійкою частиною характеристики.

Номінальному моменту двигуна $M_{ном}$ практично відповідає кут $\theta = 30^\circ$. При цьому кратність максимального моменту до номінального складає:

$$\lambda = \frac{M_{макс}}{M_{ном}} = 2 \div 2,5.$$

Проте в спеціальних випадках приймають синхронні машини і з більшою кратністю максимального моменту, що доходить до 3,5 – 4.

Синхронний двигун може працювати і в режимі генератора з віддачею енергії в мережу при синхронній швидкості, коли момент навантаження на валу матиме негативне значення, чому відповідає ліва гілка характеристики на рис. 12.1 б.

Для мети гальмування такий режим практичного значення не має, оскільки при цьому не можна отримати зниження швидкості.

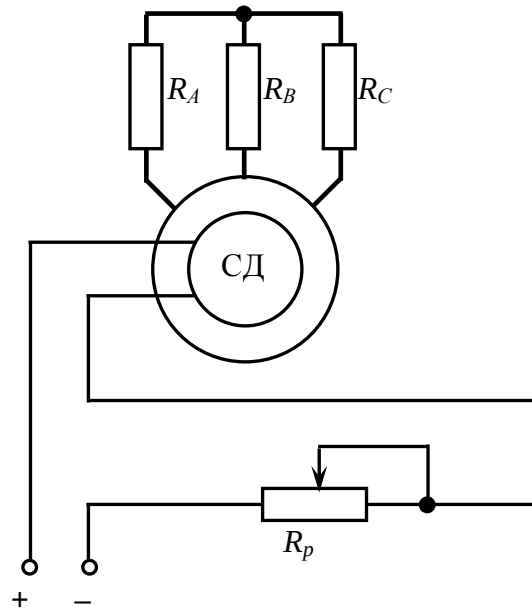


Рисунок. 12.6 – Принципова схема включення синхронного двигуна при динамічному гальмуванні

Звичайно застосовується динамічне гальмування СД, при якому обмотка статора відключена від мережі і замикається через опір (рис. 12.6). Механічні характеристики в цьому випадку подібні характеристикам асинхронного двигуна при динамічному гальмуванні (рис. 12.7). Інтенсивність гальмування залежить від величини опору кола статора і від величини потоку, створюваного струмом роторної обмотки. Час гальмування при живленні кіл збудження від

власного збудника, що знаходиться на валу синхронного двигуна, більше, ніж при живленні від незалежного джерела постійного струму. Пояснюється це тим, що при зниженні швидкості обертання збудника зменшується його ЕРС, отже, зменшується струм збудження двигуна і гальмівний момент.

Гальмування СД противовмиканням практично не застосовується, оскільки воно супроводиться великими поштовхами струму і веде до ускладнення апаратів управління зважаючи на необхідність відключення двигуна при підході до нульової швидкості.

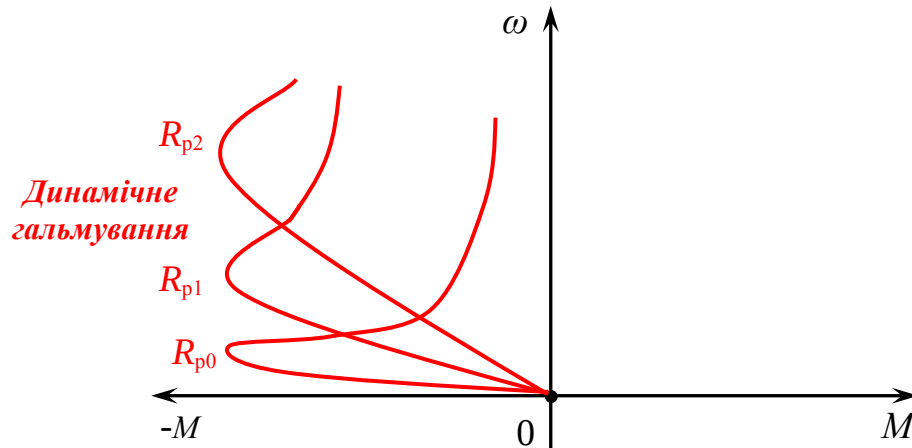


Рисунок 12.7 – Механічні характеристики синхронного двигуна в режимі динамічного гальмування

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ № 2

1. Дайте визначення механічній характеристиці виробничого механізму. Чим механічна характеристика виробничого механізму відрізняється від механічній характеристики ЕП?
2. Напишіть і поясніть формулу для механічної характеристики виробничого механізму.
3. Дайте класифікацію механічних характеристик виробничих механізмів?
4. Що розуміється під статичною стійкістю ЕП?
5. Чим визначатиметься статична стійкість ЕП?
6. Що таке динамічна стійкість ЕП?
7. Дайте визначення жорсткості механічної характеристики.
8. Що представляє собою електромеханічна характеристика двигуна?
9. Наведіть і поясніть схему включення двигуна постійного струму незалежного збудження.
10. Дайте визначення швидкості ідеального холостого ходу, як вона розраховується?
11. Поясніть вплив опору якірного кола на швидкість двигуна електропривода?
12. Як визначається внутрішній опір якоря двигуна постійного струму незалежного збудження?
13. Що таке режимом короткого замикання двигуна називається такий режим?
14. Яким чином проходить побудова механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження?
15. Що розуміється під номінальним опором двигуна постійного струму?
16. Поясніть схему включення двигуна постійного струму незалежного збудження при пуску.
17. Як проходить побудова механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях?
18. Які гальмівні режими роботи має двигун постійного струму незалежного збудження, поясніть на прикладі механічних характеристик.
19. Що представляє собою гальмування з віддачею енергії в мережу у двигуна постійного струму незалежного збудження?
20. Поясніть режим динамічного гальмування двигуна постійного струму незалежного збудження.
21. Яким чином здійснюється гальмування протитовмиканням двигуна постійного струму незалежного збудження?
22. Як проходить побудова механічних характеристик двигуна послідовного збудження?
23. Поясніть графічну побудову ступенів пускового резистора двигунів постійного струму послідовного збудження

24. Поясніть побудову механічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження в гальмівних режимах
25. Якими особливостями володіють механічні характеристики двигуна постійного струму змішаного збудження?
26. Чому в двигуні послідовного збудження не використовується режим генераторного гальмування?
27. Залежно від виду механічної характеристики, на скільки груп розділяють електродвигуни? Поясніть їх.
28. Наведіть і поясніть рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна.
29. що представляють собою механічні характеристики асинхронного двигуна?
30. Дайте визначення критичному ковзанню та критичному моменту асинхронного двигуна.
31. Динамічне гальмування асинхронного двигуна. Наведіть схему включення та принципи його виконання.
32. Поясніть векторну діаграму струмів для АД в режимі динамічного гальмування.
33. Які ви знаєте схеми включення обмоток статора при динамічному гальмуванні асинхронного двигуна?
34. Поясніть схему включення і механічна характеристика синхронного двигуна.
35. Якими пусковими характеристиками володіє синхронний двигун?
36. Що таке кутова характеристика синхронного двигуна?
37. Які режими роботи є у синхронного двигуна?
38. Наведіть і поясніть спрощену векторну діаграму синхронного двигуна.
39. Наведіть і поясніть спрощену векторну діаграму синхронного двигуна, якщо нехтувати втратами в активному опорі статора.
40. Що розуміється під електромагнітною потужністю, як вона розраховується?

Лекція № 13

ТЕМА № 3. Регулювання швидкості обертання електроприводів

План

1. Призначення регулювання кутової швидкості електроприводів.
2. Основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів.

1. ПРИЗНАЧЕННЯ РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

В сучасній промисловості використовується велика кількість виробничих механізмів, що працюють з різною, змінюється швидкістю. До цієї численної групи відносяться металообробні верстати, прокатні металургійні стани, підйомні крани і транспортні пристрої, а також різні механізми паперової, вугільної, текстильної, автомобільної і інших галузей промисловості. Так, в металорізучих верстатах швидкість електроприводу повинна регулюватися залежно від роду оброблюваного металу, якості різця, розмірів оброблюваних виробів і інших чинників. В прокатних станах для кожного профілю прокочуваного металу також є свої найсприятливіші швидкості, що визначають продуктивність стану і якість продукції. Зниження швидкості при плющенні веде до зменшення продуктивності і збільшенню витрати енергії унаслідок охолодження металу, а надмірне збільшення швидкості погіршує якість продукції і навіть приводить до появи браку, оскільки при надмірних швидкостях метал не встигає заповнити кути калібрів прокатних валів.

В ліфтах, підйомних і транспортних механізмах швидкість необхідно знижувати у міру підходу до пункту зупинки, щоб забезпечити плавне уповільнення і точну зупинку в потрібному місці. Швидкість, при якій повинен працювати вантаж в котельній, визначається якістю палива, його вогкістю, зольністю, умовами процесу горіння і необхідною продуктивністю казана. У всіх цих механізмах, як і в багатьох інших, для досягнення високої продуктивності і необхідної якості роботи необхідно здійснювати регулювання швидкості.

Регулюванням швидкості називається примусова зміна швидкості електроприводу залежно від вимог технологічного процесу. Поняття регулювання швидкості не слід змішувати з природною зміною швидкості, що виникає в електроприводах через зміну навантаження на валу працюючої машини. Регулювання швидкості здійснюється додатковою дією на двигун або систему передач до виробничого механізму. Ця дія може бути проведена людиною або спеціальним автоматичним пристроєм.

Регулювання швидкості обертання виробничого механізму може бути проведено механічним шляхом за допомогою східчастих шківів, набору шестерень, фрикційних регульованих передач і інших механічних пристроїв.

В історичному розвитку привода механічні способи регулювання були першим кроком при переході від нерегульованих до регульованих. Проте в даний час все більше застосування знаходить електричне регулювання, яке має ряд переваг відносно технічних і економічних показників.

Прикладом може служити перехід до регульованих приводів димососів в котельних установках електричних станцій. Регулювання продуктивності димососів на сучасних теплових електростанціях здійснюється в більшості випадків шляхом зміни положення направляючих апаратів при постійній швидкості обертання двигуна. Цей спосіб є неекономічним і веде до значних втрат енергії унаслідок збільшення опору в трубопроводі. Застосуванням раціональних способів регулювання димососів шляхом зміни швидкості обертання можна заощадити багато сотень тисяч кіловатів-година електричної енергії.

Проблема регулювання швидкості має велике значення, особливо в сучасній автомобільній техніці. Рішення цієї проблеми повинне проводитися на основі досягнень новітньої техніки і найекономічнішими і надійними способами.

2. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Основними показниками, що характеризують різні способи регулювання електроприводів, є:

- 1) діапазон або межі регулювання;
- 2) плавність;
- 3) економічність;
- 4) стабільність роботи на заданій швидкості;
- 5) напрям, в якому регулюється швидкість (зменшення або збільшення її щодо основної швидкості);
- 6) допустиме навантаження при різних швидкостях.

1. *Діапазон або межі регулювання швидкості* визначається відношенням максимальної ω_{max} швидкості обертання до мінімальної ω_{min} , які можуть бути отримані при роботі приводу:

$$D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}. \quad (13.1)$$

При визначенні діапазону регулювання швидкості необхідно зважати на вимоги відносно допустимого перепаду швидкості обертання електроприводу, у зв'язку з можливими на практиці відхиленнями моменту навантаження.

Звичайно D виражається в числах (наприклад, 2:1, 4:1, 10:1; 20:1 і т.д.). Сучасні системи регулювання електроприводів із зворотними зв'язками дозволяють істотно розширити діапазон регулювання швидкості обертання. Різні виробничі машини вимагають різних меж регулювання. Наприклад, головні механізми металорізучих верстатів залежно від їх призначення працюють з межами регулювання $D = (4:1)$ ч $(100:1)$ і вище; для механізмів подач універсальних верстатів потрібен діапазон до 1 000:1 і вище. При виготовленні паперу для газет папероробна машина працює з межами регулювання $D = 3:1$; а при виготовленні вищих сортів паперу $D = 20:1$. Деякі прокатні металургійні стани мають $D = (20:1)$ ч $(25:1)$.

2. *Плавність регулювання* характеризується числом стійких швидкостей, одержуваних в даному діапазоні регулювання. Коефіцієнт плавності $k_{пл}$ може бути визначений відношенням двох сусідніх значень швидкостей при регулюванні:

$$k_{пл} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}} \quad (12.2)$$

де ω_i і ω_{i-1} – швидкості відповідно на i -й і $(i - 1)$ -й ступенях регулювання.

Плавність тим вище, чим менше стрибок швидкості при переході від даної швидкості до найближчої можливої. Чим більше швидкостей в заданих межах регулювання, тим вище плавність регулювання.

Плавний перехід з одного ступеня регулювання на інший у багатьох випадках визначає якість продукції. В практиці електроприводу якнайменшою плавністю регулювання володіють двохшвидкісні короткозамкнуті асинхронні двигуни. Значна плавність регулювання швидкості досягається, наприклад, в двигуні постійного струму при регулюванні зміною потоку або що підводиться до якоря двигуна напруги. Тут навіть при вельми широких межах вдається здійснити плавне регулювання за рахунок значного числа ступенів регульовального реостата, яке може досягати декількох десятків і більше.

3. *Економічність регульованого приводу* характеризується витратами на його споруду і експлуатацію.

Необхідно відзначити, що економічно вигідним виявляється такий регульований електропривод, який забезпечує велику продуктивність приводиться ним в дію механізму при високій якості технологічного процесу і порівняно швидко окупається.

При оцінці економічності регульованого електроприводу слід брати до уваги надійність його в експлуатації, а також враховувати дефіцитність матеріалів і устаткування, затрачуваного на споруду того або іншого приводу.

При оцінці економічності істотне значення має величина втрат енергії в процесі регулювання.

Втрати потужності ΔP , які виникають при регулюванні швидкості, визначають ККД приводу:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 - \Delta P} \quad (13.3)$$

де P_2 – потужність на валу двигуна.

При роботі двигуна в рівні проміжки часу на різних швидкостях обертання слід підраховувати так званий середньовзв'язаний ККД за регульовальний цикл, що складається з m ступенів, по виразу:

$$\eta_p = \frac{\sum_1^m P_2 t}{\sum_1^m (P_2 - \Delta P) t} . \quad (13.4)$$

З цього співвідношення виходить, що за відомих умов роботи електроприводу ККД за цикл може виявитися значно вище ККД якого-небудь одного ступеня швидкості.

Втрати енергії при регулюванні швидкості різні для різних способів регулювання. Вони порівняно великі в системах, де регулювання ведеться в головних колах машин, і значно нижче при регулюванні в колах збудження. Останнє стає зрозумілим, якщо пригадати, що потужність кола збудження, наприклад машин постійного струму, складає лише 1 – 5% потужності головних кіл.

4. *Стабільність роботи на заданій швидкості* характеризується зміною швидкості обертання при заданому відхиленні моменту навантаження і залежить від жорсткості механічної характеристики; вона тим вище, чим більше жорсткість характеристики.

Якщо при регулюванні швидкості жорсткість характеристики змінюється, то і величина коливань швидкості біля заданої теж змінюватиметься. На рис. 13.1 приведено дві характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження при регулюванні швидкості обертання опором в колі якоря.

Якщо при цьому момент опору M_c залишається незмінним, то двигун, що працював раніше з швидкістю ω_1 буде після введення додаткового опору в коло якоря працювати з швидкістю ω_2 . Проте за наявності коливань моменту навантаження в деяких межах $\pm \Delta M$ швидкість обертання двигуна не залишається постійною, вона коливається щодо середніх значень ω_1 або ω_2 . Коливання швидкості $\Delta\omega$, викликані коливаннями навантаження, будуть тим більше, чим менше жорсткість характеристики. Ця обставина у багатьох випадках обмежує межі регулювання швидкості.

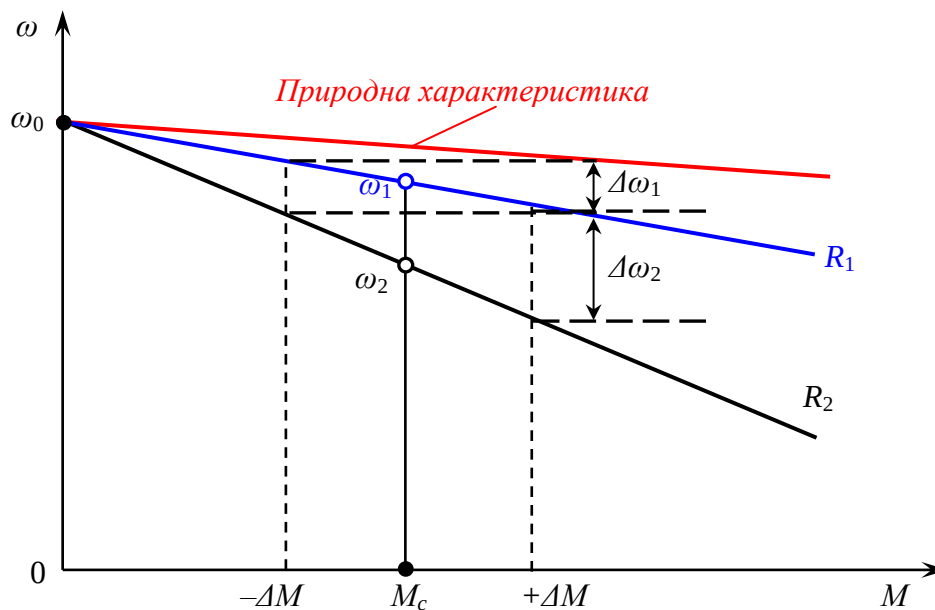


Рисунок 13.1 – Ілюстрація зміни швидкості для механічних характеристик різної жорсткості

5. *Напря́м, в якому регулюється швидкість*, тобто зменшення або збільшення її по відношенню до основної швидкості, залежить від способів регулювання.

Основна швидкість обертання двигуна відповідає номінальним значенням напруги і магнітного потоку. Ця швидкість виходить у тому випадку, коли в колах двигуна немає ніяких зовнішніх опорів, тобто точка $\omega_{ном}$ знаходиться на природній механічній характеристиці.

При регулюванні за допомогою опору в колі якоря двигуна постійного струму або в колі ротора асинхронного двигуна швидкість обертання в руховому режимі при даному навантаженні у міру збільшення опору зменшується. Це

означає, що регулювання зміною опору може бути здійснено тільки вниз по відношенню до основної швидкості.

Навпаки, регулювання зменшенням магнітного потоку веде в межах нормальних навантажень до збільшення швидкості, тобто в цьому випадку здійснюється регулювання вгору від основної швидкості.

6. *Допустиме навантаження двигуна* при регулюванні швидкості залежить і від способу регулювання.

Зміна моменту навантаження залежно від швидкості у різних виробничих механізмів різна. Так, наприклад, багато механізмів вимагають регулювання при постійному моменті. До них відносяться: підйомні крани, лебідки, деякі прокатні стани і т.п. З другого боку, існують механізми, у яких регулювання швидкості проводиться з постійною потужністю. Як приклади подібного механізму можна привести токарний верстат, у якого в процесі обробки даної деталі бажано підтримка постійності лінійної швидкості (або швидкості різання) і зусилля різання. За цих умов помноження швидкості різання на зусилля дасть постійність потужності. Підтримка постійності швидкості різання досягається плавним регулюванням швидкості обертання електроприводу.

Принципово шляхом вибору відповідної потужності двигуна можна задовольнити будь-якій зміні моменту навантаження або потужності при регулюванні швидкості. Проте у такому разі регулювання швидкості двигуна може виявитися неекономічним, оскільки двигун на різних швидкостях буде використаний неоднаково і при роботі на деяких з них він буде недовантажений.

Недовантаження двигуна веде до погіршення експлуатаційних показників приводу, оскільки при цьому зменшується ККД двигуна, а при змінному струмі, крім того, зменшується і коефіцієнт потужності. Бажано тому застосовувати такий спосіб регулювання, при якому двигун би був по можливості повністю завантажений при всіх швидкостях.

Допустиме навантаження двигуна обмежується ступенем його нагріву. Ступінь нагріву у свою чергу залежить від втрат енергії в двигуні, а останні визначаються головним чином величиною струму, споживаного двигуном.

Таким чином, ми приходимо до висновку, що умовою повного використання двигуна при роботі на різних регульовальних характеристиках є постійність величини струму навантаження. Якщо при роботі на всіх характеристиках величина струму буде рівна величині номінального струму двигуна, то це і означатиме, що двигун завантажений повністю на всіх швидкостях. При цьому передбачається, що умови охолодження двигуна залишаються незмінними як при великих, так і при малих швидкостях обертання.

Допустиме навантаження при роботі на регульовальних характеристиках визначається величиною номінального струму і для різних способів регулювання буде різною.

Розглянемо як приклад двигун постійного струму незалежного збудження. Він може мати дві зони регулювання, як це показано на рис. 13.2. Перша зона відповідає регулюванню з постійним моментом. Дійсно, якщо регулювання здійснюється зміною опору або напруги в головному колі при незмінному магнітному потоці двигуна, то при номінальному струмі якоря величина моменту буде постійною, оскільки:

$$M = k\Phi_{ном} I_{ном} = const. \quad (13.5)$$

Потужність на валу двигуна в цій зоні змінюється по лінійному закону, оскільки вона пропорційна швидкості:

$$P_2 = M\omega. \quad (12.6)$$

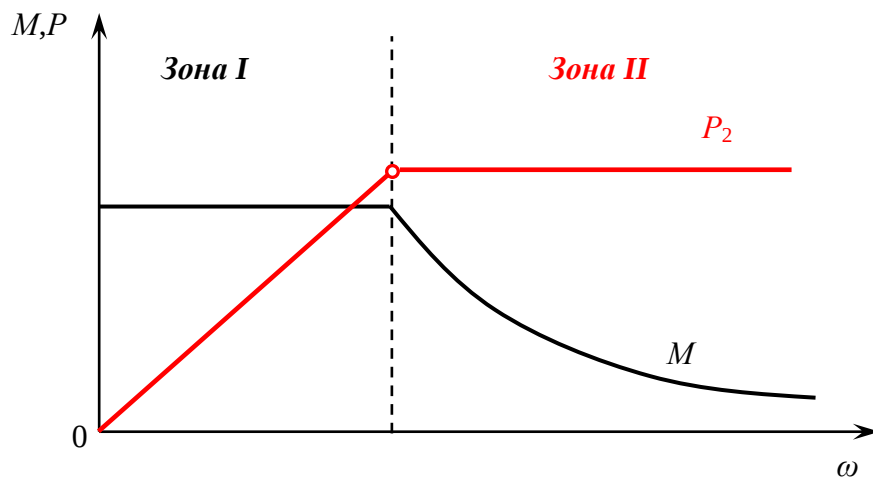


Рисунок 13.2 – Характеристики двох зон регулювання незалежного збудження

Друга зона відповідає регулюванню з постійною потужністю, коли воно проводиться зміною магнітного потоку двигуна.

В цьому випадку при незмінному струмі, рівному номінальному, магнітний потік із збільшенням швидкості необхідно регулювати за законом гіперболи, що виходить з рівняння $\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}$. Якщо вирішити це рівняння щодо магнітного потоку, то отримаємо:

$$\Phi = \frac{U_{ном} - I_{ном} R}{k\omega} = \frac{A}{\omega}. \quad (13.7)$$

Таким чином, стає ясною залежність моменту від швидкості в другій зоні регулювання, а саме:

$$M = k\Phi I_{ном} = \frac{A'}{\omega}. \quad (13.8)$$

Звідси витікає, що потужність в цій зоні регулювання залишається постійною, оскільки:

$$P_2 = M\omega = \frac{A'\omega}{\omega} = const. \quad (13.9)$$

Допустиме навантаження при регулюванні швидкості двигунів інших типів визначається аналогічними методами.

Слід мати на увазі, що для самовентильованих двигунів, які забезпечені власним вентилятором для охолодження, зниженню швидкості обертання повинне відповідати зменшення допустимих втрат в двигуні. На малих швидкостях ці двигуни повинні працювати при струмах, менших номінального, а отже, і допустимий момент зменшується у міру зменшення швидкості.

В приводах з моментом вентилятора навантаження двигун не може бути повністю завантажений при низьких швидкостях. Особливістю регулювання таких приводів є збільшення моменту із зростанням швидкості. Тому тут доводиться вибирати потужність двигуна по навантаженню при найбільшій швидкості. При всіх інших менших швидкостях двигун буде недовантажений. Особливо великих габаритів необхідний двигун при навантаженні вентилятора, у разі регулювання струмом збудження. Це витікає з того, що такий двигун повинен буде розвивати найбільший момент при якнайменшому магнітному потоці.

Лекція № 14

ТЕМА № 3. Регулювання швидкості обертання електроприводів

Регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму незалежного збудження

План

1. Регулювання зміною струму збудження двигуна.
2. Регулювання зміною опору в колі якоря.

1. РЕГУЛЮВАННЯ ЗМІНОЮ СТРУМУ ЗБУДЖЕННЯ ДВИГУНА

З рівняння

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}. \quad (14.1)$$

витікає, що можливі три принципово різних способу регулювання швидкості обертання двигуна:

- а) регулювання зміною струму збудження двигуна;
- б) регулювання зміною опору в колі якоря;
- в) регулювання зміною напруги що підводиться до двигуна.

Регулювання швидкості обертання двигуна зміною струму збудження є одним з найпростіших і економічних способів і тому знаходить широке застосування в сучасній практиці електропривода.

Регулювання швидкості в цьому випадку здійснюється вгору від основної, причому допустимий момент двигуна змінюється за законом гіперболи, а допустима потужність залишається незмінною.

Швидкісним характеристикам $\omega = f(I)$ при зміні струму збудження відповідають різні значення швидкості ідеального холостого ходу, визначувані по формулі:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}. \quad (14.2)$$

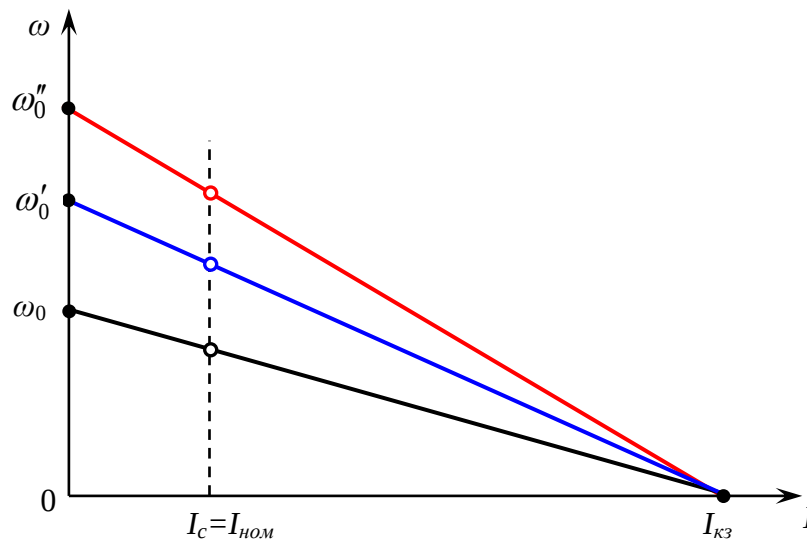


Рисунок 14.1 – Швидкісні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні швидкості струмом збудження

На рис. 14.1 по осі ординат відкладено значення швидкості ідеального холостого ходу ω_0 для природної характеристики, коли потік $\Phi = \Phi_{ном}$. Значення швидкостей ідеального холостого ходу при ослабленому потоці ω'_0 і ω''_0 лежать, очевидно, вище ω_0 .

Всі швидкісні характеристики перетинаються з віссю абсцис в одній крапці. Останнє виходить з того, що при $\omega = 0$ рівняння для будь-якої швидкісної характеристики має вигляд:

$$0 = \frac{U - IR_{ном}}{k\Phi}, \quad (14.3)$$

звідки визначається струм в якорі двигуна

$$I = \frac{U}{R_{ном}} = I_{кз}. \quad (14.4)$$

Отже, при різних струмах збудження і при швидкості обертання двигуна, рівній нулю, струм в якорному колі рівний струму короткого замикання двигуна. Цим значенням струму і визначається загальна точка перетину швидкісних характеристик.

Механічні характеристики, показані на рис. 14.2, мають ті ж значення швидкостей ідеального холостого ходу, що і для швидкісних характеристик. Це

витає з рівняння $\omega_0 = \frac{U}{U - I_{ном} R_{я}} \omega_{ном}$. Проте ці характеристики не перетинаються в одній крапці на осі абсцис, оскільки у міру зменшення потоку зменшується і момент короткого замикання, визначуваний по формулі:

$$M_{кз} = k\Phi I_{кз}. \quad (14.5)$$

Регулювання є економічним при постійній потужності; повному використуванню двигуна відповідають точки, що знаходяться на лінії номінального струму $I_c = I_{ном}$ (рис. 14.1); цьому відповідають точки, що лежать на гіперболічній кривій моменту опору M_c , як це показано пунктиром на рис. 14.2.

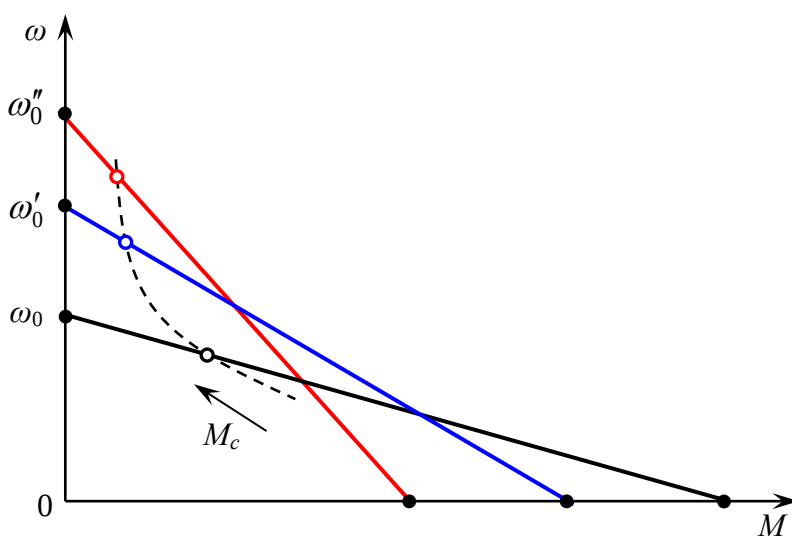


Рисунок 14.2. Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні швидкості струмом збудження

При роботі на швидкостях, відповідних крапкам, що лежать ліворуч вказаній кривій моменту M_c , двигун буде недовантажений: навпаки, робота на швидкостях правіше за цю криву приведе до перевантаження двигуна.

Цікаво відзначити, що при малих навантаженнях швидкість з ослабленням поля росте, а при великих зменшується.

При постійному моменті опору ($M_c = \text{const}$) і тривалому навантаженні двигун потрібно вибирати так, щоб при найбільшій швидкості струм в колі якоря не перевершував номінального. При понижених швидкостях в цьому випадку доводиться миритися з недовантаженням двигуна, оскільки струм в якорі стає менше номінального унаслідок зростання магнітного потоку.

Звичайно регульовані двигуни мають межі регулювання від 2:1 до 5:1. За кордоном ряд фірм випускає двигуни, регульовані зміною струму збудження в більш широкому діапазоні до (6 – 8):1.

Межі регулювання обмежуються різними чинниками. Головним з них є погіршення умов комутації із зростанням швидкості, оскільки реактивна ЕРС, що викликає іскріння на колекторі, пропорційна струму і швидкості, тобто $e_p = cI\omega$. Крім того, при великих швидкостях вимагається підвищувати механічну міцність якоря. Нижня межа швидкості обмежується ступенем насичення машини.

2. РЕГУЛЮВАННЯ ЗМІНОЮ ОПОРУ В КОЛІ ЯКОРЯ

Регулювання швидкості обертання зміною опору в колі якоря не вимагає особливих пояснень. В Лекції № 7 рис. 7.7 приведено побудову реостатних механічних характеристик стосовно пуску двигуна. Подібний вигляд мають характеристики і при регулюванні швидкості опором в колі якоря. На відміну від пускового реостата регульовальний реостат повинен бути розрахований на тривалу роботу з повним струмом навантаження, оскільки його опір виявляється включеним не тільки короткочасно під час пуску, але і під час роботи двигуна на заданій швидкості.

При цьому способі регулювання змінюється жорсткість характеристики, а з нею і стабільність роботи на заданій швидкості; швидкість регулюється вниз від основної, причому повне використання двигуна по струму досягається при регулюванні з постійним моментом.

Діапазон регулювання швидкості непостійний і залежить від навантаження.

При регулюванні швидкості обертання введенням опору в коло якоря двигуна постійного струму або в коло ротора асинхронного двигуна втрати потужності в цих колах змінюються пропорційно перепаду швидкості або ковзання. Це видно з наступних енергетичних співвідношень.

Для двигуна постійного струму споживана потужність в колі якоря визначається рівністю:

$$P_1 = UI = EI + I^2 R. \quad (14.6)$$

Останнє рівняння може бути переписано так:

$$k\Phi\omega_0 I = k\Phi\omega I + \Delta P. \quad (14.7)$$

Звідси

$$\Delta P = k\Phi\omega_0 I \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

або

$$\Delta P = P_1 \delta, \quad (14.8)$$

де

$$\delta = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (14.9)$$

Таким чином, при регулюванні швидкості обертання зміною опору в колі якоря втрати потужності в цьому колі пропорційні споживаній потужності і перепаду швидкості, вираженому у відносних одиницях. Так, якщо момент навантаження постійний (отже, постійна споживана потужність) і швидкість двигуна зменшується удвічі, то приблизно половина потужності, яка споживається з мережі, розсіватиметься у вигляді тепла, що виділяється в реостаті.

Деякі особливості відносно енергетичних показників має регулювання швидкості обертання приводів з моментом вентилятора.

Момент, що розвивається двигуном при навантаженні вентилятора, пропорційний квадрату швидкості, тобто $M = c\omega^2$ (втрати у вентиляторі не враховуються).

Споживана двигуном потужність без урахування втрат в статорі:

$$P_1 = M\omega_0, \quad (14.10)$$

або

$$P_1 = P_{1ном} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 = P_{2ном} \frac{\omega_0}{\omega_{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (14.11)$$

де $P_{1ном}$ – потужність, споживана при номінальному навантаженні;

$P_{2ном}$ – номінальна потужність двигуна (потужність на валу);

ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу (у разі асинхронного двигуна синхронна кутова швидкість);

$\omega_{ном}$ – номінальна швидкість.

Потужність на валу двигуна:

$$P_2 = M\omega,$$

або

$$P_2 = P_{2ном} \frac{\omega_0}{\omega_{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2. \quad (14.12)$$

Втрати потужності в колі якоря двигуна (тут не враховуються втрати в сталі і механічні втрати):

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 = \frac{P_{2ном}}{\omega_{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 (\omega_0 - \omega). \quad (14.13)$$

Узявши першу похідну $\frac{d(\Delta P_2)}{d\omega}$ і прирівнявши її нулю, знаходимо швидкість $\omega = \frac{2}{3} \omega_0$, при якій втрати в колі якоря досягають максимуму:

$$\Delta P_{2max} = \frac{4}{27} P_{2ном} \left(\frac{\omega_0}{\omega_{ном}} \right)^3. \quad (14.14)$$

Аналіз формули (14.13) показує, що при $\omega = 0$ і $\omega = \omega_0$ втрати потужності рівні нулю, тоді як при незмінному моменті на валу і $\omega = 0$ вся споживана потужність ($P_1 = UI$) втрачається в колі якоря.

Коефіцієнт корисної дії привода при реостатному регулюванні орієнтовно може бути визначений по формулі:

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (14.15)$$

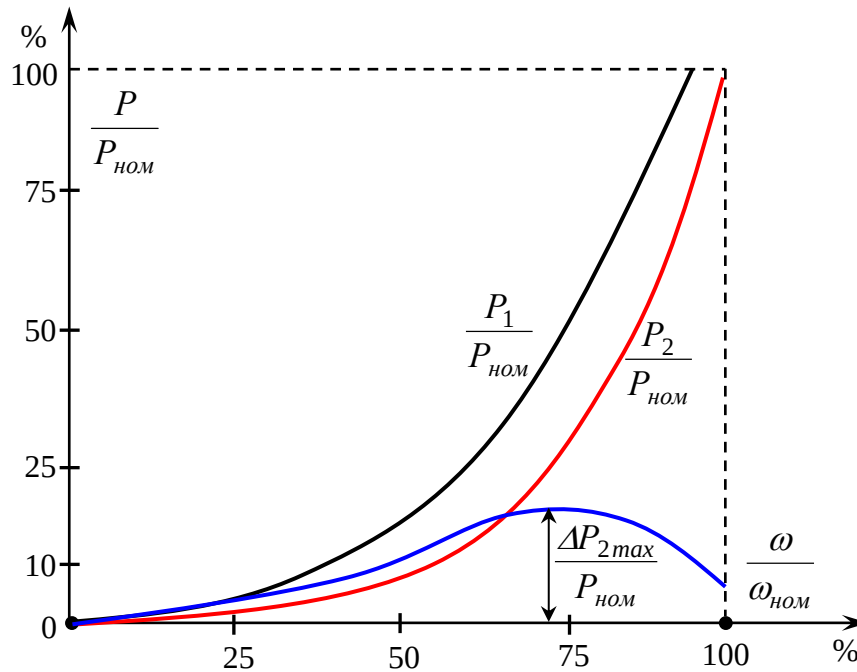


Рисунок 14.3 – Криві, які характеризують залежність $\frac{P_1}{P_{ном}}$; $\frac{P_2}{P_{ном}}$; $\frac{\Delta P_{2max}}{P_{ном}}$ від швидкості обертання у відносних одиницях

Виведені вище співвідношення показують, що регулювання швидкості обертання введенням опору в коло якоря для механізмів з моментом навантаження вентилятора пов'язано із значно меншими втратами потужності, ніж для механізмів з незмінним моментом навантаження.

Якщо, наприклад, відносний перепад швидкості при номінальному навантаженні складає $\omega_* = 0,05$, то втрати потужності, віднесені до номінальної потужності, і ККД привода характеризуються цифрами, приведеними в табл. 14.1

За даними табл. 14.1 на рис. 14.3 побудована залежність $P_1/P_{ном}$, $P_2/P_{ном}$ і $\Delta P_2/P_{ном}$ як функція відносного значення швидкості ω/ω_0 .

Не дивлячись на значно менші втрати потужності, які дає регулювання швидкості зміною опору при моменті вентилятора, проте, не можна, визнати цей спосіб достатньо економічним, особливо в тих випадках, коли вентилятори можуть працювати тривало при швидкостях, менших номінальній. Тому доводиться шукати більш економічні способи регулювання швидкості.

Таблиця 14.1 – Втрати потужності, віднесені до номінальної потужності, і ККД привода

Швидкість, % номінальна	Потужність вентилятора, % номінальної потужності двигуна	Споживана потужність двигуна, % номінальної потужності	Втрати в колі якоря, % но- мінальної по- тужності дви- гуна	Коефіцієнт корисної дії
100	100	105,2	5,2	0,95
90	72,9	85,3	12,4	0,855
80	51,2	67,4	16,2	0,76
70	34,3	51,6	17,3	0,665
60	21,6	37,9	16,3	0,57
50	12,5	26,3	13,8	0,475
40	6,4	16,8	10,4	0,38
30	2,7	9,5	6,8	,285
20	0,8	4,2	3,4	0,19
10	0,1	1,05	0,95	0,095
0	0	0	0	0

Лекція № 15

ТЕМА № 3. Регулювання швидкості обертання електроприводів

Регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження при шунтуванні якоря

План

1. Регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження при шунтуванні якоря, при незмінному шунтуючому опорі і різних величинах послідовного опору.
2. Регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження при шунтуванні якоря, при незмінному послідовному опорі і різних величинах шунтованого опору.

1. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПРИ ШУНТУВАННІ ЯКОРЯ, ПРИ НЕЗМІННОМУ ШУНТУЮЧОМУ ОПОРІ І РІЗНИХ ВЕЛИЧИНАХ ПОСЛІДОВНОГО ОПОРУ

Для отримання більш жорстких механічних характеристик при малих швидкостях застосовують іноді шунтування якоря опором, як це показано на схемі, зображеній на рис. 15.1. Подібна схема знаходить застосування для

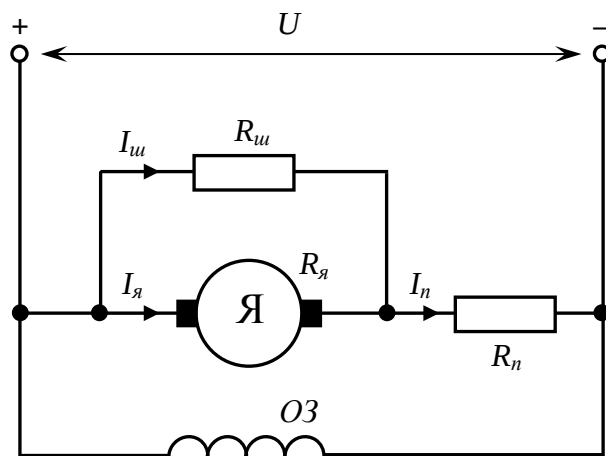


Рисунок 15.1 – Схема шунтування обмотки якоря двигуна незалежного збудження

установок малої потужності, що вимагають регулювання швидкості, а для більш могутніх двигунів – головним чином для зниження швидкості, яке передуює зу-

пинці електропривода. Попереднє зниження швидкості забезпечує більш точну зупинку приводу.

Рівняння механічної характеристики двигуна в схемі, представлений на рис. 15.1, може бути отримано на підставі наступних співвідношень:

$$U = E + I_{\text{я}}R_{\text{я}} + I_nR_n; \quad (15.1)$$

$$U = I_{\text{ш}}R_{\text{ш}} + I_nR_n; \quad (15.2)$$

$$I_n = I_{\text{я}} + I_{\text{ш}}. \quad (15.3)$$

Позначення величин, що входять в співвідношення (15.1) – (15.3), приведені на рис. 15.1. Визначаючи з (15.2):

$$I_{\text{ш}} = \frac{U - I_nR_n}{R_{\text{ш}}} \quad (15.4)$$

і підставляючи його значення в (15.3), одержуємо величину струму в послідовному опорі:

$$I_n = I_{\text{я}} + \frac{U - I_nR_n}{R_{\text{ш}}} = \frac{U + I_{\text{я}}R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_n}. \quad (15.5)$$

Після підстановки в рівність (15.1) значення струму I_n з (15.5) і рішення цього рівняння щодо E отримаємо:

$$E = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_n} - I_{\text{я}} \left(R_{\text{я}} + \frac{R_{\text{ш}}R_n}{R_{\text{ш}} + R_n} \right). \quad (15.6)$$

Позначимо через A відношення опорів:

$$\frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_n} = A.$$

Розділивши ліву і праву частини рівності (15.6) на коефіцієнт s і підставивши, крім того, величину A , отримаємо рівняння швидкісної характеристики двигуна при шунтуванні якоря:

$$\omega = A\omega_0 - \frac{1}{c}(R_{\text{я}} + AR_n). \quad (15.7)$$

Рівняння для механічної характеристики двигуна має вигляд:

$$\omega = A\omega_0 - \frac{M}{c^2}(R_{\text{я}} + AR_n). \quad (15.8)$$

З розгляду останнього рівняння видно, що механічні характеристики двигуна в цьому випадку лінійні.

Крім того, швидкість ідеального холостого ходу двигуна тут буде менше ніж при регулюванні швидкості за допомогою реостата в колі якоря. Дійсно, для $M = 0$ швидкість буде рівна $A\omega_0$, причому завжди

$$A = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_n} < 1.$$

Зниження величини швидкості ідеального холостого ходу пояснюється тим, що за відсутності струму в колі якоря прикладене до якоря напруга не буде рівна напрузі мережі U , як це має місце при реостатному регулюванні. В цьому випадку воно менше напруги мережі на величину падіння напруги в послідовному опорі, оскільки в ньому проходить струм і за відсутності струму в якорі.

На рис. 15.2 представлена механічна характеристика двигуна при шунтуванні якоря, проходяча через ω'_0 . Там же приведені природна і реостатна характеристики для звичайної схеми включення. Із зіставлення цих характеристик видні переваги даної схеми. Дійсно, отримання зниженої швидкості ω'_0 можливо і в звичайній схемі шляхом переходу від природної характеристики до відповідної реостатної. Проте з порівняння реостатної характеристики з характеристикою при шунтуванні якоря видно, що остання є значно більш жорсткою і тому забезпечує при можливих коливаннях моменту більш стабільне регулювання швидкості.

Жорсткість механічної характеристики і швидкість ідеального холостого ходу залежать від співвідношення величин послідовного і шунтуючого опорів. Якщо змінювати опори $R_{\text{ш}}$ і R_n , то можна отримати інший нахил характеристики.

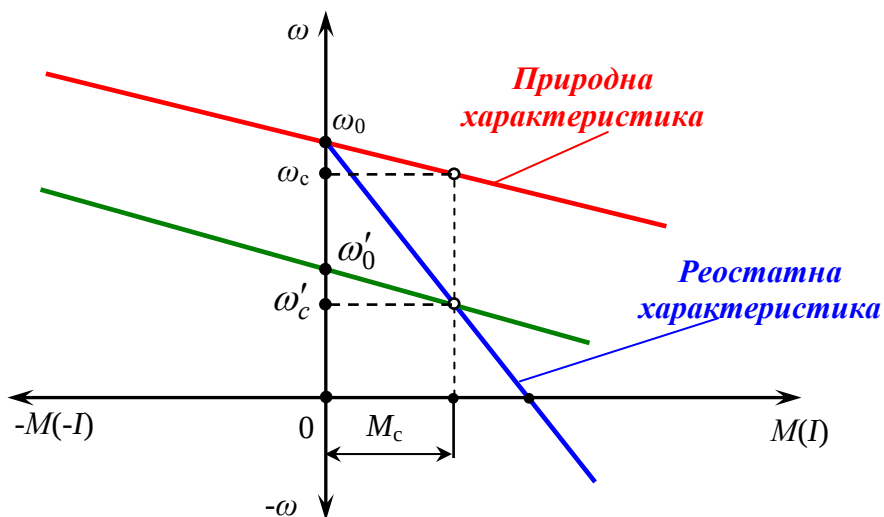


Рисунок 15.2 – Механічна характеристика двигуна незалежного збудження при шунтуванні обмотки якоря

При незмінному шунтуючому опорі R_{u1} або R_{u2} і різних величинах послідовного опору R_n виходять сімейство характеристик, що мають відповідно загальну крапку A і A' (рис. 15.3).

Крапка A перетини характеристик відповідає режиму, при якому величина послідовного опору не впливатиме на струм якоря, тобто коли через послідовний опір не проходить струм. Це можливо лише при обертанні якоря з швидкістю, більшої швидкості ідеального холостого ходу, а саме тоді, коли ЕРС якоря повністю врівноважує прикладена напруга мережі і внутрішнє падіння напруги в якорі, тобто коли:

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (15.9)$$

У такому разі двигун працює в режимі динамічного гальмування на зовнішній опір R_{u1} . Оскільки напруга на затисках якоря рівно U , струм в якорі:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{u1}}. \quad (15.10)$$

Підставивши (15.10) в (15.9) і замінивши E і U пропорційними їм величинами ω і ω_0 , отримаємо значення швидкості в крапці A :

$$\omega_A = \omega_0 \frac{R_{ш} + R_n}{R_{ш}}. \quad (15.11)$$

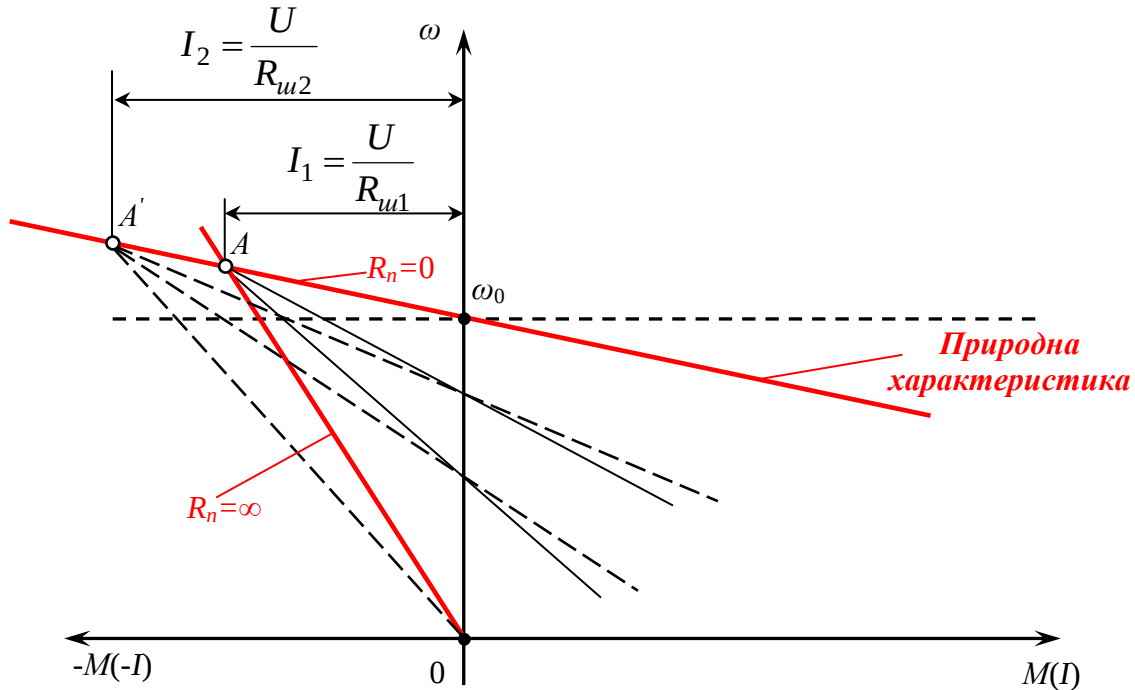


Рисунок 15.3 – Сімейство механічних характеристик при незмінному шунтуючому опорі і різних величинах послідовного опору

В граничних випадках при незмінному $R_{ш}$ і змінних опорах R_n виходять дві характеристики, показані на рис. 15.3 червоними лініями. Якщо $R_n = 0$, та напруга, що підводиться до якоря, не залежить від шунтуючого опору і залишається незмінним при зміні струму якоря. Тому значенню $R_n = 0$ відповідає природна характеристика двигуна.

Якщо $R_n = \infty$, то це означає, що двигун не одержує живлення від мережі і працює в режимі динамічного гальмування на зовнішній опір $R_{ш}$. Характеристика при цьому проходить через початок координат. Крутизна її залежить тільки від величини шунтуючого опору. З сказаного ясно, що вся решта характеристик для будь-яких кінцевих значень R_n при незмінному опорі $R_{ш}$ утворює сімейство характеристик, що лежать в проміжку між двома вказаними. При іншому значенні $R_{ш} = \text{const}$ і різних R_n виходить друге подібне сімейство характеристик, показане на рис. 15.3 пунктиром. При цьому всі характеристики також перетинатимуться в одній крапці A' , що лежить на природній характеристиці і відповідної меншому значенню $R_{ш} - R_{ш2}$.

2. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПРИ ШУНТУВАННІ ЯКОРЯ, ПРИ НЕЗМІННОМУ ПОСЛІДОВНОМУ ОПОРІ І РІЗНИХ ВЕЛИЧИНАХ ШУНТОВАНОГО ОПОРУ

Можна побудувати і інше сімейство характеристик (рис. 15.4), відповідних незмінній величині послідовного опору при різних шунтуючих опорах. Це сімейство характеристик матиме загальну крапку B_1 де шунтуючий опір не робитиме впливу на струм якоря. Така умова може бути здійснений лише при певній негативній швидкості, коли:

$$E = -I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (15.12)$$

В цьому випадку струм не проходить через шунтуюче опір при будь-якому значенні останнього, оскільки різниця потенціалів між щітками якоря рівна нулю. Двигун споживатиме струм:

$$I = \frac{U}{R_n}. \quad (15.13)$$

Швидкість в крапці B_1 можна визначити, підставивши значення струму I в (15.12) і замінивши E і U величинами ω і ω_0 , тобто:

$$\omega_{B1} = -\omega_0 \frac{R_{\text{я}}}{R_{n2}}. \quad (13.14)$$

В граничних випадках при незмінному R_{n2} і змінних опорах $R_{\text{ш}}$ виходять дві характеристики, показані на рис. 15.4 червоними лініями. Якщо $R_{\text{ш}} = 0$, характеристика паралель природній і двигун працює в режимі динамічного гальмування. Характеристика при цьому проходить через початок координат. Якщо $R_{\text{ш}} = \infty$, то це рівносильно відключенню шунтуючого опору і, отже, роботі двигуна на реостатній характеристиці з опором R_{n2} . Така характеристика повинна проходити і через крапку ω_0 . Крутизна її, а отже, і положення точки перетину двох характеристик B_1 залежать тільки від величини послідовного опору. Решта характеристик для проміжних значень $R_{\text{ш}}$ перетинається в цій же крапці і лежить між вказаними двома характеристиками.

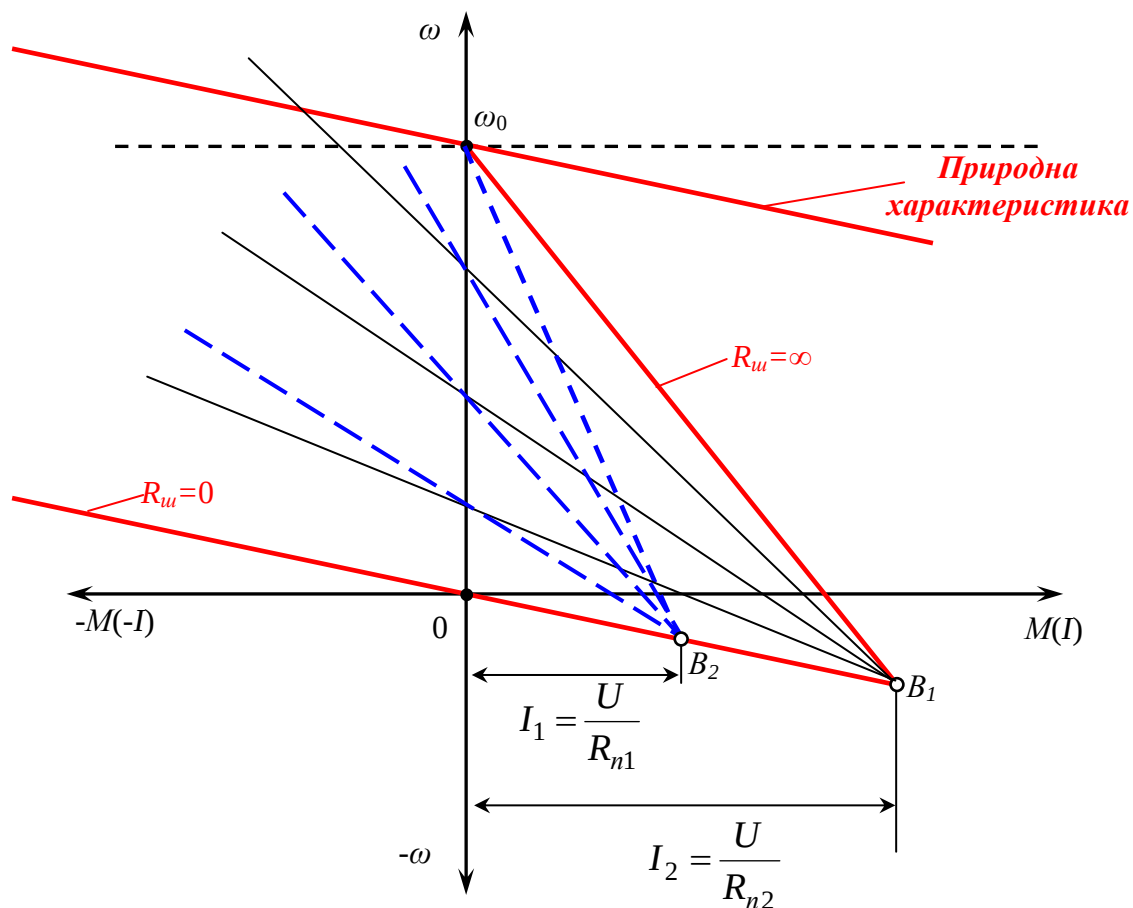


Рисунок 15.4 – Сімейство механічних характеристик при незмінному послідовному опорі і різних величинах шунтованого опору

При деякому іншому значенні $R_{n1} = \text{const}$ і для різних R_{sh} виходить нове сімейство характеристик, показане на рис. 15.4 пунктиром. Ці характеристики перетинаються також в одній загальній крапці B_2 , відповідній збільшеному опорі $R_n = R_{n1}$. Межі регулювання швидкості для даного випадку складають приблизно $(3 - 5):1$. Економічно доцільним є регулювання швидкості при незмінному моменті навантаження, оскільки магнітний потік залишається постійним, а струм в колі якоря може підтримуватися рівним номінальному. Схема з шунтуванням якоря використовується в приводах порівняно невеликій потужності. Звичайно вона застосовується при попередньому зниженні швидкості для більш точної зупинки приводу. Тривала робота при шунтованому якорі неекономічна унаслідок відносно великих втрат енергії в опорах.

Регулювання швидкості обертання двигуна зміною напруги, що підводиться, здійснюється за допомогою різних систем управління, як, наприклад, в системі генератор – двигун, в системі згідно-зустрічного включення електрич-

них машин, при послідовно-паралельному включенні двигунів або в приводах постійного струму, які керуються вентилями (вентильний електропривод).



Лекція № 16

ТЕМА № 3. Регулювання швидкості обертання електроприводів

Регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження по системі генератор – двигун

План

1. Регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження по системі генератор – двигун.
2. Регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження по системі генератор – двигун зі зворотним зв'язком по швидкості.

1. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПО СИСТЕМІ ГЕНЕРАТОР – ДВИГУН

Для отримання плавного регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму в широких межах застосовується схема, приведена на рис. 16.1 звана системою генератор – двигун або скорочено системою Г – Д.

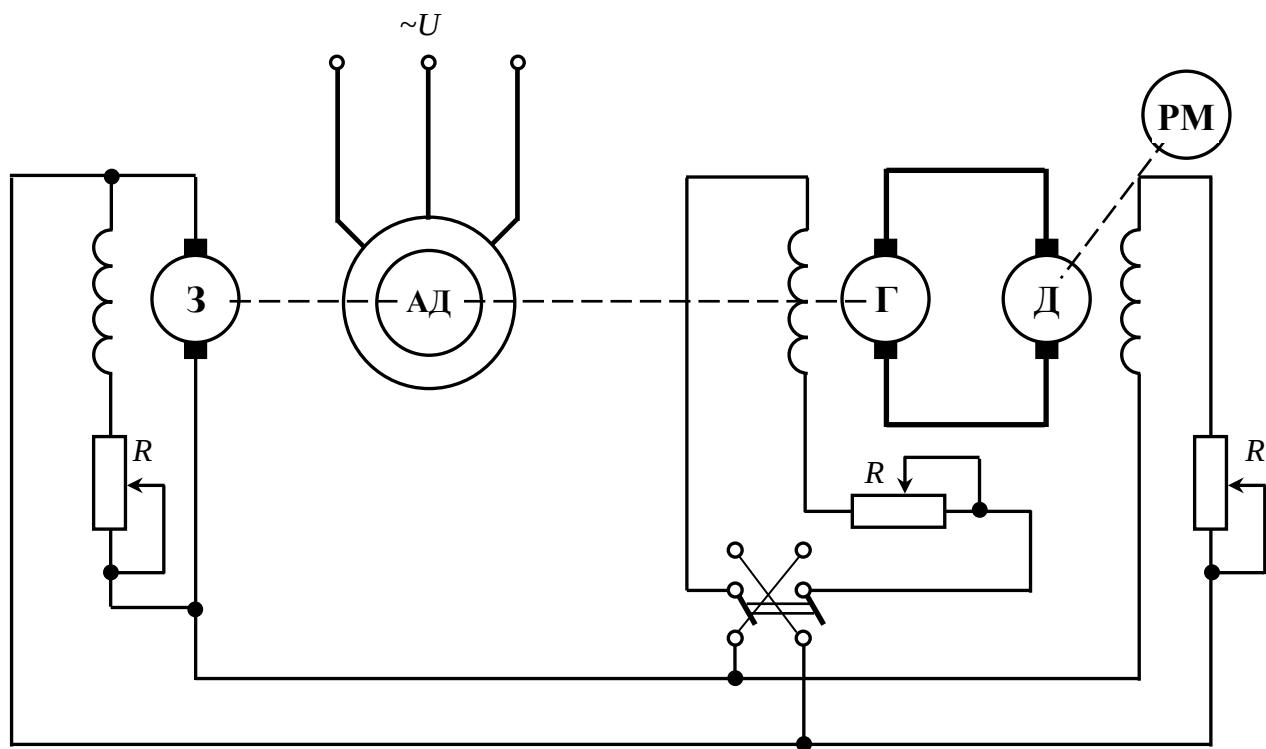


Рисунок 16.1 – Принципова схема регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження за системою Г – Д

В цій схемі генератор **Г** живить двигун **Д**, що приводить в рух робочий механізм **РМ**.

Якір генератора з'єднується з якорем двигуна безпосередньо без пускових або регулювальних реостатів в колі якорів. Обмотки збудження генератора і двигуна живляться від окремого збудника **З**, часто встановленого на одному валу з генератором. Генератор і збудник обертаються з постійною швидкістю двигуном змінного струму – синхронним або асинхронним двигуном **АД**.

В цій схемі напругу на щітках генератора можна отримати вельми малим шляхом зменшення його струму збудження. Це виключає необхідність в пускових реостатах.

Якщо необхідне реверсування двигуна, то воно здійснюється зміною полярності обмотки збудження генератора, що приводить до зміни полярності на щітках генератора та двигуна і до зміни напрямку обертання останнього.

Апарати управління виявляються менших габаритів завдяки тому, що всі операції можуть бути перенесені в кола збудження машин.

Основною перевагою цієї схеми є можливість просто регулювати швидкість двигуна в широких межах.

В найпростішій системі генератор – двигун середньої потужності межі регулювання $(6 : 1) - (8 : 1)$ досягаються шляхом зміни напруги генератора **Г**. Пределы регулювання можуть бути збільшені за рахунок зміни струму збудження двигуна **Д** в середньому відносно $2 : 1$. Таким чином, загальні межі регулювання досягають значень $D = (12 : 1) \div (16 : 1)$.

Межі регулювання швидкості обертання двигуна в цій системі обмежуються наступними обставинами. Верхня межа регулювання при ослабленні поля, як указувалося вище, обмежується умовами комутації, які погіршуються із зростанням швидкості. Нижня межа обмежується тим, що при малих швидкостях падіння напруги в колі якоря при повному навантаженні робиться сумірним з напругою генератора і незначні зміни навантаження приводять до значних коливань швидкості і навіть зупинці двигуна.

Крім того, на стійкість роботи при малих швидкостях двигуна робить вплив розмагнічуюча дія реакції якоря генератора.

Число характеристик, а, отже, і плавність регулювання визначаються числом ступенів реостата в колі збудження генератора.

Механічні характеристики двигуна при регулюванні напруги генератора є прямими лініями, паралельними одна іншій, оскільки падіння напруги в колі якорів машин залишається одним і тим же для всіх характеристик (рис. 16.2). Характеристики у верхній частині рис. 16.2 не є паралельними, оскільки вони виходять при ослабленні магнітного потоку двигуна і постійному значенні ЕРС генератора.

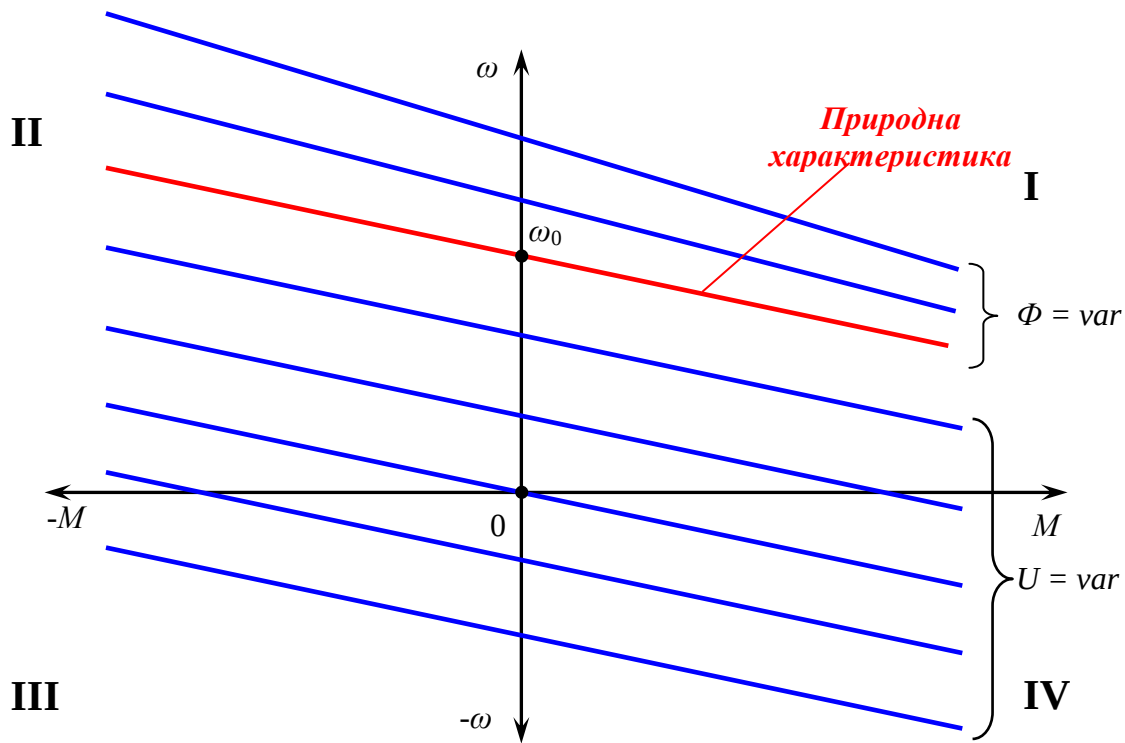


Рисунок 16.2 – Механічні характеристики двигуна незалежного збудження в системі Г – Д

Характеристики при регулюванні зміною напруги у вказаній системі володіють меншою жорсткістю, ніж природна характеристика двигуна паралельного збудження, який живиться від джерела незмінної напруги. Пояснюється це тим, що на зміну швидкості крім внутрішнього падіння напруги в двигуні R_δ впливає також внутрішнє падіння напруги в генераторі R_z . Тому рівняння швидкісної характеристики для даного значення ЕРС генератора E_z набуває наступний вигляд:

$$\omega = \frac{E_z - I(R_\delta + R_z)}{k\Phi_\delta} . \quad (16.1)$$

Рівняння механічної характеристики для цієї системи:

$$\omega = \frac{E_z}{k\Phi_\delta} - M \frac{R_\delta + R_z}{k^2 \Phi_\delta^2} . \quad (16.2)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна ω_{0x} будь-який з характеристик визначається ЕРС генератора $E_{г.х}$ і величиною потоку двигуна Φ_{δ} :

$$\omega_{0x} = \frac{E_{г.х}}{k\Phi_{\delta}}. \quad (16.3)$$

При швидкостях, що перевищують швидкість ідеального холостого ходу (квадрант II), двигун працює генератором з поверненням енергії від двигуна до генератора. Генератор агрегату, який перетворює у свою чергу переходить при цьому в режим двигуна, знижуючи навантаження асинхронного двигуна, а іноді і примушуючи його віддавати енергію в мережу.

Система генератор – двигун має дві зони регулювання. Економічно доцільне регулювання зміною напруги повинне здійснюватися при постійному моменті, а регулювання зміною магнітного потоку двигуна – при постійній потужності.

2. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПО СИСТЕМІ ГЕНЕРАТОР – ДВИГУН ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ШВИДКОСТІ

З метою розширення діапазону регулювання швидкості обертання двигуна використовуються схеми автоматичної підтримки швидкості з високою точністю при значній зміні навантаження. Прикладом такої схеми може служити система Г – Д з від'ємним зворотним зв'язком по швидкості (рис. 16.3). Тут на одному валу з двигуном Д встановлений тахогенератор ТГ, напруга на затискаях якого, пропорційне швидкості двигуна $\gamma\omega$, порівнюється із задаючою напругою – $U_{зб}$, що знімається з потенціометра ЗП. Різниця задаючої напруги і напруги тахогенератора через підсилювач П подається на обмотку збудження генератора Г. Сутність дії схеми полягає в тому, що при зменшенні швидкості двигуна знижується напруга тахогенератора, внаслідок чого зростає струм збудження генератора і, отже, збільшується ЕРС генератора, що приводить до компенсації падіння швидкості двигуна. Ступінь компенсації швидкості залежить від коефіцієнта посилення підсилювача, із зростанням якого збільшується приріст ЕРС генератора, віднесений до зміни швидкості двигуна, і, отже, підвищується жорсткість механічної характеристики двигуна. Як підсилювач використовуються частіше за все електромашинні, магнітні або напівпровідникові підсилювачі.

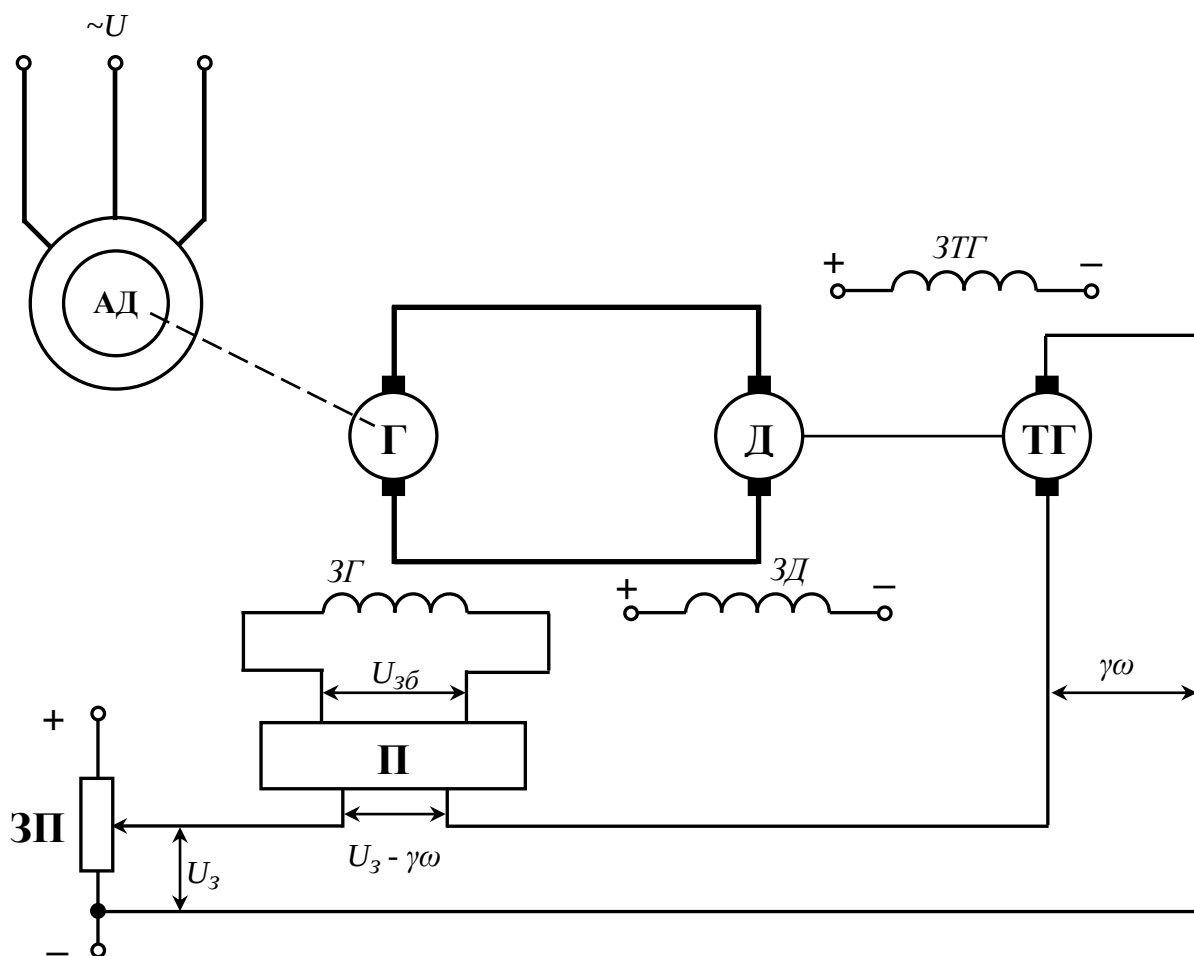


Рисунок 16.3 – Принципова схема системи Г – Д з від’ємним зворотним зв’язком по швидкості

Для даної системи можна записати наступні рівняння:

$$U_{зб} = (U_3 - \gamma\omega)k_1; \quad (16.4)$$

$$E_2 = U_{зб}k_2; \quad (16.5)$$

$$E_2 = IR + c\omega, \quad (16.6)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності між напругою на виході підсилювача і напругою на його вході – коефіцієнт посилення підсилювача; k_2 – те ж між ЕРС генератора і напругою на його обмотці збудження – коефіцієнт посилення генератора; R – опір кола якоря Г – Д.

В результаті нескладних перетворень отримаємо:

$$\omega = \frac{U_3 k}{1 + \gamma k} - \frac{MRk_3}{1 + \gamma k}, \quad (16.7)$$

або

$$\omega = \frac{U_3 k}{1 + \gamma k} - \frac{MRk'_3}{1 + \gamma k}, \quad (16.8)$$

де

$$k = k_1 k_2 k_3, \quad (16.9)$$

$k_3 = 1/c$; $k'_3 = 1/c_2$ – коефіцієнти посилення двигуна.

Аналіз виразу (16.8) показує, що із збільшенням коефіцієнта посилення системи зростає жорсткість механічної характеристики двигуна.

В межі, при $k \rightarrow \infty$, швидкість двигуна $\omega = \frac{U_3}{\gamma} = \text{const}$, не залежить від навантаження.

Таким чином, в системі Г – Д з введенням зворотних зв'язків можна істотно розширити діапазон регулювання швидкості обертання двигуна, довівши його практично до (500 – 600):1 і вище.

Зразковий вид механічних характеристик двигуна в системі Г – Д з від'ємним зворотним зв'язком по швидкості показаний на рис. 16.4 суцільними лініями. Для зіставлення там же пунктиром дані характеристики для розімкненої системи.

Завдяки перевагам, якими володіє дана система відносно плавності, меж регулювання, збереження достатньої жорсткості характеристик, вона знаходить широке застосування в металургійній промисловості для приводів могутніх прокатних станів, в металообробній промисловості в електроприводах токарних, строгальних, подовжньо-фрезерних і прецизійних верстатів, в підйомних пристроях і інших установках.

До недоліків системи Г – Д відносяться:

1) необхідність в двократному перетворенні енергії в машинному перетворювачі (з електричної енергії змінного струму в механічну і з механічної знов в електричну – постійного струму регульованої напруги), що приводить до значного зниження ККД;

- 2) наявність трьох машин в системі, сумарна встановлена потужність яких в 3 рази більше встановленої потужності регульованого двигуна;
- 3) значні габарити установки, необхідність у фундаменті для машин перетворюючого агрегату;
- 4) високі капітальні і експлуатаційні витрати.

Використовування іонних і напівпровідникових клапанів дозволяє замінити електромашинний перетворювач і створити надійну систему регулювання, що володіє більш високим ККД та не вимагає дефіцитних матеріалів і спеціального фундаменту, а також більш просту в обслуговуванні.

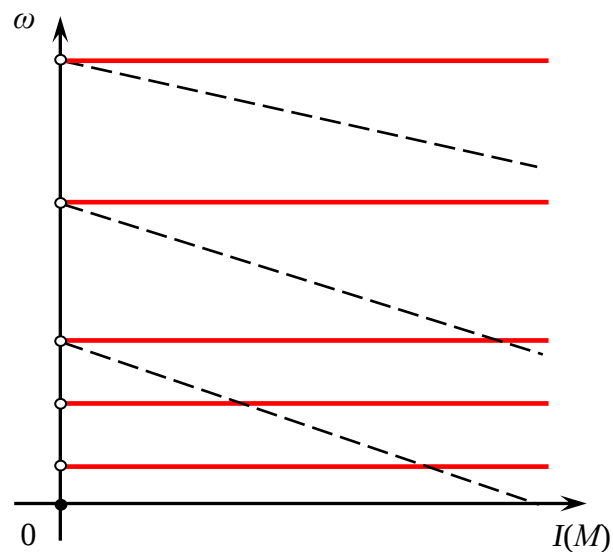
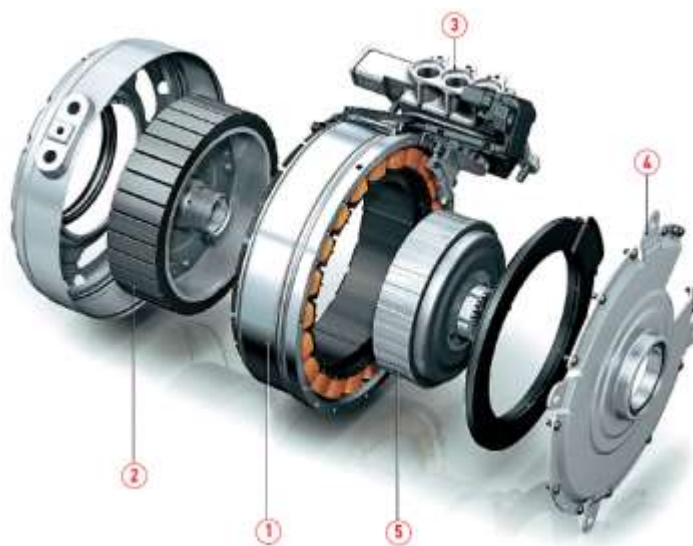


Рисунок 16.4 – Механічні характеристики двигуна в системі Г – Д з негативним зворотним зв'язком по швидкості



Лекція № 17

ТЕМА № 3. Регулювання швидкості обертання електроприводів

План

1. Регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму послідовного збудження.
2. Регулювання швидкості обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки якоря або обмотки збудження

1. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Для двигуна послідовного збудження, як і для двигуна незалежного збудження, можливі три способи регулювання швидкості обертання, а саме:

- а) регулювання опором в колі якоря;
- б) регулювання зміною струму збудження;
- в) регулювання зміною напруги, що підводиться.

Це витікає з рівняння швидкісної характеристики двигуна

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}. \quad (17.1)$$

Регулювання швидкості обертання зміною опору в колі якоря. Введенням опору послідовно з обмоткою якоря двигуна можна регулювати його швидкість обертання вниз від основної швидкості. Жорсткість характеристик при цьому зменшується у міру збільшення опору. Діапазон регулювання швидкості не перевищує (2 – 3):1 і залежить від навантаження. Регулювання швидкості обертання зміною послідовно включеного опору за умов повного використання двигуна на всіх швидкостях повинне проводитися при постійному моменті навантаження, що відповідає роботі двигуна з незмінним струмом якоря, рівним номінальному. Не дивлячись на великі втрати в реостатах, цей спосіб знаходить застосування в кранових і тягових установках, оскільки він є одним з найпростіших для двигунів послідовного збудження, вживаних у вказаних приводах, а також тому що робота цих установок відбувається з перервами.

Регулювання швидкості обертання зміною струму збудження здійснюється в тих випадках, коли вимагається розширити межі регулювання за рахунок збільшення швидкості вище за основну.

Унаслідок того, що обмотка збудження і обмотка якоря сполучена послідовно, виключається можливість такого простого регулювання потоком збудження

машини, яке застосовується як основний спосіб регулювання в двигунах паралельного збудження. В цьому випадку доводиться здійснювати змінити струму збудження за допомогою шунтування обмотки якоря або обмотки збудження двигуна.

В таких системах можливо отримання більш жорстких механічних характеристик і, отже, розширення діапазону регулювання.

Ми розглянемо різні схеми шунтування обмотки якоря і обмотки збудження двигуна, вживані для регулювання швидкості обертання.

Регулювання швидкості обертання зміною напруги, що підводиться, може бути здійснено за допомогою окремого генератора або послідовно-паралельним включенням двигунів. При послідовно-паралельному включенні двох двигунів можна отримати два ступені швидкостей завдяки зміні величини напруги, що підводиться до кожного з двигунів. Така схема застосовна для декількох двигунів, а також для двигунів незалежного і змішаного збудження.

Подібний спосіб регулювання здійснюється в тому випадку, якщо один виробничий механізм приводиться одночасно двома двигунами половинної потужності. *Застосування двох двигунів замість одного можливо з різних причин* – наприклад, через необхідність скоротити час пуску і гальмування шляхом зменшення сумарного моменту інерції або за умов більшої надійності роботи, якщо її можна вести при зниженій потужності, тобто з одним двигуном, або, нарешті, за умов зручності розміщення двох двигунів менших габаритів замість одного великого. Такий привод знаходить застосування, наприклад, для могутніх розливних кранів, в транспортних пристроях, трамваях, в доменних підйомниках, могутніх ножицях для розрізання металу і для інших механізмів. В подібних механізмах два двигуни однакової потужності працюють на один загальний вал.

Застосування послідовно-паралельного включення дає економічні вигоди. При послідовному включенні на кожний з двигунів доводиться половина напруги мережі. Коли двигуни перемикаються на паралельну роботу, кожний з них виявляється включеним на повну напругу. Таким чином, виходять два ступені регулювання без додаткової даремної витрати енергії. При зниженні швидкості удвічі роль опору, в якому повинна втрачатися напруга, грає другий двигун, що використовує енергію корисно. Для отримання проміжних ступенів регулювання в колі якоря може бути введений додатковий опір. На рис. 17.1 приведені принципи схеми перемикачів, згідно яким виходить п'ять ступенів регулювання, з них дві без втрат в опорах. В цілях повного використання двигунів це регулювання повинне проводитися при постійному моменті навантаження.

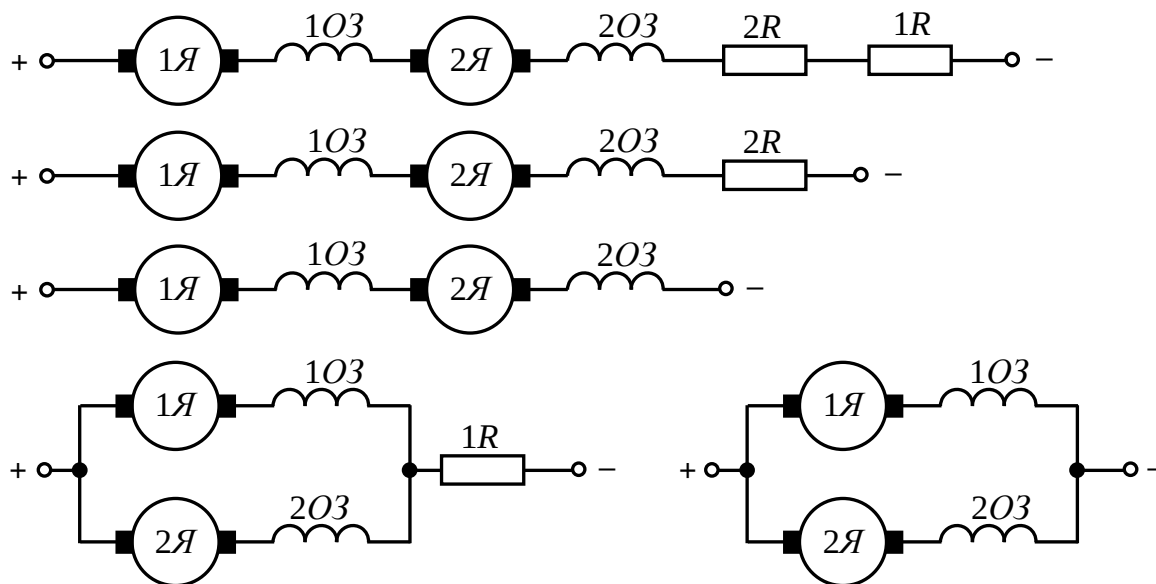


Рисунок 17.1 – Послідовність перемикачів при регулюванні швидкості обертання двох однакових двигунів послідовного збудження

2. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ ШУНТУВАННЯМ ОБМОТКИ ЯКОРЯ АБО ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

Регулювання швидкості обертання двигуна вниз від основної швидкості може бути досягнутий шунтуванням обмотки якоря. Можливі схеми шунтування показані на рис. 17.2 і 17.3.

Зниження швидкості обертання двигуна по схемі, приведений на рис. 17.2, а, викликається падінням напруги в опорі R_u , в якому проходить струм, що є сумою струму навантаження I і струму в шунті $I_{ш}$.

Проте при малих навантаженнях характеристики як і раніше асимптотично наближаються до осі ординат і, отже, мають малу жорсткість. Більш сприятливі характеристики виходять по схемі, зображеній на рис. 17.2, б. Зниження швидкості обумовлено тут зростанням потоку завдяки збільшеному струму, що проходить по обмотці збудження.

В цьому випадку характеристики мають кінцеві швидкості ідеального холостого ходу і перетинають вісь ординат. Швидкість ідеального холостого ходу тим менше ніж менше шунтуючий опір $R_{ш}$. Внаслідок цього швидкості при малих значеннях навантаження лежать значно нижче, ніж для звичайних реостатних характеристик, і жорсткість характеристик збільшується.

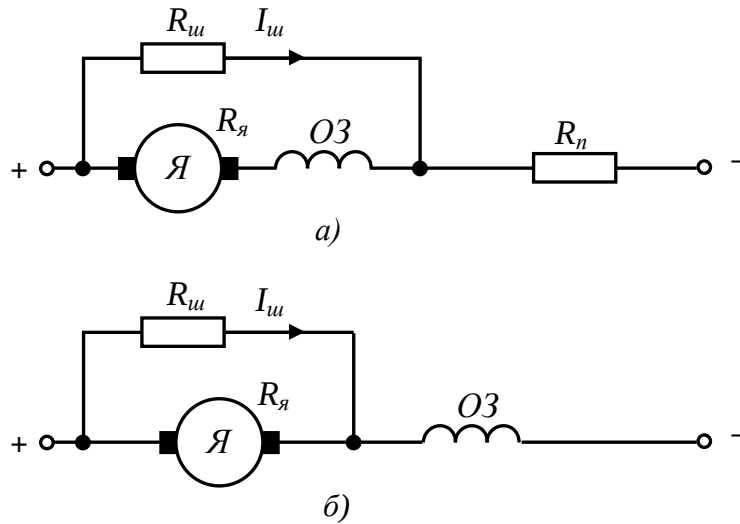


Рисунок 17.2 – Схеми шунтування обмотки якоря двигуна послідовного збудження

Дійсно, якщо струм навантаження $I=0$, то ЕРС двигуна:

$$E = k\Phi\omega_0 = I_{ш}R_{ш}, \quad (17.2)$$

і швидкість обертання двигуна визначається рівністю:

$$\omega_0 = \frac{I_{ш}R_{ш}}{k\Phi}. \quad (17.3)$$

Нехтуючи насиченням і вважаючи $\Phi = \alpha I_{ш}$, одержуємо:

$$\omega_0 = \frac{R_{ш}}{\alpha k} = k' R_{ш}. \quad (17.4)$$

Зниження швидкості тут практично обмежується насиченням двигуна при збільшенні струму збудження, що є недоліком схеми.

В схемі, приведений на рис. 17.3, поєднуються особливості двох попередніх схем. Така схема дозволяє здійснювати регулювання швидкості одночасно за рахунок зниження напруги, що підводиться до затисків якоря двигуна, і зміни потоку. Дійсно, при заданому струмі навантаження I можна отримати різні величини струму збудження $I_n = I + I_{ш}$, якщо змінювати опір $R_{ш}$. Швидкість двигуна

регулюється вниз від основної швидкості в достатньо широких межах, які залежать від співвідношення опорів $R_{ш}$ і R_n і від насичення машини.

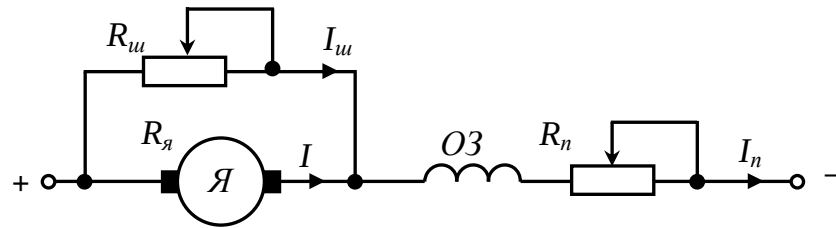


Рисунок 17.3 – Схеми регулювання швидкості обертання двигуна послідовного збудження шунтування обмотки якоря



Лекція № 18

ТЕМА № 3. Регулювання швидкості обертання електроприводів

План

1. Регулювання швидкості обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки якоря або обмотки збудження (Продовження)

1. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ ШУНТУВАННЯМ ОБМОТКИ ЯКОРЯ АБО ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

В даному випадку забезпечується значне зниження швидкості і механічні характеристики при цьому володіють великою жорсткістю. На рис. 18.1 показані механічні характеристики для цієї схеми (рис. 17.3, Лекція № 17).

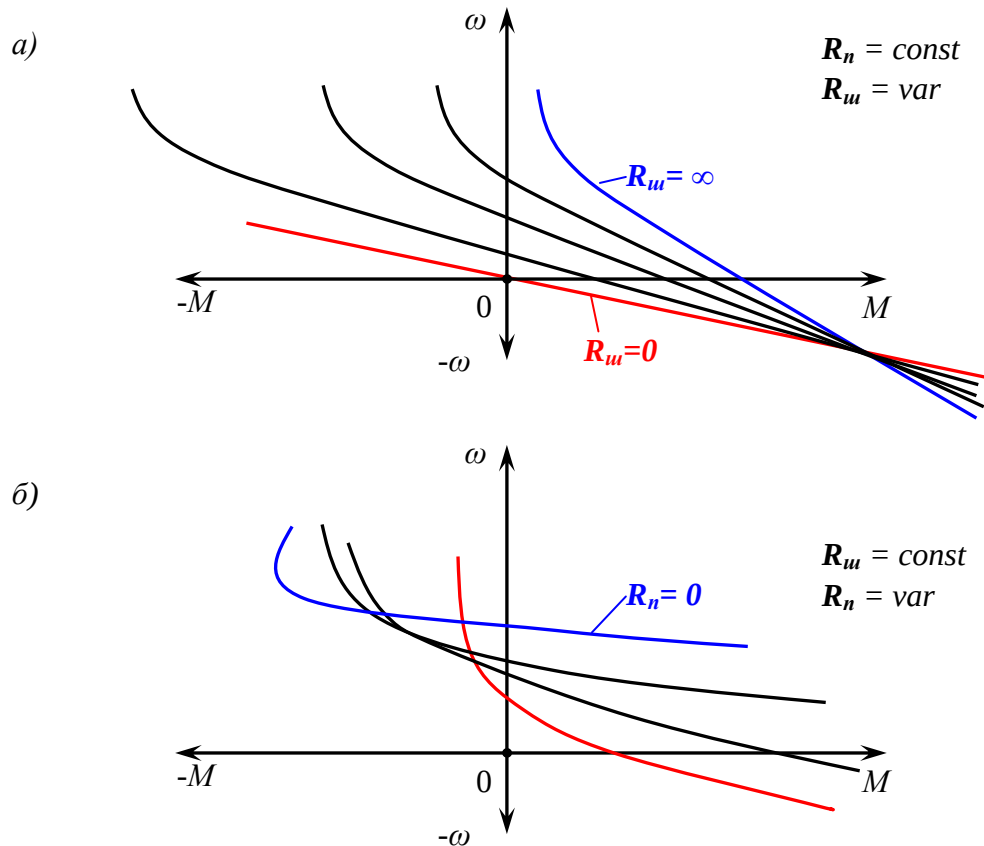


Рисунок 18.1 – Сімейство механічних характеристик двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки якоря

Подібно тому, як це було для двигуна незалежного збудження, при $R_n = \text{const}$ і $R_{ш} = \text{var}$ виходить сімейство характеристик, які пересікаються в одній крапці, обмежене двома крайніми лініями, як це показано на рис. 18.1, а. В граничному випадку, коли $R_{ш} > \infty$, характеристика стає такою, як і для звичайного включення в коло якоря послідовного опору R_n , і жорсткість її зменшується.

Якщо $R_{ш} = 0$, та напруга на затисках якоря рівно нулю і характеристика є прямою, що проходить через початок координат. Ця умова відповідає роботі двигуна незалежного збудження в режимі динамічного гальмування без зовнішнього опору.

Сімейство характеристик для $R_{ш} = \text{const}$ і $R_n = \text{var}$ приведено на рис. 18.1, би. При $R_n = \infty$ двигун виявляється відключеним від мережі і не розвиває моменту.

Якщо $R_n = 0$, то характеристика відповідає схемі, приведеній на рис. 17.2, б (Лекція № 17). Жорсткість її визначається опором $R_{ш}$, так само як і швидкість ідеального холостого ходу. Під час переходу швидкості обертання за межі ω_0 в область негативних моментів двигун не віддає енергії в мережу, але працює генератором на шунтуючий опір, оскільки і в цій схемі ЕРС двигуна не може бути більше прикладеної напруги мережі. В цьому режимі машина подібно асинхронному двигуну має так званий перекидаючий момент. Пояснюється це тим, що зростання ЕРС викликає зменшення струму в обмотці збудження. Спочатку, коли машина насичена, потік її мало змінюється і момент із зростанням швидкості продовжує рости, але, починаючи з деякою швидкістю, потік машини різко зменшується унаслідок переходу з насиченого стану машини в ненасичений; це веде до зменшення моменту двигуна.

Регулювання шунтуванням обмотки якоря є неекономічним, оскільки втрати в опорах значні.

За умов повного завантаження двигуна по струму при тривалій роботі зменшення швидкості повинне супроводитися зниженням моменту навантаження так, щоб струм збудження не перевершував номінального. Тому схема звичайно використовується для короткочасного зниження швидкості. При $M_c = \text{const}$ вона забезпечує межі регулювання до $(3 - 5) : 1$.

Регулювання швидкості обертання шунтуванням обмотки збудження здійснюється по схемі, зображеній на рис. 18.2.

Тут регулювання швидкості обертання проводиться зміною магнітного потоку двигуна, оскільки при заданому струмі навантаження I можна за допомогою реостата $R_{ш}$ змінювати струм збудження $I_s = I - I_{ш}$. Регулювання здійснюється вгору від основної швидкості унаслідок зменшення магнітного потоку. Воно є економічним, оскільки втрати в реостаті будуть того ж порядку, що і при регулюванні ослабленням потоку двигуна незалежного збудження. Пояснюється

це тим, що опір обмотки збудження відносно малий, отже, і опір, що шунтує повинен бути також малим.

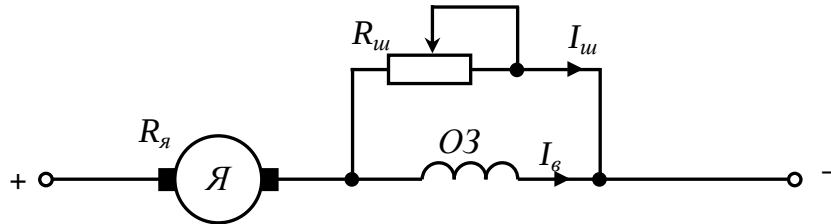


Рисунок 18.2 – Схеми регулювання швидкості обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження

Межі регулювання швидкості обертання двигуна тут звичайно не перевищують 2:1 за умови постійності потужності. При постійному моменті навантаження межі регулювання ще нижче. Цей спосіб регулювання швидкості знаходить застосування в електроприводах, що вимагають збільшення швидкості при малих навантаженнях, наприклад в безмаховикових ножицях блюмінга, що запускаються для кожного порізу металу.

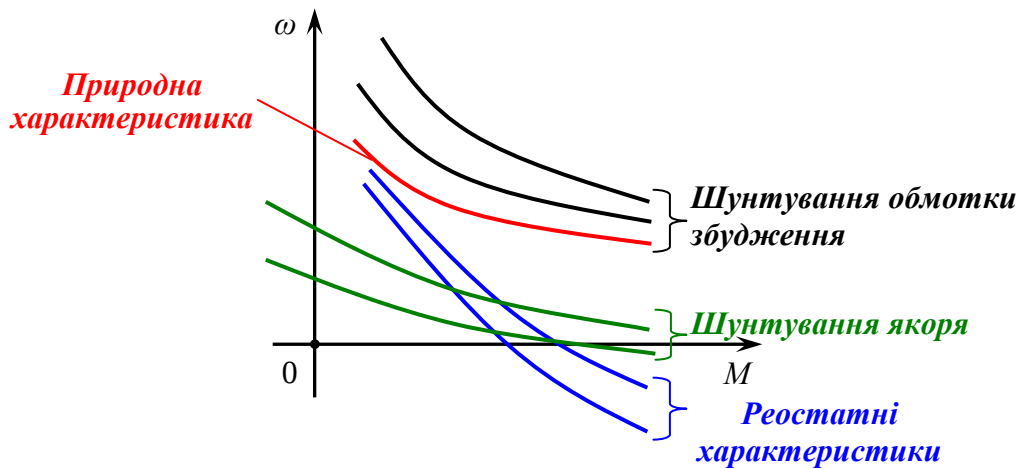


Рисунок 18.3 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при різних способах регулювання швидкості обертання

Економічно доцільним в цій схемі є регулювання з постійною потужністю і убуваючим у міру зростання швидкості моментом.

На рис. 18.3 у верхній його частині приведені механічні характеристики при шунтуванні обмотки збудження. В нижній частині дані характеристики, відповідні шунтуванню обмотки якоря. На цьому ж рисунку красною лінією показана при-

родна характеристика двигуна і синім кольором – характеристики при регулюванні зміною послідовного опору, включеного в колах якоря.

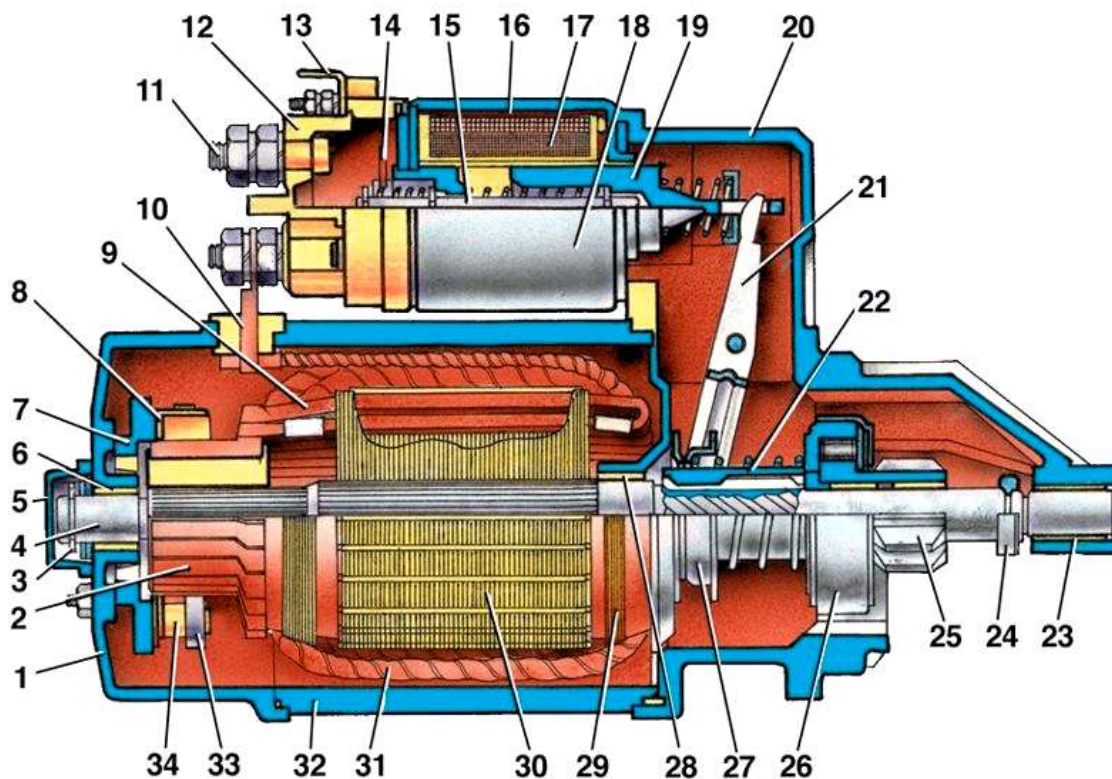


Рис. 18.4. Стартер 421.3708: 1 – кришка з боку колектора; 2 – колектор; 3 – стопорна шайба; 4 – вал якоря; 5 – ковпак; 6, 23, 28 – втулка (підшипник); 7 – траверса; 8 – щіткотримач щітки негативного виводу; 9 – обмотка якоря стартера; 10 – вивід обмотки збудження; 11 – контактний болт; 12 – кришка реле; 13 – контакт реле; 14 – контактна пластина; 15 – стрижень якоря; 16 – втягуюча обмотка; 17 – утримуюча обмотка; 18 – тягове реле; 19 – якір реле; 20 – кришка з боку приводу; 21 – важіль включення шестерні приводу; 22 – шліцьова втулка; 24 – напольглице кільце; 25 – шестерня приводу маховика колінчастого валу; 26 – привід; 27 – центруючий диск; 29 – бандажне кільце; 30 – якір стартера; 31 – котушка обмотки збудження; 32 – корпус стартера; 33 – пружина щітки; 34 – щіткотримач щітки позитивного виводу

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ № 3

1. Поясніть призначення регулювання кутової швидкості електроприводів.
2. Перерахуйте основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів.
3. Поясніть принцип регулювання кутової швидкості електроприводів зміною струму збудження двигуна.
4. Яким чином проходить регулювання кутової швидкості зміною опору в колі якоря?
5. З якого рівняння витікають можливості принципово різних способів регулювання швидкості обертання двигуна
6. Як здійснюється регулювання швидкості обертання зміною напруги що підводиться до двигуна?
7. Як визначається коефіцієнт корисної дії привода при реостатному регулюванні?
8. Поясніть принцип регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження при шунтуванні якоря, при незмінному шунтуючому опорі і різних величинах послідовного опору.
9. Поясніть механічні характеристики двигуна незалежного збудження при шунтуванні обмотки якоря.
10. Регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження при шунтуванні якоря, при незмінному послідовному опорі і різних величинах шунтованого опору.
11. Поясніть принцип регулювання швидкості обертання двигуна незалежного збудження по системі генератор – двигун.
12. Які особливості є при регулюванні швидкості обертання двигуна незалежного збудження по системі генератор – двигун з негативним зворотним зв'язком за швидкістю?
13. Перерахуйте способи регулювання швидкості обертання для двигуна послідовного збудження.
14. Поясніть сутність регулювання швидкості обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки якоря або обмотки збудження.
15. Які ви знаєте схеми перемикачів при регулюванні швидкості обертання двох однакових двигунів послідовного збудження?
16. Поясніть принцип роботи схеми шунтування обмотки якоря двигуна послідовного збудження.
17. Поясніть принцип роботи схеми регулювання швидкості обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. Учебник для вузов. Изд. 5-е доп. и переработ. – М.: Энергия, 1971. – 432 с.
2. Теорія електроприводу. Методичні вказівки до курсового проекту "Розрахунок робочих параметрів і характеристик режимів пуску і гальмування електропривода з асинхронним двигуном" для студентів спеціальності 7.092206 і 7.092501. / А.В. Гнатов, В.І. Калмиков, – Х.: ХНАДУ, 2008. – 31 с.
3. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчета автоматизированного электропривода. – Л.: Энергия, 1971. – 440 с.
4. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
5. Дьяконов В.И. Расчет электроприводов с линейными асинхронными двигателями. – Иваново, 1973. – 141 с.
6. Элементы автоматизованого електропривода / М.Г. Попович, В.А. Гаврилюк, О.В. Ковальчук, В.І. Теряєв. – К.: УМК ВО, 1990. – 260 с.
7. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
8. Сиротин А.А. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Энергия, 1969. – 560 с.
9. Системы управления электроприводами: Учеб. Пособие / А.П. Голубь, Б.И. Кузнецов, И.А. Попрышко. – К.: УМК ВО, 1992. – 376 с.
10. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
11. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. Пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
12. Трехов В.И. Элементы автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
13. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
14. Миллер Е.В. Основы теории электропривода. – М.: Высшая школа, 1968. – 408 с.
15. Кацман М.М. Электрические машины и электропривод автоматических устройств: Учебник для электротехнических специальностей техникумов. – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
16. Самойленко Б.Ф., Кононов Б.Т. и др. Системы управления электроснабжением и электроприводом. – МО СССР, 1990. – 415 с.
17. В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин Основы электропривода. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.

18. А.И. Иванченко, Л.Н. Кобылкин, А.М. Шингели Электросиловое оборудование. Руководство к лабораторным работам. Часть 2. – Х.: ХВВКУ, 1975. – 60 с.
19. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин и др. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
20. Теорія електропривода. Під ред. М.Г.Поповича. – Київ: Вища школа, 1993 – 493 с.
21. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
22. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с.
23. Иванов А.А. Справочник по электротехнике. Изд. 5-е, перераб. и доп. – К.: "Вища школа" Головное издательство, 1984. – 304 с.
24. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. Круповича В.И. – М.: Энергоиздат, 1982. – 364 с.
25. Автоматизированный электропривод / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
26. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общин курс електропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомпздяг, 1992. – 532 с.
27. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перегиб, и доп. – М.: Наука, 1989. – 452 с.
28. Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу. – М.: Высшая школа, 1983. – 335 с.



ЗМІСТ

Передмова.....	3
Історія розвитку електропривода.....	5
Лекція № 1.....	14
Лекція № 2.....	20
Питання для самоконтролю по темі № 1.....	28
Лекція № 3.....	29
Лекція № 4.....	37
Лекція № 5.....	43
Лекція № 6.....	50
Лекція № 7.....	59
Лекція № 8.....	66
Лекція № 9.....	72
Лекція № 10.....	82
Лекція № 11.....	87
Лекція № 12.....	92
Питання для самоконтролю по темі № 2.....	99
Лекція № 13.....	101
Лекція № 14.....	109
Лекція № 15.....	117
Лекція № 16.....	125
Лекція № 17.....	132
Лекція № 18.....	137
Питання для самоконтролю по темі № 3.....	141
Література.....	142