

ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

6.1. Загальні відомості

Основне призначення електропривода – перетворювати електричну енергію в механічну та керувати цим процесом. У зв'язку із цим енергетичні показники і характеристики електропривода мають першорядне значення, тим більше, що електропривод споживає близько 60-65% електроенергії, виробленої в країні.

Будь-який процес передачі та перетворення енергії супроводжується її втратами, тобто вхідна потужність $P_{вх}$ завжди більше вихідної $P_{вих}$ на величину втрат ΔP , і дуже важливо, на скільки великі ці втрати.

Енергетичну ефективність процесу в цей момент звичайно оцінюють за допомогою коефіцієнта корисної дії (ККД)

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{P_{вих}}{P_{вих} + \Delta P} = \frac{P_{вх} - \Delta P}{P_{вх}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{вх}}. \quad (6.1)$$

Важливими енергетичними характеристиками виробу – двигуна, перетворювача, редуктора або електропривода у цілому – служить номінальний ККД

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_n}, \quad (6.2)$$

де P_n , ΔP_n – номінальна вихідна потужність та номінальні втрати, і залежність ККД від відносного навантаження $\eta = f(P/P_n)$; для регульованого електропривода часто зручно використати залежність $\eta = f(\omega)$ при заданому моменті.

У випадках, коли в лінії, що живить електропривод, напруга і струм не збігаються за фазою та мають несинусоїдальну форму, використовується ще одна енергетична характеристика – коефіцієнт потужності

$$\chi = \frac{P}{UI} = v \cos \varphi_{(1)}, \quad (6.3)$$

де P – активна потужність;

$v = I/I_{(1)}$ – коефіцієнт спотворення;

$U, I, I_{(1)}$ – діючі значення напруги, струму, першої гармоніки струму;

$\varphi_{(1)}$ – кут зміщення між першими гармоніками напруги та струму.

При невеликому спотворенні форми $v \approx 1$, тобто

При передачі по лінії з деяким активним опором R_l активної потужності P при

$\cos\varphi \neq 1$ втрати ΔP_{\sim} зростуть у порівнянні із втратами при передачі тієї ж потужності постійним струмом $\Delta P_{=}$ у відношенні

$$\frac{\Delta P_{\sim}}{\Delta P_{=}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi}.$$

Оцінки енергетичної ефективності електропривода виду (6.1) справедливі, як відзначалося, лише, якщо процес незмінний у часі. Якщо ж навантаження помітно змінюється в часі, варто користуватися оцінками, які визначаються через енергії за час t .

$$W = \int_0^t P(t) dt$$

і

$$\Delta W = \int_0^t \Delta P(t) dt.$$

Для циклічних процесів з односпрямованим потоком енергії і часом циклу $t_{\text{ц}}$ зручним й інформативним показником служить цикловий ККД

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{W_{\text{ц}}}{W_{\text{ц}} + \Delta W_{\text{ц}}} = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt}{\int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt + \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt}, \quad (6.5)$$

де $W_{\text{ц}}$ і $\Delta W_{\text{ц}}$ – корисна енергія та втрати енергії за цикл.

6.2. Оцінка енергетичної ефективності при різнонаправлених потоках енергії

Викладене вище відноситься до односпрямованих потоків енергії, коли потужність не змінює знак. Разом з тим, часто зустрічаються випадки, коли напрямок потоку енергії в циклі змінюється: підйом - спуск, розгін - гальмування тощо. Наведена вище формула ККД (6.5) стає недостатньою – неочевидне поняття «корисної енергії», інтегрування знакозмінних потужностей позбавлене змісту. Усунути невизначеність можна, умовившись про рівноправність всіх режимів у циклі, якщо вони необхідні для здійснення технологічного процесу. Так, гальмівний режим у транспортному засобі нічим не гірше режиму розгону. Утримання руки робота в потрібному місці будь-який час – теж дуже корисна дія.

Якщо прийняти, що різнополярний графік $P(t)$ корисний, то природно перейти до визначення корисної енергії W в (6.5) за наступним рівнянням:

$$W = \int_0^t |P(t)| dt. \quad (6.6)$$

Для енергетичного каналу (рис. 6.1), що складається із джерела електроенергії, передатних і перетворювальних ланок, робочого органа, показчиків місця оцінки – між i -ю і $(i+1)$ ланками, а також ті ланки – від k -ої до

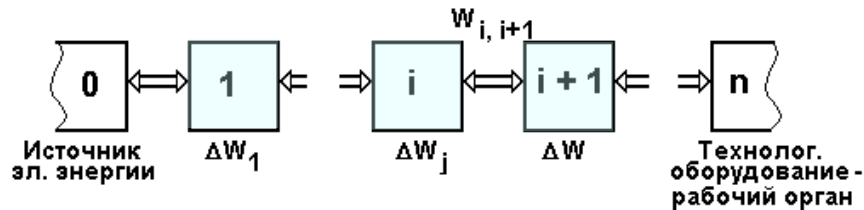


Рис. 6.1. Енергетичний канал електропривода

l -ої, у яких ураховуються втрати. Тоді з урахуванням (6.5) показник енергетичної ефективності – узагальнений ККД – має вигляд:

$$H_{i,k-l}^{t_1,\tau} = \frac{W_{i,i+1}^{t_1,\tau}}{W_{i,i+1}^{t_1,\tau} + \sum_{j=k}^l \Delta W_j^{t_1,\tau}}, \quad (6.7)$$

де
$$W_{i,i+1}^{t_1,\tau} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} |P_{i,i+1}(t)| dt;$$

$$\Delta W_j^{t_1,\tau} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} \Delta P_j(t) dt.$$

Верхній індекс указує часовий інтервал – від t_1 до τ , на якому здійснюється оцінка.

З (6.7) виходять рівняння (6.1) і (6.5), однак узагальнений показник може дати значно більшу інформацію. Наприклад, якщо вибрати місцем оцінки перетин 0,1 і врахувати втрати у всіх елементах від 1 до n , то при $P_{0,1} > 0$ отримаємо оцінку ефективності споживання енергії на інтервалі τ . Оцінка буде працювати і при $W_{n-1,n} = 0$, тобто при відсутності електромеханічного перетворення енергії. При оцінці в перетині $n-1, n$ покаже ефективність перетворення енергії, тобто міру втрат, якими супроводжується корисна механічна робота, тощо.

Узагальнений показник зручний для порівняння за енергетичним критерієм різних систем, що виконують однакові функції при відносно складних режимах роботи.

6.3. Втрати в сталих режимах

Втрати в електричних машинах детально вивчаються у відповідних курсах. Основні складові втрат у машині:

- втрати в обмотках (втрати в міді),
- втрати в магнітопроводі (втрати в сталі),
- втрати в частинах, де обумовлено їх тертя (втрати механічні).

Для *нерегульованого електропривода* першу складову, пропорційну I^2 , відносять до змінних втрат, оскільки $I \equiv M$, а остання визначається моментом опору, тобто залежить від технологічного процесу. Дві інші складові відносять умовно до постійних втрат, тому що втрати в магнітопроводі, що визначаються практично незмінними амплітудою та частотою магнітної індукції, а механічні втрати – практично незмінною швидкістю. Таким чином, для нерегульованого електропривода в першому наближенні можна вважати

$$\Delta P = K + I^2 R, \quad (6.8)$$

де K – постійні втрати,
 I і R – струм і опір силового кола.

Більш детальне і якісне уявлення про втрати дає рис. 6.2 діаграми втрат при передачі енергії від електричного джерела $P_1 = 3U_\phi I_\phi \cos\phi$ (або $P_1 = UI$ для електропривода постійного струму) до обертового навантаження $P_2 = M\omega$. На діаграмі зазначена також електромагнітна потужність $P_{em} = M\omega_0$ – потужність у повітряному зазорі машини.

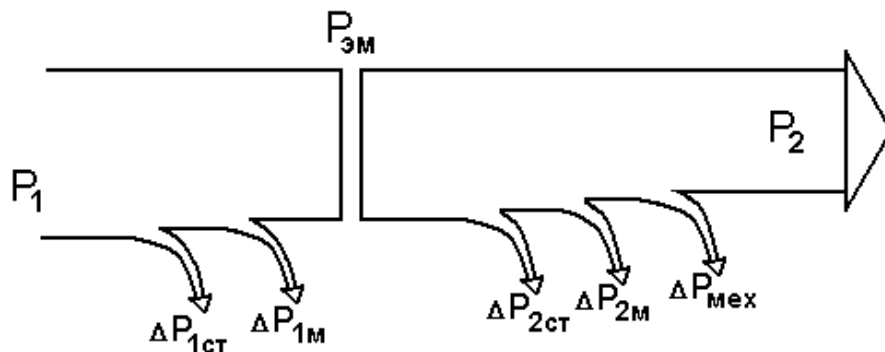


Рис. 6.2. Енергетична діаграма електричної машини

У прийнятих нами моделях електропривода для зручності передбачалося, що момент на валу дорівнює моменту електромагнітному, а момент, пов'язаний із втратами ΔM віднесено до моменту опору M_c . Це припущення, що істотно спрощує всі етапи аналізу і синтезу електропривода, не вносить в переважній більшості випадків відчутних похибок у результати, оскільки самі втрати порівняно невеликі. Зрозуміло, що в окремих спеціальних випадках, коли або втрати значні, або їх точне врахування складає самостійне завдання, потрібно користуватися більш повними та точними моделями.

Загальне уявлення про енергетичну ефективність нерегульованого електропривода дає залежність ККД двигуна з редуктором від відносного навантаження. На рис. 6.3 для орієнтування наведена така залежність для двигунів середньої потужності (15-150 кВт) з редуктором із ККД більше 0,95.

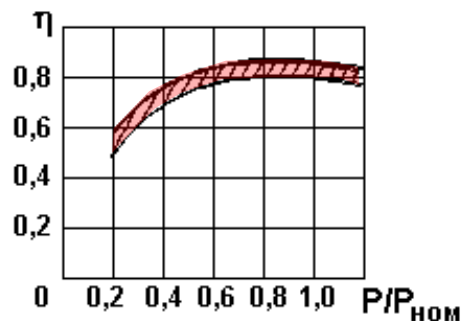


Рис. 6.3. Типова залежність ККД від навантаження

Необхідно підкреслити, що робота з недовантаженням призводить до помітного зниження ККД, тому невиправдане завищення потужності двигуна «про всяк випадок» – шкідливе. Так само шкідливі відповідно до (6.5) невдало організовані цикли, коли холостий хід займає в циклі значну частину.

У регульованому за швидкістю електроприводі енергетична ефективність визначається головним чином обраним способом регулювання, у зв'язку із чим всі способи можна розділити на дві великі групи залежно від того, змінюється чи ні ω_0 у процесі регулювання.

До першої групи $\omega_0 = const$ належать всі види реостатного регулювання, а також регулювання асинхронного двигуна з к.з. ротором зміною напруги при незмінній частоті. Якщо прийняти для простоти, що $P_{ем} \approx P_1$ і $\Delta P_2 \approx \Delta P_{2м}$, то для цієї групи одержимо:

$$\Delta P_2 = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = P_1 s, \quad (6.9)$$

таким чином втрати в роторному (якірному) колі при будь-якому навантаженні

пропорційні різниці швидкостей $\Delta\omega$ ($\omega_0 - \omega$) або ковзанню $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$.

При реостатному регулюванні лише частина цих втрат, пропорційна $\frac{R_{2p}}{R_{2p} + R_{2\delta}}$, і розсіюється всередині машини та нагріває її. Інша частина, пропорційна $\frac{R_{2\delta}}{R_{2p} + R_{2\delta}}$, і розсіюється поза машиною, погіршуючи, зрозуміло, енергетичні показники електропривода. Саме ця частина втрат в каскадних схемах використовується корисно.

Складніше і неприємніше співвідношення (6.9) проявляється в асинхронному електроприводі з к.з. ротором при регулюванні зміною напруги або в будь-який інший «хитрий» спосіб, але при постійній частоті. Тут вся потужність $\Delta P_2 = P_1 s$ розсіюється у двигуні, нагріваючи його і роблячи спосіб практично непридатним для тривалого режиму роботи.

Цікаво, що співвідношення (6.9) не можна «обдурити», хоча такі спроби робилися і ще робляться.

До другої групи $\omega_0 = var$ належать всі «безреостатні» способи регулювання в електроприводах постійного струму – зміною напруги та магнітного потоку, і частотне регулювання в електроприводах змінного струму.

Принципово способи другої групи енергетично кращі, оскільки в (6.9) різниця швидкостей $\Delta\omega \approx const$, однак варто враховувати, що в пристроях, що забезпечують $\omega_0 = var$, теж є втрати, і при малих потужностях, невеликих діапазонах регулювання та чималій вартості пристроїв необхідні детальні порівняння.

6.4. Втрати в перехідних режимах

Як було раніше показано (п.5.2), перехідні процеси при швидких змінах чинники впливу, можуть супроводжуватися значним зростанням моменту та струму, і, як наслідок, значною втратою енергії. Поставимо завдання оцінити величину втрат енергії в перехідних процесах і знайти зв'язки між втратами та параметрами електропривода. Будемо враховувати тільки втрати в активних опорах силових кіл двигуна, оскільки саме ця складова загальних втрат помітно зростає в перехідних процесах.

Аналіз проведемо лише для перехідних процесів, віднесених раніше до перших двох груп (п.п. 5.2 і 5.3) і почнемо з важливого окремого випадку, коли чинник, що викликає перехідний процес, змінюється миттєво, а процес протікає у відповідності до статичних характеристик (п. 5.2).

Втрати енергії в колі ротора або якоря за час перехідного процесу t_{nn} визначаються з урахуванням (6.9)

$$\Delta W_2 = \int_0^{t_{\text{пр}}} (M\omega_0 - M\omega) dt = \int_0^{t_{\text{пр}}} M\omega_0 s dt. \quad (6.10)$$

Для перехідного процесу вхолосту ($M_e = 0$) будемо мати:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (6.11)$$

Підставивши (6.11) в (6.10) і змінивши межі інтегрування, отримаємо:

$$\Delta W_{20} = \int_{s_{\text{поч}}}^{s_{\text{кін}}} -J\omega_0^2 s ds = J\omega_0^2 \int_{s_{\text{кін}}}^{s_{\text{поч}}} s ds.$$

Після інтегрування остаточно отримаємо

$$\Delta W_{20} = \frac{J\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2). \quad (6.12)$$

Цей результат універсальний, дуже простий і дуже важливий: втрати енергії в якірному або роторному колі за перехідний процес вхолосту ($M_e = 0$) при «миттєвій» появі нової характеристики залежать тільки від запасу кінетичної енергії в роторі при ω_0 і від початкового та кінцевого ковзань. При пуску та динамічному гальмуванні вони складуть $J\omega_0^2/2$, при гальмуванні противмиканням $3J\omega_0^2/2$, при реверсі $4J\omega_0^2/2 = 2J\omega_0^2$. Ні форма механічної характеристики, ні час перехідного процесу, ні будь-які параметри двигуна, крім J і ω_0 , не впливають на втрати в роторі.

Якщо в асинхронному двигуні не враховувати струм намагнічування і вважати, що $I_1 = I_2'$ то $\Delta P_1 = I_1^2 R_1 = \Delta P_2 \frac{R_1}{R_2}$. Тоді $\Delta W_{10} = \Delta W_{20} \frac{R_1}{R_2}$, а загальні втрати енергії в асинхронному двигуні при цих умовах складуть

$$\Delta W_0 = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2). \quad (6.13)$$

Перехідний процес – дуже напружений в енергетичному відношенні режим: втрати енергії в десятки разів вище, ніж за той же час у сталому режимі.

Для того, щоб оцінити втрати енергії в перехідному процесі під навантаженням $M_c \neq 0$ (інші умови зберігаються), прийmemo, що $M_c = const$ і $M = M_{cp} = const$, – цей випадок був детально розглянутий у п. 5.2; для пуску графіки $\omega(M)$ і $\omega(t)$ показані на рис. 6.4. Тоді $P_1 = M_{cp}\omega_0$, $P_2 = M_{cp}\omega$, $\Delta P = P_1 - P_2$ (рис. 6.4), а втрати енергії визначаються відповідно до (6.10) заштрихованим трикутником, тобто

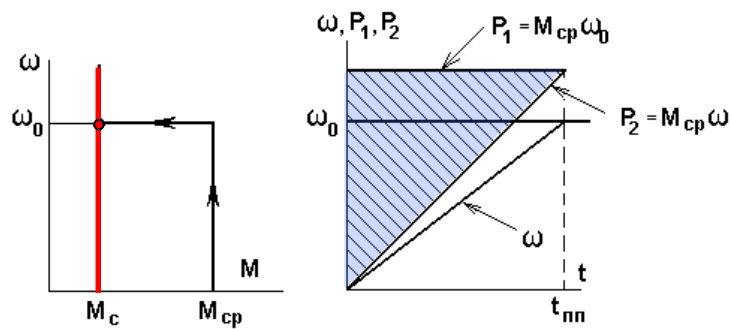


Рис. 6.4. Механічні характеристики та втрати енергії при пуску

$$\Delta W_n = \frac{M_{cp}\omega_0 t_{nn}}{2},$$

або з урахуванням $t_{nn} = J\omega_0 / (M_{cp} - M_c)$

$$\Delta W_n = \Delta W_0 \frac{M_{cp}}{M_{cp} - M_c}. \quad (6.14)$$

При гальмуванні навантаження буде знижувати втрати:

$$\Delta W_m = \Delta W_0 \frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_c}. \quad (6.15)$$

З викладеного витікають можливі способи зниження втрат енергії в перехідних процесах:

- зменшення моменту інерції за рахунок вибору відповідного двигуна та редуктора або за рахунок заміни одного двигуна двома половинної потужності;
- заміни гальмування противмиканням динамічним гальмуванням або використання механічного гальма;
- перехід від стрибкоподібної зміни ω_0 до східчастої; при подвоєнні числа сходинок буде вдвічі скорочуватися площа трикутників, що виражають втрати енергії;

- плавна зміна ω_0 у перехідному процесі.

Розглянемо докладніше останній спосіб, реалізований практично в системах керування перетворювач – двигун.

При плавній зміні ω_0 у перехідному процесі, як це було показано в п. 5.3 зтрати енергії повинні зменшуватися. Це ілюструється на рис. 6.5, де порівнюються два випадки – прямий пуск вхолосту (а) і частотний пуск вхолосту за час $t_1 \gg T_M$, тобто при прискоренні $\varepsilon = \frac{\omega_{01}}{t_1}$ (б) – заштриховані площі.

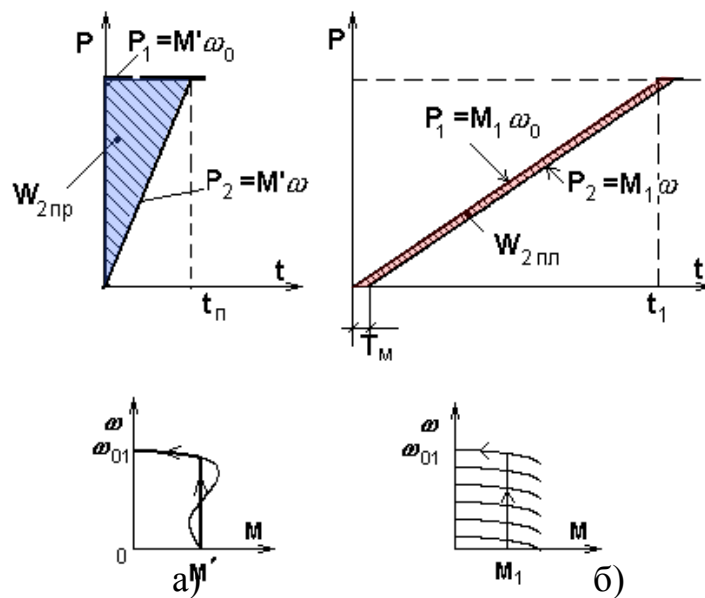


Рис. 6.5. Втрати при прямому (а) і плавному (б) пуску

При прямому пуску, як відзначалось, втрати енергії в якірному або роторному колі визначаються площею заштрихованого трикутника на рис. 6.5,а і складуть

При прямому пуску, як відзначалось, втрати енергії в якірному або роторному колі визначаються площею заштрихованого трикутника на рис. 6.5,а і складуть

$$\Delta W_{2np} = \frac{J\omega_{01}^2}{2}.$$

При плавному пуску втрати визначаються площею заштрихованої на рис. 6.5,б трапеції:

$$\Delta W_{2пл} = M_1\omega_{01}T_M = J\varepsilon\omega_{01}T_M = \frac{J\omega_{01}^2}{2} \cdot 2\frac{T_M}{t_1} = \Delta W_{2np} \cdot 2\frac{T_M}{t_1}. \quad (6.16)$$

Відзначимо, що рівняння (6.16), отримане при апроксимації реальної кривої

швидкості (див. п. 5.3) прямою лінією справедливо лише при $t_1 \gg T_M$; при інших умовах варто використати більш точні моделі.

З викладеного очевидно, що зменшуючи ε , тобто збільшуючи час перехідного процесу та знижуючи момент, можна управляти втратами енергії, знижуючи їх до будь-якої необхідної величини.

6.5. Енергозбереження засобами електропривода

Значна частка електроенергії, що споживається електроприводом (до 65% у розвинених країнах) і здійснення електроприводом практично всіх технологічних процесів, пов'язаних з рухом, робить особливо актуальною *проблему енергозбереження в електроприводі*. У світовій практиці дотепер сформувалося кілька основних напрямків, за якими інтенсивно ведуться дослідження, розробки, реалізуються великі промислові проекти.

1. У нерегульованому електроприводі, реалізованому на основі асинхронних електродвигунів з к.з. ротором, багато уваги приділяється так званим енергоефективним двигунам, в яких за рахунок збільшення маси активних матеріалів, їхньої якості, а також за рахунок спеціальних прийомів проектування вдається підняти на 1-2% (потужні двигуни) або на 4-5% (невеликі двигуни) номінальний ККД при деякому збільшенні ціни двигуна.

Цей підхід, використаний і активно рекламований з 70-х років спочатку в США, потім у Європі, може приносити користь, якщо технологічний процес дійсно не вимагає регулювання швидкості, якщо навантаження міняється мало і якщо двигун обраний правильно. У всіх інших випадках використання дорогих енергоефективних двигунів може виявитися недоцільним.

2. Правильний вибір двигуна для конкретного технологічного процесу – один з найважливіших шляхів енергозбереження. У європейській практиці прийнято вважати, що середнє завантаження двигунів становить 0,6, тоді як у наших країнах, де донедавна не було прийнято заощаджувати ресурси, цей коефіцієнт становить 0,3-0,4, тобто привод працює із ККД значно нижчим за номінальний. Завищена «про всяк випадок» потужність двигуна часто призводить до непомітного на перший погляд, але дуже істотного негативного наслідку в технологічній сфері, що обслуговується електроприводом, наприклад, до зайвого напору в гідравлічних мережах, пов'язаного з ростом втрат і зниженням надійності тощо.

3. Основний шлях енергозбереження засобами електропривода – подача кінцевому споживачеві – технологічній машині – необхідної в кожний момент потужності. Це може бути досягнуто за допомогою керування координатами електропривода, тобто за рахунок переходу від нерегульованого електропривода до регульованого. Цей процес став останнім часом основним у розвитку електропривода у зв'язку з появою доступних технічних засобів для його здійснення – перетворювачів частоти тощо.

4. Вибір раціональних, у конкретних умовах, типів електропривода та способів керування, що забезпечують мінімізацію втрат у силовому каналі, – важливий елемент у загальній проблемі енергозбереження.

Очікується, що перехід від нерегульованого електропривода до регульованого в технологіях, де це потрібно, може заощадити до 25-30% електроенергії. В одній з технологій – у водо- повітропостачанні – перехід до регульованого електропривода, як показав досвід, заощаджує близько 50% електроенергії, до 25% води і до 10% тепла.

ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Метод оцінки енергетичної ефективності електромеханічних систем шляхом розрахунку ККД.
2. Метод оцінки енергетичної ефективності електромеханічних систем шляхом розрахунку циклового ККД.
3. Оцінка енергоефективності електромеханічних систем за умови різнонаправлених потоків енергії.
4. Основні складові втрат в електричних машинах у сталому режимі.
5. I група визначення енергетичної ефективності у регульованому за швидкістю електроприводі.
6. II група визначення енергетичної ефективності у регульованому
7. Визначення втрат в перехідних режимах.
8. Можливі способи зниження втрат енергії в перехідних процесах.

9. Способи енергозбереження засобами електропривода