

SÉRIE “Elektrotechnika”

[https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-12\(55\)-318-333](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-12(55)-318-333)

Богдан Антипчук

*викладач першої категорії кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Житомирського агротехнічного фахового коледжу
м. Житомир, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-1426-4782>*

Геннадій Логвінов

*викладач вищої категорії кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Житомирського агротехнічного фахового коледжу
м. Житомир, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-4406-3367>*

Веніамін Мельничук

*викладач-методист кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Житомирського агротехнічного фахового коледжу
м. Житомир, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-1126-9000>*

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЧЕРЕЗ ОПТИМІЗАЦІЮ ЙОГО КЕРУВАННЯ

Анотація. Стаття присвячена проблемі необхідності оптимізації роботи електродвигуна через зростання вартості енергоносіїв, що спричиняє підвищення цін на електроенергію в усьому світі, що особливо відчутно протягом останнього року. У роботі наголошується, що енергозбереження набуває ключового економічного значення у сучасному світі, до того ж ситуацію в Україні ускладнює нестабільність електропостачання через війну, що змушує використовувати автономні генератори, а це додатково збільшує собівартість електроенергії.



У статті наголошується, що проблему енергоефективності двигунів слід розглядати у комплексі з такими дисциплінами, як економіка, енергетика та електротехніка.

Проведене в даній статті дослідження доводить, що оптимізація керування електродвигуном напряду знижує споживання електроенергії та підвищує продуктивність привода: менші втрати, стабільніша швидкість/момент, краща динаміка та довший ресурс обладнання. Це особливо важливо, бо електродвигуни становлять значну частку промислового енергоспоживання, а вартість енергії домінує в життєвому циклі привода.

В цій роботі розглядаються методи та способи підвищення енергоефективності електродвигунів, що сприятиме оптимізації споживання електричної енергії та збільшить продуктивність роботи самого двигуна. Основні з них включають частотне регулювання (застосування частотних перетворювачів або інверторів); реактивне управління (тобто векторне керування), яке реалізується через використання математичного перетворення координат; режими часткового навантаження (розглянуто основні режими навантаження на двигун: малий відсоток – 25 %, середній – 25-75 % і високе навантаження – 75-100 %; синхронізацію з вимогами навантаження (автоматичне регулювання роботи двигуна відповідно до поточних потреб у потужності); покращене управління магнітним потоком (оптимізація подачі електричної енергії до двигуна) та управління моментом (процес регулювання крутного моменту двигуна).

Ключові слова: частотний перетворювач, інвертор, амплітуда, широтно-імпульсна модуляція, енкодер, тахометр, електричний двигун, номінальна напруга.

Bohdan Antypchuk

*teacher of the first category of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of the Zhytomyr Agrotechnical Professional College
Zhytomyr, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-1426-4782>*

Gennady Logvinov

*teacher of the highest category of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of the Zhytomyr Agrotechnical Professional College, Zhytomyr, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4406-3367>*



Veniamin Melnychuk

*teacher-methodist of the Department of Electric Power, Electrical Engineering
and Electromechanics of the Zhytomyr Agrotechnical
Professional College*

*m. Zhytomyr, Ukraine, e-mail: mvvv.ell@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1126-9000>*

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY AND PRODUCTIVITY OF THE ELECTRIC MOTOR THROUGH OPTIMIZATION OF ITS CONTROL

Abstract. The article is devoted to the problem of the need to optimize the operation of electric motors due to the rising cost of energy, which is causing electricity prices to rise worldwide, which has been particularly noticeable over the last year. The paper emphasizes that energy conservation is becoming of key economic importance in the modern world. Moreover, the situation in Ukraine is complicated by the instability of electricity supply due to the war, which forces the use of autonomous generators, further increasing the cost of electricity.

The article emphasizes that the issue of engine energy efficiency should be considered in conjunction with disciplines such as economics, energy and electrical engineering.

The research carried out in this article proves that the optimization of electric motor control directly reduces electricity consumption and increases drive performance: lower losses, more stable speed/moment, better dynamics and longer equipment life. This is especially important, because electric motors make up a significant share of industrial energy consumption, and the cost of energy dominates the life cycle of the drive.

This work considers methods and methods of increasing the energy efficiency of electric motors, which will contribute to the optimization of electricity consumption and increase the performance of the motor itself. The main ones include frequency regulation (application of frequency converters or inverters); reactive control (that is, vector control), which is implemented through the use of mathematical coordinate conversion; partial load modes (the main engine load modes are considered: small percentage – 25 %, medium – 25-75 % and high load – 75-100 %; synchronization with load requirements (automatic adjustment of engine operation according to current power needs); improved magnetic flux control (optimization of the supply of electrical energy to the engine) and control of the torque of an electric motor (engine torque adjustment process).



Keywords: frequency converter, inverter, amplitude, pulse width modulation, encoder, tachometer, electric motor, rated voltage.

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності електричних двигунів інтерпретується як процес мінімізації електроспоживання за умови збереження або нарощування вихідних характеристик приводу. Реалізація цього завдання ґрунтується на застосуванні сучасних технологічних рішень, раціональному виборі конструктивних параметрів та впровадженні системного підходу до експлуатації й технічного обслуговування.

Загалом, покращення показників енергоефективності та продуктивності електродвигуна дозволить зменшити споживання електроенергії завдяки уникненню втрат у кабелях, а регулювання швидкості обертання двигуна дозволить уникати роботи на повну потужність там, де це не потрібно. Тобто, зменшення споживання електроенергії при збереженні або підвищенні продуктивності двигуна можна досягти завдяки сучасним технологіям, правильному вибору обладнання та системному підходу до його експлуатації, використовуючи певні методи керування роботою електродвигуна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема енергоефективності електродвигунів активно досліджується у працях українських та міжнародних науковців. Вона розглядається у матеріалах конференцій, технічних статтях і галузевих оглядах, де аналізуються сучасні стандарти, методи оптимізації та впровадження частотних перетворювачів.

Наукові праці з проблеми енергоефективності електродвигунів охоплюють як **теоретичні аспекти** (аналіз ККД, стандарти, векторне керування, математична модель керування електродвигуном) [1. 2. 4. 6. 10], так і **практичні рішення** (частотні перетворювачі, модернізація обладнання тощо) [3, 7, 8, 9, 12]. Загалом питання, яке розглядається в цій статті – це міждисциплінарна тема, що поєднує електротехніку, енергетику та економіку.

Мета статті: обґрунтувати можливості зменшення енергетичних витрат під час роботи електродвигуна за рахунок оптимізації його керування.

Виклад основного матеріалу. Для підвищення енергоефективності електродвигунів існує кілька методів керування їх роботою, які допомагають оптимізувати споживання енергії та продуктивність двигунів. Розглянемо ці методи більш детально. Наприклад, застосування частотних перетворювачів дозволяє регулювати швидкість обертання двигуна відповідно до навантаження, змінюючи частоту живлення. Це призводить до зменшення енерговитрат, оскільки двигун працює лише на необхідній потужності. Цей метод є особливо ефективним у випадках, коли навантаження змінюється, наприклад, у насосних установках або вентиляторах.

Частотне регулювання електродвигунів здійснюється за допомогою пристроїв, відомих як частотні перетворювачі або інвертори. Вони дозволяють змінювати частоту живлення, яка подається на двигун, що безпосередньо впливає на швидкість його обертання.

І це перший етап, який підготовляє напругу для подальшого регулювання частоти.

Після випрямлення змінної напруги утворюється пульсуюча постійна напруга. Щоб згладити пульсації і отримати стабільну постійну напругу, використовуються фільтри, зазвичай конденсатори.

Далі постійна напруга з фільтра подається на інвертор, який перетворює її назад в змінну, але вже з потрібною частотою і амплітудою. Частота і напруга на виході інвертора залежать від того, яку швидкість обертання двигуна необхідно отримати.

Основними параметрами для розрахунку необхідної частоти є: номінальна частота двигуна, яка, зазвичай, становить 50 Гц або 60 Гц; номінальна швидкість двигуна (вказується в паспорті); бажана швидкість, тобто швидкість, яку необхідно досягти після підключення частотного перетворювача (ЧП); потужність двигуна, без якої неможливо обрати частотний перетворювач відповідної потужності; номінальна напруга мережі.

Розрахувати нову частоту можна за такою формулою:

$$f_2 = \frac{n_2}{n_1} * f_1, \quad (1)$$

де f_2 – нова частота (Гц), f_1 – номінальна частота (Гц), n_2 – бажана швидкість (об/хв), n_1 – номінальна швидкість (об/хв).

Візьмемо до прикладу, якщо у нашого двигуна швидкість 1500 об/хв і номінальна частота 50 Гц, а ми хочемо зменшити швидкість до 1000 об/хв, тоді:

$$f_2 = (1000 / 1500) * 50 = 33,33 \text{ Гц}$$

Отже, для досягнення бажаної швидкості необхідно встановити на частотний перетворювач частоту 33,33 Гц.

Проте слід зауважити, що залежність швидкості від частоти може бути нелінійною, особливо при низьких частотах, а зменшення частоти призводить до зменшення крутного моменту, тому це слід враховувати при виборі частотного перетворювача, особливо, якщо навантаження на двигун значне.



У частотному перетворювачі реалізується принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [6, с. 103-106], що забезпечує точне регулювання частоти змінної напруги, яка подається на двигун, а також її амплітуди. Частота змінної напруги визначає швидкість обертання ротора, тоді як напруга регулюється для забезпечення необхідного крутного моменту при зміні швидкості.

Частотний перетворювач дозволяє плавно змінювати частоту від майже нульової до номінальної, а також підтримувати оптимальний крутний момент на різних швидкостях. Це сприяє більш економній роботі двигуна, оскільки споживання електроенергії адаптується до реальних вимог навантаження.

Інвертори забезпечують можливість точного регулювання швидкості двигуна, що є особливо важливим у технологічних процесах, де необхідно здійснювати точне управління. Плавний старт і зупинка зменшують механічні навантаження на підшипники, муфти та інші елементи приводу, що, в свою чергу, продовжує термін служби електродвигуна.

Щодо іншого методу – реактивного управління електродвигуном (інша назва – векторне керування), то він дозволяє більш точно контролювати швидкість і момент двигуна шляхом регулювання магнітного потоку та струму ротора. Основна концепція цього методу полягає в розділенні струму статора на дві складові: одна відповідає за створення магнітного поля, а інша – за формування крутного моменту. Це забезпечує управління обертанням двигуна подібно до управління постійним струмом, що значно підвищує ефективність і точність.

Принцип роботи цього методу полягає в тому, що струм, який подається на двигун, розбивається на дві ортогональні компоненти: магнітний потік, який відповідає за створення необхідного магнітного поля у двигуні крутний момент, що відповідає за створення обертового моменту – все це дозволяє незалежно регулювати момент і магнітний потік двигуна, що робить управління точнішим і динамічнішим.

Щоб реалізувати векторне керування, використовується математичне перетворення координат (наприклад, перетворення Парка) [10, с. 42-43]. Струми в трьох фазах двигуна перетворюються в дві віртуальні осі (d-q осі), що дозволяє спростити управління і зробити його більш інтуїтивним. Це схоже на керування двигуном постійного струму, де магнітний потік і момент є незалежними.

Перетворення Парка базується на проекції векторів струмів та напруг з трифазної системи координат (a-b-c) на двофазну систему координат (d-q), що обертається зі швидкістю ротора. Вісь d цієї системи координат орієнтована вздовж вектора потокозчеплення ротора, а вісь q перпендикулярна до неї.

Перетворення Парка можна записати наступними формулами [10, с. 42]:

$$I_d = \frac{2}{3} * (I_a * \cos \theta + I_b * \cos(\frac{\theta - 2\pi}{3}) + I_c * \cos(\frac{\theta + 2\pi}{3})), \quad (2)$$

$$I_q = \frac{2}{3} * (-I_a * \sin \theta - I_b * \sin(\frac{\theta - 2\pi}{3}) - I_c * \sin(\frac{\theta + 2\pi}{3})) \quad (3)$$

де I_d – струм в осі d; I_q – струм в осі q; I_a , I_b , I_c – струми фаз a, b, c; θ – кут між віссю a та віссю d.

Аналогічно можна перетворити напруги [10, с. 43]:

$$U_d = \frac{2}{3} * (U_a * \cos \theta + U_b * \cos(\frac{\theta - 2\pi}{3}) + U_c * \cos(\frac{\theta + 2\pi}{3})), \quad (4)$$

$$U_q = \frac{2}{3} * (-U_a * \sin \theta - U_b * \sin(\frac{\theta - 2\pi}{3}) - U_c * \sin(\frac{\theta + 2\pi}{3})) \quad (5)$$

де U_d – напруга в осі d; U_q – напруга в осі q; U_a , U_b , U_c – напруги фаз a, b, c.

Векторне керування електродвигуном має ряд переваг: по-перше, забезпечує точне управління швидкістю і моментом двигуна, що важливо для застосувань, де потрібне динамічне регулювання (робототехніка, приводи машин), по-друге, цей метод дозволяє працювати з максимальним крутним моментом навіть на низьких швидкостях, що підвищує ефективність роботи електродвигуна і забезпечує плавний старт і точне регулювання моменту, що знижує знос обладнання і покращує продуктивність процесів. Також реактивне керування дозволяє зменшити споживання енергії за рахунок оптимізації потоку і моменту, знижуючи втрати в двигуні.

Цей метод застосовується в робототехніці, верстатах, підйомних механізмах, компресорах, насосах, електромобілях.

Ще одним способом енергоефективності роботи двигуна є встановлення режимів часткового навантаження на двигун, то це означає, що двигун працює з потужністю, меншою за номінальну. Це характерно для багатьох систем, оскільки реальні умови експлуатації не завжди потребують повного навантаження на двигун. Часткове навантаження впливає на продуктивність, енергоефективність та знос двигуна.

Розглянемо основні режими.

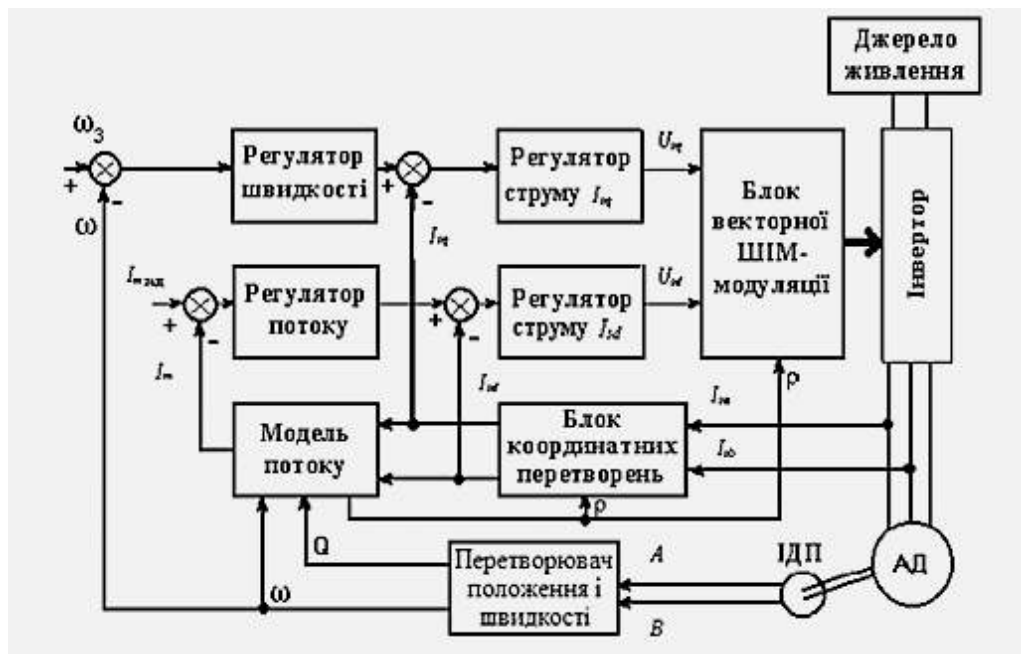


Рис. 1. Структура асинхронного електропривода з векторним керуванням [6, с. 108]

І так, малий відсоток навантаження – до 25%. Двигун працює далеко від номінальної потужності, що може призвести до зниження ефективності (ККД). Перевитрати енергії на внутрішні втрати двигуна (наприклад, на магнітні втрати), зростання тепловиділення без суттєвої корисної роботи. Такий режим зустрічається у випадках, коли обладнання простоє або виконує легку роботу, наприклад, системи вентиляції.

Середнє часткове навантаження – 25 % - 75 %. Це оптимальний режим для більшості двигунів. У цьому режимі співвідношення між споживанням енергії та корисною роботою наближається до найбільш ефективного. При довготривалій роботі на середніх навантаженнях можливий нерівномірний знос компонентів двигуна. Найчастіше використовується у більшості промислових або побутових систем (насоси, конвеєри).

І нарешті – високе часткове навантаження – 75 % - 100 %. Тут двигун працює наближено до своєї номінальної потужності, досягаючи майже максимальної ефективності. Небезпека перегріву та підвищеного зносу у разі тривалої роботи близько до 100% навантаження. Часто використовується в умовах, де потребується майже повна потужність двигуна на тривалих періодах (промислові машини, транспорт).

Для більш точного опису залежності ККД від часткового навантаження використовують емпіричні формули та графіки, які отримують в результаті експериментальних досліджень для конкретного типу двигуна.

Найчастіше для опису залежності ККД від навантаження використовують **поліноми** або **степеневі функції**. Залежність ККД (η) від відносного навантаження (x) може бути представлена у вигляді полінома n -го степеню:

$$\eta(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_n + x^n \quad (6)$$

де $\eta(x)$ – ККД при відносному навантаженні x ; x – відносне навантаження (відношення фактичного навантаження до номінального); $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коефіцієнти полінома.

Знання залежності ККД від навантаження дозволяє вибрати такий режим роботи, при якому ККД буде максимальним, що дозволить зменшити витрату палива або енергії; прогнозувати ефективність двигуна в різних умовах роботи; розробляти більш ефективні двигуни.

Метод режимів часткового навантаження має ряд особливостей:

- 1) на низьких навантаженнях ефективність зазвичай знижується через високі внутрішні втрати. Оптимальний рівень споживання досягається при 50–75% навантаження;
- 2) на малих і високих навантаженнях двигун може нагріватися більше через неефективну роботу, що підвищує вимоги до охолодження;
- 3) тривала робота при малих навантаженнях може призвести до передчасного зносу двигуна через нерівномірне навантаження на елементи.

Наступний метод енергоефективності роботи двигуна – синхронізація з **вимогами навантаження на двигун**. Суть цієї концепції полягає в тому, щоб забезпечити роботу двигуна з найвищою ефективністю, адаптуючи його до змін у рівні навантаження або робочих умовах. **Це процес** налаштування або автоматичного регулювання роботи двигуна відповідно до поточних потреб у потужності, тобто робота двигуна постійно налаштовується таким чином, щоб максимально ефективно відповідати поточному навантаженню. Іншими словами, двигун працює з оптимальною потужністю, не перевантажуючись і не працюючи вхолосту. Основні аспекти цього методу такі: у багатьох системах навантаження на двигун може варіюватися в залежності від умов експлуатації. Синхронізація передбачає адаптацію параметрів двигуна (наприклад, швидкості обертання або струму) так, щоб споживати саме ту кількість енергії, яка необхідна для поточного навантаження.



Системи синхронізації допомагають уникнути енергетичних втрат, що виникають, коли двигун працює з невідповідною потужністю. Наприклад, двигун при малих навантаженнях може споживати більше енергії, ніж потрібно, якщо не синхронізований з робочими умовами. Один із способів досягнення синхронізації – це використання частотних перетворювачів, які можуть регулювати швидкість обертання двигуна в залежності від навантаження, що дозволяє йому працювати на різних швидкостях з високою ефективністю. Синхронізація з навантаженням також забезпечує захист двигуна від перевантажень і недовантажень, які можуть призвести до перегріву або зносу його компонентів. Система моніторингу здатна автоматично регулювати потужність, щоб підтримувати оптимальний режим роботи. Це дозволяє двигуну функціонувати з максимальною ефективністю, не виходячи за межі оптимальних параметрів, а також зменшує кількість циклів пусків і зупинок, що позитивно впливає на його довговічність.

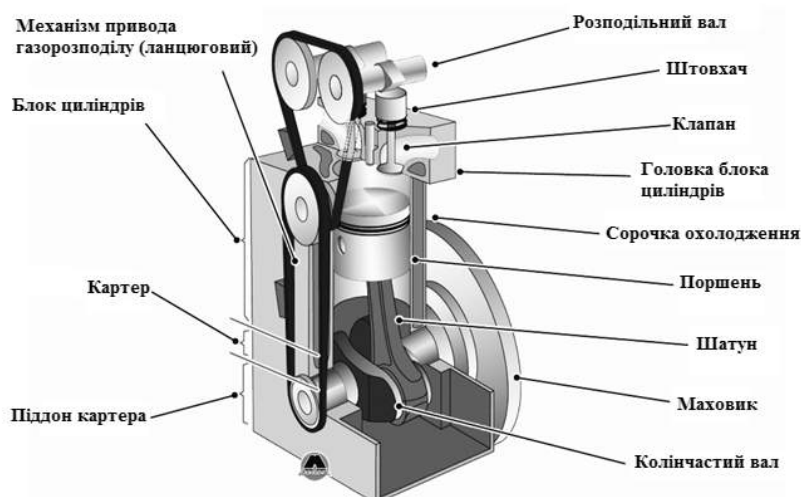


Рис. 2. Схема роботи системи синхронізації двигуна [11]

Переваги цього методу полягають у тому, що при належній синхронізації двигун споживає менше електроенергії, що знижує експлуатаційні витрати.

Оскільки двигун працює відповідно до потреб, зменшується навантаження на його окремі компоненти, що сприяє подовженню терміну служби. Крім того, автоматична синхронізація допомагає уникнути перегрівів та інших проблем, які можуть виникнути через несумісність режимів роботи двигуна і навантаження. Застосовують цей метод в промислових двигунах, електротранспорті та у вентиляційних системах.

Стосовно покращеного управління магнітним потоком двигуна, методу, який дозволяє більш точно контролювати їх швидкість і момент обертання, то цей підхід зазвичай застосовується до асинхронних (індукційних) або синхронних двигунів з постійними магнітами, щоб підвищити ефективність роботи та динамічні характеристики.

Тут основна ідея полягає в тому, що керування двигуном відбувається за рахунок регулювання векторів магнітного поля, що утворюються в статорі та роторі. На відміну від традиційних методів, що просто регулюють напругу або струм двигуна, покращене управління магнітним потоком дозволяє відокремити контроль за швидкістю обертання (моментом) і величиною магнітного потоку, що проходить через двигун.

Основні переваги цього методу полягають у тому, що він дозволяє двигуну працювати з високою ефективністю при різних навантаженнях, оптимізує подачу енергії до двигуна, що може знизити витрати на електроенергію, надає можливість зменшити теплові втрати та збільшити ресурс двигуна.

Принцип роботи цього методу полягає в тому, що струм, який подається на двигун, розбивається на дві ортогональні компоненти: магнітний потік, який відповідає за створення необхідного магнітного поля у двигуні та крутний момент, що відповідає за створення обертального моменту – все це дозволяє незалежно регулювати момент і магнітний потік двигуна, що робить управління точнішим і динамічнішим.

Для розрахунку магнітного потоку можна скористатись формулою у спрощеному вигляді, але в ній не враховано багато факторів, які впливають на магнітний потік. Для більш точних розрахунків необхідно використовувати більш складні математичні моделі.

Наведемо спрощену формулу для розрахунку магнітного потоку:

$$\Phi = N * \frac{I}{R_m}, \quad (7)$$

де Φ – магнітний потік (Вб), N – число витків обмотки, I – струм в обмотці (А), R_m – магнітний опір ланцюга (Гн).

Наостанок розглянемо управління моментом двигуна – процес регулювання крутного моменту, який виробляється двигуном, з метою забезпечення оптимальної роботи та ефективності системи. Крутний момент (або момент сили) – це сила обертання, яку створює двигун на вихідному валу.



Управління моментом має велике значення як для двигунів внутрішнього згоряння, так і для електричних двигунів. Основні принципи управління моментом двигуна: вимірювання моменту (використання різних датчиків, щоб виміряти поточний момент або інші величини, пов'язані з моментом, такі як струм (для електричних двигунів), положення дроселя (для двигунів внутрішнього згоряння), швидкість обертання валу, тиск у впускному колекторі тощо); регулювання моменту (момент контролюється через зміну величини електричного струму або напруги, що подається на двигун, а також фазового кута у випадку змінного струму); зворотній зв'язок (алгоритми зворотного зв'язку, наприклад, пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори, які постійно порівнюють поточний крутний момент з цільовим і коригують параметри, щоб підтримувати момент на необхідному рівні); система контролю (в електричних транспортних засобах використовується інвертор або контролер для регулювання потужності, яка подається на двигун, що дозволяє точно контролювати момент в залежності від вимог).

Існує три способи управління моментом:

1. Пряме управління моментом, ця методика дозволяє здійснювати швидко та точно керування моментом і швидкістю обертання двигуна, без необхідності вимірювання поточної швидкості. Суть цього способу полягає в тому, що замість того, щоб задавати бажану швидкість або положення, ми безпосередньо задаємо необхідний момент сили, який потрібно прикласти до валу двигуна або іншого виконавчого механізму. Це досягається за допомогою спеціальних датчиків (енкодерів, тахометрів) та контролерів, які постійно відстежують фактичний момент і порівнюють його з заданим.

2. Векторне управління використовується в синхронних і асинхронних електродвигунах, воно дозволяє розкласти електромагнітний момент на складові, що спрощує керування і підвищує точність регулювання моменту та швидкості;

3. Управління на основі моделі двигуна: створюється математична модель двигуна (визначення математичного опису двигуна на основі його параметрів та фізичних законів.), яка дозволяє прогнозувати його поведінку під впливом різних параметрів. Це дозволяє системі управління швидше й ефективніше реагувати на зміну умов роботи.

В основі математичної моделі двигуна лежить опис його фізичних процесів за допомогою математичних рівнянь. Ці рівняння можуть описувати електричні, магнітні, механічні та теплові процеси, що відбуваються в двигуні.

Математична модель електродвигуна, зазвичай, описує його динамічну поведінку, що дає змогу аналізувати та симулювати його роботу.

Одним з найпростіших і найпоширеніших прикладів є модель електродвигуна постійного струму (DC), котра базується на законах Кірхгофа та законі Фарадея [6, с. 10]. Ця модель описує зв'язок між електричними величинами (напруга, струм) і механічними (швидкість, крутний момент). Вона складається з двох основних рівнянь: електричного та механічного. Електричне рівняння характеризує якорну обмотку двигуна, враховуючи прикладену до нього напругу, втрати напруги на активному опорі обмотки та проти-ЕРС, що виникає під час її обертання:

$$U = I_a \cdot R_a + E_a , \quad (8)$$

де U – напруга, що подається на якір (В), I_a – струм якоря (А), R_a – активний опір якоря (Ом), E_a – проти-ЕРС, яка залежить від швидкості обертання двигуна.

Проти-ЕРС визначається за формулою:

$$E_a = K_e \cdot \omega , \quad (9)$$

де K_e – коефіцієнт проти-ЕРС (В·с/рад), ω – кутова швидкість обертання ротора (рад/с).

Механічне рівняння описує механічну частину двигуна: крутний момент і його вплив на рух ротора [6, с. 14]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_{load} - M_{fric} , \quad (10)$$

де J – момент інерції ротора (кг · м²); $\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення (рад/с²); M_{em} – електромагнітний крутний момент (Н·м), який створюється двигуном; M_{load} – крутний момент навантаження (Н·м); M_{fric} – крутний момент сил тертя (Н·м).

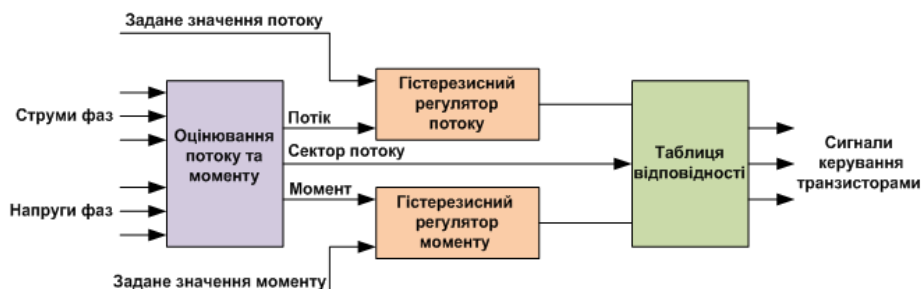


Рис. 3. Схематичне зображення системи прямого управління моментом [13]



Електромагнітний крутний момент пов'язаний зі струмом якоря за допомогою коефіцієнта крутного моменту:

$$M_{em} = K_t \cdot I_a, \quad (11)$$

де K_t – коефіцієнт крутного моменту (Н·м/А). Слід зауважити, що для двигунів постійного струму K_e і K_t є рівними.

Для створення математичної моделі двигуна можуть бути використані різні формули та рівняння, зокрема закон Кірхгофа (для опису електричних кіл двигуна), закон електромагнітної індукції (для опису магнітних процесів у двигуні), закон Ньютона (для опису механічних процесів у двигуні), рівняння теплового балансу (для опису теплових процесів у двигуні.)

Математична модель дозволяє:

- 1) передбачити поведінку двигуна в різних умовах, що дає змогу розробляти більш ефективні алгоритми управління (створення необхідних керуючих сигналів для досягнення заданих характеристик двигуна);
- 2) адаптувати систему управління до змінних умов експлуатації, таких як зміна навантаження, температура тощо.

Таким чином, управління моментом двигуна є ключовим елементом для забезпечення стабільної та ефективної роботи як у транспортних засобах, так і в промислових системах, де точність регулювання та економія енергії мають вирішальне значення.

Висновок. Енергоефективність – це мистецтво витискати максимум із кожного джоуля: двигун споживає менше електрики, але видає ту саму силу. Ключовим індикатором цього процесу виступає коефіцієнт корисної дії (ККД) – показник, що демонструє частку електроенергії, перетвореної на механічну роботу. Чим ближче ККД до 100%, тим менше енергії губиться у вигляді тепла та втрат, і тим ефективніше працює двигун.

Рациональне керування електродвигуном відіграє вирішальну роль у покращенні його енергоефективності та продуктивності. Це забезпечується шляхом адаптації режиму роботи двигуна до актуальних вимог, що сприяє зменшенню зайвих витрат енергії та запобігає передчасному зношенню обладнання. Крім того, оптимізація керування прямо впливає на зменшення шуму й вібрації. До того ж, підвищення енергоефективності електродвигунів – це не лише технічне завдання, а й стратегічний напрям для економії коштів та зменшення впливу на довкілля. Найбільший ефект дає **комплексний підхід**: вибір сучасних двигунів, застосування частотних перетворювачів, оптимізація систем живлення та регулярне технічне обслуговування.

Література:

1. Андуря Б. Є., Васюк В. В. Удосконалення асинхронного електроприводу з векторним керуванням для сушильної установки барабанного типу : тези // Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та управляючі системи в АПК : тези доповідей 76-ї наук.-практ. конф. студ. (м. Київ, 20 квітня 2023 року). Київ : НУБіП, 2023. С. 30.
2. Бруц С., Каспрук В. Сучасні тенденції розвитку електродвигунів : тези / С. Бруц, В. Каспрук // Актуальні задачі сучасних технологій : мат. XIII міжнар. наук.-практ. конф. (м. Тернопіль, 11-12 грудня 2024). Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя. 2024. С. 310.
3. Далека В. Х. Інформаційні технології в підвищенні енергоефективності електричних машин / В. Х. Далека, Н.І. Кульбашна, А.І. Кузнецов // Комунальне господарство міст : журнал. 2020. Т. 4, вип. 157. С. 172-177.
4. Донець О. В., Колотіло В. І. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / О. В. Донець, В. І. Колотіло ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с.
5. Електропривод : підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко [та ін.] ; за ред. Ю. М. Лавріненка. Вид. 2-ге, доповн. і переробл. Київ: Ліра-К, 2009. 504 с.
6. Закладний О. М. Електропривод : навч. посібник / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний. Київ: НТУ «КП», 2008. 316 с. : іл.
7. Модернізація електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання в контексті підвищення їх енергоефективності / М. М. Федірко, Р. Ф. Бруханський, В. Я. Брич, Р. Р. Олішинська // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит : загальнодерж. наук.-вироб. та інформ. журнал. Харків: Харківський політехнічний інститут, 2023. № 5-6. С. 27-40.
8. Панкратов А. І. Системи керування електроприводами. : навч. посіб. з дисц. «Системи керування електроприводами» (для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» денної і заочної форми навчання) / А. І. Пакратов. Вид. 2-ге. Краматорськ: ДДМА, 2018. 225 с.
9. Толмачов С. Т., Ільченко О. В. Підвищення енергоефективності асинхронних двигунів в Україні: стан, можливості та перспективи // Вісник Криворізького національного університету. 2023. Вип. 56. С. 133-138.
10. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навч. посібник / О. І. Толочко. Київ : НТУ «КП», 2016. 151 с.
11. Що потрібно для роботи двигуна. URL: <https://intime.ua/scho-potribno-dlya-roboty-dvyhuna/>
12. Assessment of increased energy efficiency of vehicles with a rational reduction of engine capacity / M. Podrigalo, Y. Tarasov, M. Kholodov [та ін.] // Автомобільний транспорт: зб. наук. пр. Харків: ХНАДУ, 2022. Вип. 51. С. 26–34.
13. Direct torque control. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_torque_control

References:

1. Andura, B. Ye., Vasyuk, V. V. (2023). Udoskonalennya asynkhronnoho elektropyvodu z vektornym keruvannyam dlya sushylnoyi ustanovky barabannoho typu [Improvement of the vector-controlled asynchronous electric drive for a drum-type drying unit]. *Enerhozabezpechennya*,



elektrotekhnolohiyi, elektrotekhnika ta upravlyayuchi systemy v APK – Energy supply, electrical technologies, electrical engineering and control systems in the agricultural sector : tezy dopovidey 76-yi nauk.-prakt. konf. stud. (m. Kyiv, 20 kvitnya 2023 roku). Kyiv : NUBiP, (p. 30) [in Ukrainian]

2. Bruts, S., Kaspruk, V. (2024). Suchasni tendentsiyi rozvytku elektrodvyhuniv [Modern trends in the development of electric motors]. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohiy – Actual tasks of modern technologies* : mat. XIII mizhnar. nauk.-prakt. konf. (m. Ternopil, 11-12 hrudnya 2024). Ternopil : TNTU im. I. Pulyuya, (p. 310) [in Ukrainian]

3. Daleka, V. Kh., Kulbashna, N. I., Kuznetsov, A. I. (2020). Informatsiyni tekhnolohiyi v pidvyshchenni enerhoefektyvnosti elektrychnykh mashyn [Information technologies in increasing the energy efficiency of electric machines]. *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities* : zhurnal. (Vol. 4, issue 157), (Pp. 172-177) [in Ukrainian]

4. Donets, O. V., Kolotilo, V. I. (2021). Teoriya elektropryvoda [Theory of electric drive] : konspekt lektsiy. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, (148 p.) [in Ukrainian]

5. Lavrinenko, Yu. M., Marenko, O. S., Savchenko, P. I., Synyavskyy O. Yu., Voytyuk, D. H., Lysenko, V. P. (2009). Elektropryvod [Electric drive] : pidruchnyk. Vyd. 2-he, dopovn. i pererobl. Kyiv : Lira-K, (504 p.) [in Ukrainian]

6. Zakladnyy, O. M., Prokopenko V. V., Zakladnyy O. O. (2008). Elektropryvod [Electric drive] : navchalnyy posibnyk. Kyiv : NTU «KPI», (316 p.) [in Ukrainian]

7. Fedirko, M. M., Brukhanskyy, R. F., Brych, V. Ya., Olishynska, R. R. (2023). Modernizatsiya elektropryvodu nasosnykh ahrehativ merezhi tsentralizovanoho teplopostachannya v konteksti pidvyshchennya yikh enerhoefektyvnosti [Modernization of the electric drive of pumping units of the district heating network in the context of increasing their energy efficiency]. *Enerhozberezhennya. Enerhetyka. Enerhoaudyt – Energy saving. Energy. Energy audit* : zahalnoderzh. nauk.-vyrob. ta inform. zhurnal. Kharkiv : Kharkivskyy politekhnichnyy instytut, (Num. 5-6), (Pp. 27-40) [in Ukrainian]

8. Pankratov, A. I. (2025). Systemy keruvannya elektropryvodamy [Electric drive control systems] : navchalnyy posibnyk. Second edition. Kramatorsk : DDMA, (225 p.) [in Ukrainian]

9. Tolmachov, S. T., Ilchenko, O. V. (2023). Pidvyshchennya enerhoefektyvnosti asynkhronnykh dvyhuniv v Ukrayini: stan, mozhlyvosti ta perspektyvy [Increasing the energy efficiency of asynchronous motors in Ukraine: state, opportunities and prospects]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu - Bulletin of Kryvyi Rih National University*. (Issue 157), (Pp. 133-138) [in Ukrainian]

10. Tolochko, O. I. (2016). Modelyuvannya elektromekhanichnykh system matematychno modelyuvannya system asynkhronnoho elektropryvodu [Modeling of electromechanical systems, mathematical modeling of asynchronous electric drive systems] : navchalnyy posibnyk. Kyiv : NTU «KPI», (151 p.) [in Ukrainian]

11. Shcho potribno dlya roboty dvyhuna [What is necessary for the operation of the engine]. URL: <https://intime.ua/scho-potribno-dlya-roboty-dvyhuna/> [in Ukrainian]

12. Podrigalo, M., Tarasov, Y., Kholodov, M. (2022). Assessment of increased energy efficiency of vehicles with a rational reduction of engine capacity. *Avtomobilnyy transport - Automobile transport*: zb. nauk. pr. Kharkiv: KhNADU. (Issue 51), (Pp. 26-34) [in English]

13. Direct torque control. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_torque_control [in English]