

A mathematical model of the movement of the brush on the glass was developed for the case of close to uniform pressure distribution along the length of the brush, taking into account the unevenness of the law of movement associated with the operation of the transmission mechanism. The influence of the material properties of the rubber element on the quality of glass cleaning and the obtained values of the values characterizing the elastic and dissipative properties of the neck in the limit modes of the system are considered. The possibility of regeneration self-oscillations is shown when the dissipative properties of the neck are reduced as a result of wear or an aggressive environment.

The processes of dry friction and hydraulic movement resistance occurring in the system are clarified, the limits of possible visually noticeable self-oscillations depending on the parameters of the friction mode and system operation are shown. It was found that the presence in the system of the possibility of regenerative self-oscillations in critical operating modes requires the introduction of micro-oscillations into the law of movement of the brush on the glass, which can effectively reduce the amplitudes of these self-oscillations.

Analytical dependencies are proposed for calculating the parameters of the software, which implements the management of the dynamic characteristics of the system by superimposing the law of motion of micro-oscillations. The necessary hardware and software requirements for the controller are shown, as well as the possibility of saving the windshield wiper control unit as a functional unit of the mechatronic system for ensuring the comfort of movement.

mechatronic system, modeling, window cleaning mechanism, car, brushes, rubber element, transmission mechanism, deflection angle

Одержано (Received) 24.03.2023

Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023

Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023

УДК 621.317

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.176-186](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.176-186)

Д.М. Квашук, доц., канд. екон. наук, докторант, **В.Ю. Ларін**, проф., д-р техн. наук, **С.Ф. Філоненко**, проф., д-р техн. наук, **А.П. Стахова**, доц., канд. техн. наук

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

e-mail: dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua,

vitalii.larin@npp.nau.edu.ua,

serhii.filonenko@npp.nau.edu.ua, anzhelika.stakhova@npp.nau.edu.ua

Моделювання витрат та вимірювання електричної енергії електродвигунів

Діяльність з визначення енергоефективності електродвигунів включає кілька етапів робіт. До них належать моделювання експлуатації двигунів за допомогою спеціалізованих програмних продуктів, що дозволяє визначити необхідні параметри споживання електричної енергії, навантаження, та обертальні параметри у різних режимах роботи. Проте, найефективнішим є спосіб отримати реальні робочі характеристики електродвигуна на випробувальних стендах. Це зумовлено багатьма факторами, від механічних несправностей до невідповідності технічних характеристик заявлених виробником. Разом з тим, як для першого, так і іншого способу проблема полягає в оптимізації вимірювального обладнання, що потребує зменшення похибки, збільшення швидкодії та чутливості вимірювальних перетворювачів. До параметрів, які вимагають особливої уваги можна віднести витрати електричної енергії, які в окремих сферах промисловості є вирішальними під час проектування технологічних майданчиків, визначення промислової політики, обсягів виробництва, тощо. У даній статті запропоновано спосіб встановити залежність між цими параметрами, практичне значення якого, в різних режимах роботи електродвигуна дасть можливість оцінити як економічну ефективність електричної машини так і можливі ризики, що пов'язані із безпечною подальшою експлуатацією, строком експлуатації та можливостями створювати необхідні моменти прискорення при заданих навантаженнях.

вимірювання електричної енергії, обертальний момент, лічильник електричної енергії, вимірювання, математична модель, перетворювач, зворотній зв'язок

© Д.М. Квашук, В.Ю. Ларін, С.Ф. Філоненко, А.П. Стахова, 2023

Постановка проблеми. Необхідність забезпечення енергоефективності та раціонального використання електричних машин призвела до потреб розробки методик питомої витрати електроенергії під час здійснення технологічних процесів. Враховуючи, що найенергоємнішим технологічним елементом на багатьох підприємствах є електродвигуни, на які доводиться до близько 60% всієї споживаної підприємством електроенергії, а їх комплектуючі досить часто використовуються такі, що вже морально застаріли, постає питання реструктуризації електроенергетичного обладнання промислового комплексу України, що дозволить скоротити час для приведення у відповідність вітчизняних виробничих норм до Європейських стандартів.

Усе це, та багато інших проблем пов'язаних із обліком та прогнозуванням витрат електричної енергії в різних режимах роботи електродвигунів потребує покращення засобів моделювання витрат електричної енергії, як на рівні апаратної частини, так і методологічних підходів до вирішення цієї проблеми загалом. Вже існуючі прилади значно покращують роботу з обліком електричної енергії, але разом з тим існує необхідність в збільшенні їх точності та швидкодії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Враховуючи, що цифрові лічильники електроенергії використовують середньоквадратичні значення струмів та напруг для обчислення складових потужності та оцінки спожитої енергії, проблема не визначення показників під час миттєвих навантажень, пов'язана із інтегральним обчисленням середньоквадратичних значень за миттєвими відліками часу набула широкого наукового розвитку [1], [2], [3], [4].

Згідно з Міжнародним протоколом вимірювання та верифікації (IPMVP), можна виділити невизначеність вимірювання, як одну із складових похибки, яка може виникнути при під час миттєвих навантажень електродвигунів, які можуть бути не визначені лічильником електричної енергії [5].

Миттєві навантаження, які швидко змінюються з часом, складно виміряні традиційними лічильниками електроенергії. Це пояснюється тим, що лічильники зазвичай вимірюють загальну кількість спожитої енергії за певний період часу. Щоб вирішити цю проблему, були розроблені розумні лічильники з розширеними можливостями вимірювання, які можуть вимірювати як споживання енергії, так і миттєві навантаження. Ці лічильники надають більш точну та детальну інформацію про те, як використовується енергія, і можуть допомогти комунальним підприємствам краще керувати своїми мережами, щоб забезпечити надійне та ефективне обслуговування [6]. Порівняти часові характеристики миттєвих навантажень, які пов'язані з роботою електричних машин, а також реактивні витрати електричної енергії задача досить складна. По перше залежно від моделі та типу лічильника максимально допустимі миттєві сплески навантажень можуть відрізнятися. Зазвичай виробники лічильників вказують так коефіцієнт перевантаження, який показує, наскільки максимально допустиме навантаження може перевищувати номінальне. Однак, навіть при дотриманні максимально допустимих значень миттєві сплески навантажень можуть викликати проблеми точного контролю навантаження.

Існує два підходи до визначення похибок лічильника: метод перевірки із еталонним лічильником та метод стабілізованої потужності, що задається. Тоді похибка лічильника, може бути визначена за формулою [1]:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{C_{\Pi} N_{\Pi} - C_{ET} N_{ET}}{C_{ET} N_{ET}}, \quad (1)$$

де C_{Π} – постійна лічильника, що перевіряється;

C_{ET} – стала еталонного лічильника;

N_{ET} , N_{II} – число імпульсів з випробувального виходу і еталонного відповідно (за час вимірювання).

Недоліком такого обчислення похибки є значна методична похибка дискретності пов'язаної з квантуванням безперервного часу дискретними імпульсами, що виникає через те, що імпульси з повіреного та еталонного лічильників не завжди синхронізовані між собою. Тому, інтервал часу, протягом якого підраховуються імпульси, синхронізують із сигналом випробувального виходу того із лічильників, частота якого менша. В такому випадку похибка дискретності дорівнюватиме нулю, але для другого лічильника вона залишиться.

Для зменшення даної похибки збільшують кількість імпульсів з цього лічильника, збільшувати час вимірювань. Але такий даний метод є незручним при масовому виробництві лічильників, де час операції відіграє значну роль. Цей недолік також можна нівелювати, якщо замість підрахунку кількості імпульсів вимірювати їхній період. Тоді відносну похибку лічильника можна визначити за формулою:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{\frac{C_{II} - C_{ET}}{T_{II}}}{\frac{C_{ET}}{T_{ET}}}, \quad (2)$$

де T_{II}, T_{ET} – періоди імпульсів з випробувального виходу і еталонного відповідно.

Недоліком такого методу є складність встановлення вихідних сигналів генератора в точно задані значення. Крім того, у даному методі використовувати генератор та зразковий лічильник.

Метод стабілізованої потужності вимагає еталонного ватметра, амперметрів та вольтметрів, а також еталонних перетворювачів струму та напруги. Зазвичай, ці прилади входять до складу генератора, що дозволяє точно задати та підтримувати необхідний режим на постійному рівні.

Для вимірювання використовують показання лічильника, що повіряється, через тривалість періодів, або частоту проходження імпульсів. Щоб зменшити випадкові похибки, які можуть виникати від шумів на сигналі з випробувального виходу, зазвичай вимірюють середнє значення періоду за кілька періодів імпульсів. Це дозволяє визначити похибку лічильника, що повіряється, за наступною формулою:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{\frac{C_{II} - P_{ET}}{T_{II}}}{P_{ET}}, \quad (2)$$

де P_{ET} – потужність, що задається генератором, яка береться безпосередньо з установок генератора, який задає її точно в межах свого класу точності.

В роботі [7] досліджувались похибки індукційних лічильників електричної енергії, а також електричні втрати в асинхронному двигуні в умовах високого рівня гармонік у кривих струму та напруги при використанні окремих частотних перетворювачів. Це дозволило встановити, що при одних і тих же значеннях навантаження на електродвигун в умовах несинусоїдальних режимів у ланцюгах з ШІМ, основна похибка індукційних лічильників електроенергії в кілька десятків разів перевищує їх основну похибку при синусоїдальному режимі. За основу було узятو спеціально розроблений електронний лічильник, який забезпечує високу точність обчислення поточного значення електроенергії $W(t)$ порівняно з індукційним лічильником:

$$W(t) = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt, \quad (3)$$

де $u(t)$ – миттєве значення напруги при навантаженні;

$i(t)$ – миттєве значення струму навантаження;

t – поточний час вимірювань.

Лічильник використовує перемножувач миттєвих значень, імпульсний перемножуючий пристрій, імпульсний інтегратор та цифровий лічильник імпульсів. Завдяки цим компонентам вимірювання електроенергії можуть мати сумарну похибку в близько кількох десятках часток відсотка (0,1-0,2%), навіть в умовах високого рівня вищих гармонік на частотах кратних 50 Гц, аж до частот кілька десятків кілогерц [7].

Таким чином, реактивна складова, що формується під час роботи електродвигуна змінного струму, накладаючись на додаткові імпульсні фактори впливу, в залежності від окремих гармонік напруги може бути належним чином не визначена. Для цього під час вимірювання електричної енергії, яка споживається електричними двигунами, незважаючи на можливі засоби компенсації реактивної напруги, можна збільшити кількість інформативних параметрів та встановити корегуючий зворотній зв'язок з вихідним сигналом лічильника. Таким параметром, може виступати обертальний момент електродвигуна, або кількість миттєвих імпульсних навантажень за певний проміжок часу.

Постановка завдання. Дослідити залежність між точністю лічильника електричної енергії та імпульсними характеристиками потужності електродвигунів змінного струму в різних режимах роботи.

Залежність імпульсних навантажень асинхронного електродвигуна та точності лічильника електричної енергії.

Для визначення залежності точності вимірювального лічильника від імпульсних характеристик навантаження на електродвигун [7], розглянемо технічні характеристики моделі асинхронного електродвигуна з урахуванням [8]:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= r(1 + T_s' s) i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\alpha} - k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ u_{s\beta} &= r(1 + T_s' s) i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\alpha} + p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\beta} - p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p k_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \quad J \frac{d\omega_{\text{Mex}}}{dt} = M - M_c. \end{aligned} \quad (4)$$

де $u_{s\alpha}$ – напруга ротора;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – струм ротора, статора;

$u_{s\beta}$ – напруга статора;

$\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – потокощеплення обмоток ротора та статора;

$r = R_s + R_r k_r^2$ – еквівалентний опір;

R_s, R_r – активні опори статора та ротора, відповідно;

$k_r = \frac{L_m}{L_r}$ – коефіцієнт, що виражає відношення індуктивності повітряного зазору

та індуктивності ротора;

$T'_S = \frac{L'_S}{r}$ – еквівалентна постійна часу статора;

$L'_S = L_s - \frac{L_m^2}{L_m}$ – еквівалентна індуктивність статора;

$S = \frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання.

Визначивши із (4) напруги статора та ротора, можна змодельовати роботу електродвигуна в сталому режимі (рис. 1), представивши перехідні процеси по напрузі асинхронного електродвигуна.

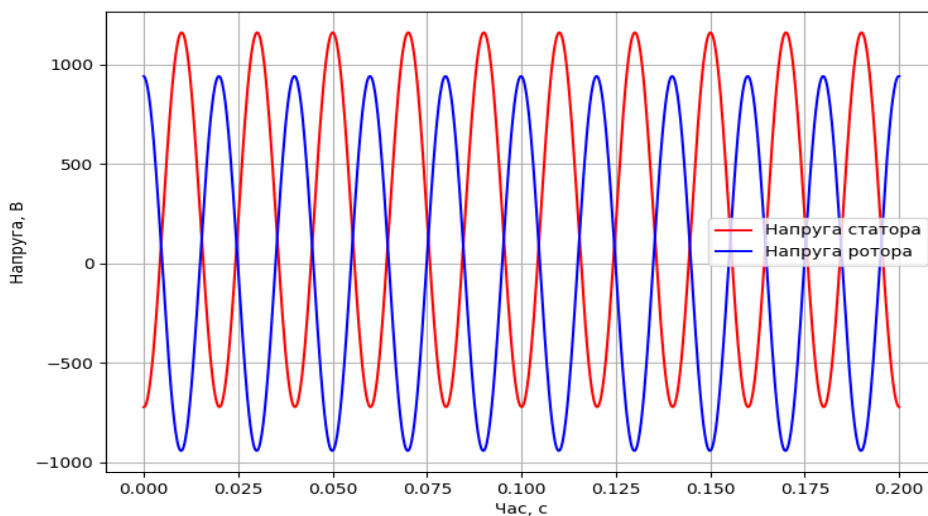


Рисунок 1 – Перехідні процеси однофазного асинхронного електродвигуна

Джерело: розроблено авторами

Щоб зрозуміти принцип дії однофазного асинхронного двигуна розкладемо пульсуюче магнітне поле на два однакових кругових поля, що мають амплітуду рівну $\frac{\Phi_{max}}{2}$ і обертаються в протилежні сторони з однаковою частотою:

$$n = \frac{f_1 \cdot 60}{p}, \quad (5)$$

де n – швидкість обертання магнітного потоку, об/хв частота обертання магнітного поля у прямому напрямку, об/хв;

f_1 – частота струму статора, Гц;

p – кількість пар полюсів.

Враховуючи залежність імпульсних характеристик напруги від точності лічильників електричної енергії, розглянемо вирази, що характеризують навантаження на валу електродвигуна (табл. 1) та структурну модель електричного лічильника разом із процесом вимірювального перетворення [9], (рис. 2).

Таблиця 1 – Характеристики основних параметрів роботи асинхронного електродвигуна

Формула	Позначення	
1	2	
$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{3U_f \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}}$	$I_{\text{ном}}$ - Номінальний струм статора; U_f - Напряга однієї фази; $\eta_{\text{ном}}$ - Ефективність роботи електродвигуна; φ - кута фази.	6)
$M_{\text{Em ном}} = M_{\text{ном}} + M_0 = M_{\text{ном}} + \frac{\Delta P_{\text{mech ном}} + \Delta P}{\omega_0}$	M_{Em} - номінальний момент; $M_{\text{ном}}$ - номінальний момент; M_0 - початковий момент; $P_{\text{mech ном}}$ - номінальна механічна потужність; ω_0 - кутова швидкість початкова; $\Delta P_{\text{mech ном}}$ - зміна механічної потужності при зміні навантаження на двигун	7)
$R_1 = \frac{\Delta P_1}{3I_1^2} = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{3I_1^2} = \frac{\frac{\Delta P_{\text{ном}}}{1 + K_3^2} - M_{\text{Em ном}} \omega_0 S_{\text{ном}}}{3I_1^2}$	R_1 - активний опір статора; I - струм споживання статора;	8)
$X_s = \frac{U_{s,\text{ном}}}{\sqrt{3}I_{s,\text{ном}}} \sin(\varphi_{s,\text{ном}} - \varphi_s)$	$U_{s,\text{ном}}$ - номінальна напряга живлення статора, $I_{s,\text{ном}}$ - номінальний струм статора, $\varphi_{s,\text{ном}}$ - номінальний кут зсуву фаз між напрягою та струмом в статорі, φ_s - кут зсуву фаз між напрягою та струмом в статорі при поточних умовах роботи двигуна.	9)

Джерело: розроблено авторами

Із запропонованого в роботі [9] розробленого цифрового лічильника електричної енергії, на рис. 2 можна спостерігати структуру вимірального перетворення.

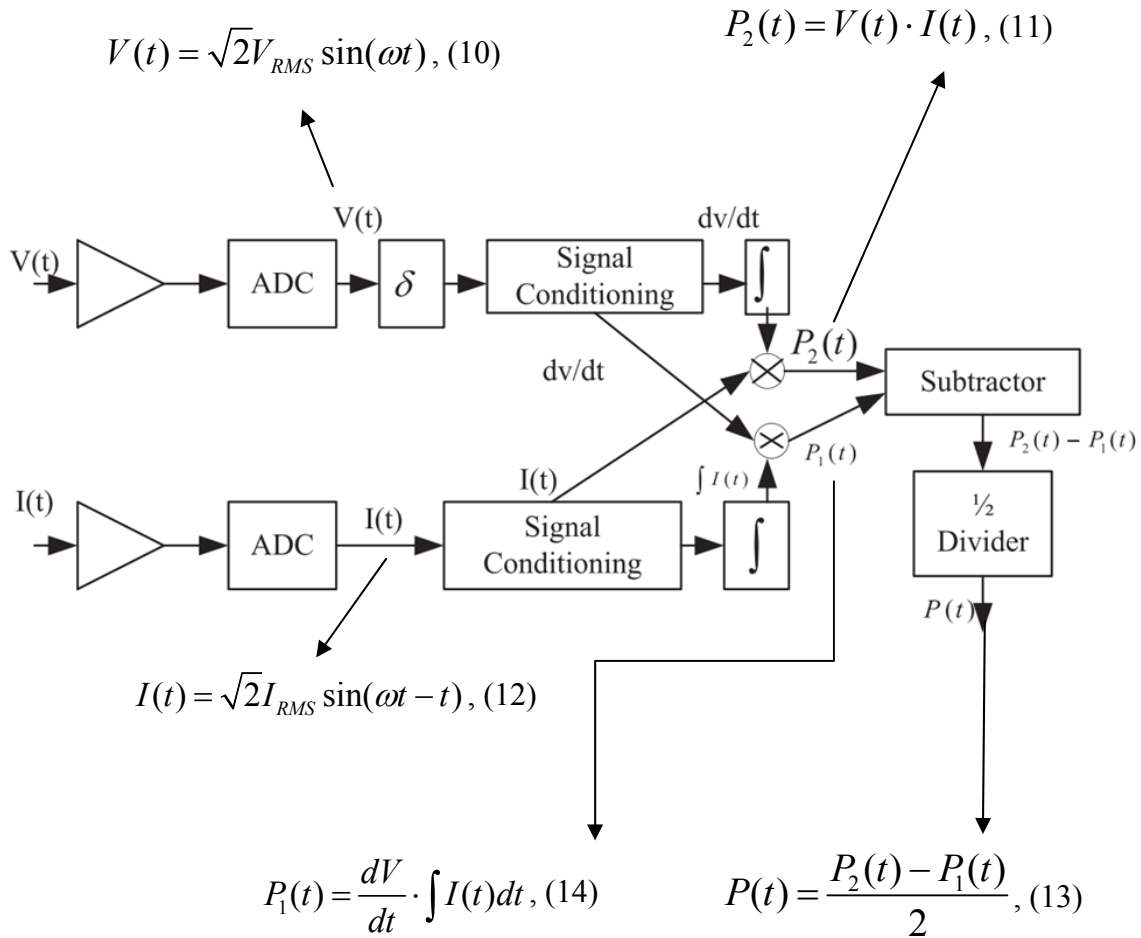


Рисунок 2 – Структурна схема вимірального перетворення електричного лічильника
Джерело: [9]

З урахуванням виразу (4) та рис. 1, який побудовано на його основі, перехідні характеристики струмів статора та ротора мають залежність від частоти струму, яка також визначається лічильником. А також, беручи до уваги дослідження імпульсного впливу на точність лічильника під час роботи асинхронного електродвигуна [7] та враховуючи, що миттєві імпульси можуть виникати під час пускових моментів та різних статичних моментів, інтегруючи складову, яка представлена виразами (11), (14) на рис. 2 можна доповнити зворотним зв'язком, який буде реалізувати визначення миттєвих імпульсів під час навантаження на роботу електродвигуна. Для цього необхідно в структуру передавальних ланцюгів додати фільтр, миттєвих імпульсів та лічильник їх кількості (рис. 3). Так, враховуючи абсолютну похибку лічильника, яка пов'язана із виникненням миттєвих імпульсів під час роботи електродвигуна, можна представити блок її корекції (рис. 3), який включає: 1 алгоритм корекції, побудований на основі підрахунку миттєвих імпульсів за певний час; 2. фільтру миттєвих імпульсів; 3 пристрою для корегування показників лічильника; 4. лічильника миттєвих імпульсів; 5. перетворювача обертового моменту електродвигуна.

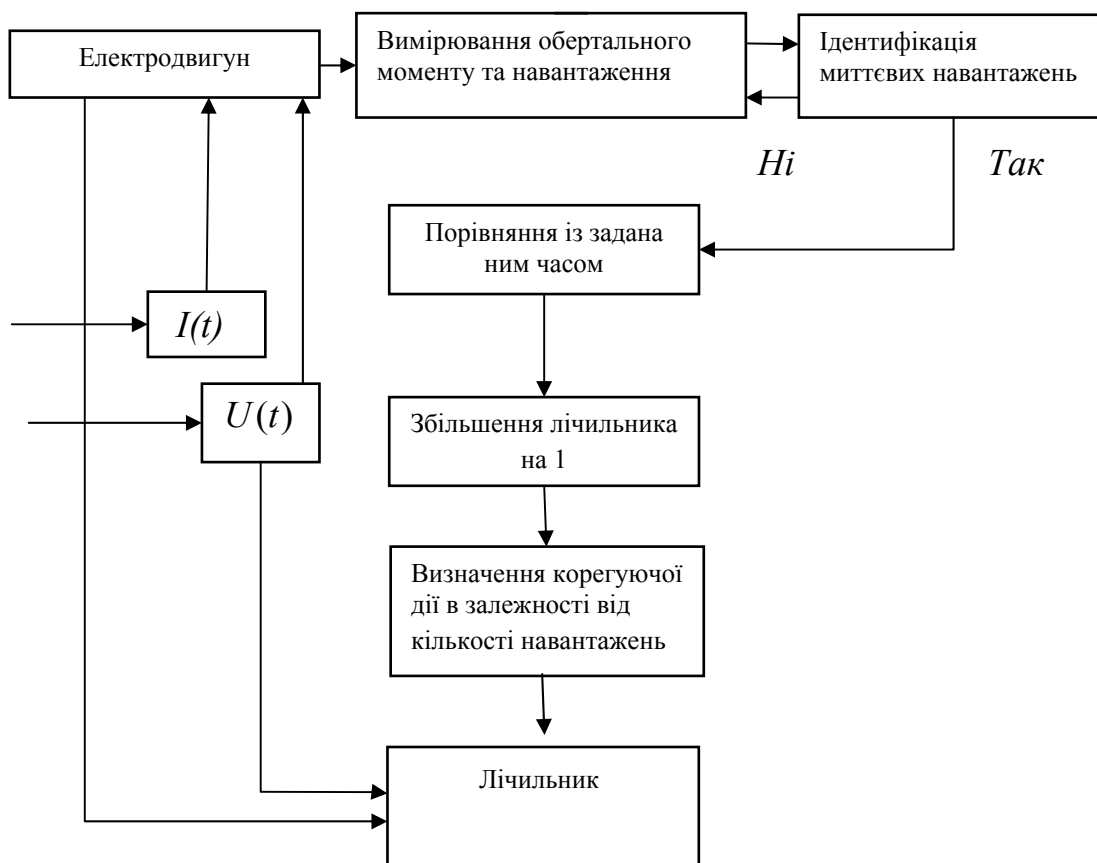


Рисунок 3 – Алгоритм корекції похибки лічильника електричної енергії з урахуванням миттєвих навантажень електродвигуна в процесі вимірювання витрат електричної енергії.

Джерело: розроблено авторами

Ідентифікувати миттєві імпульси, можна використовуючи перетворювачі обертальних моментів на базі тензометричної, або індуктивної технологій.

Залежність між кількісними характеристиками миттєвих навантажень за певний період часу та точністю лічильника можна отримати з урахуванням виразів (3), (1) та (7):

$$\frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f S \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt, \quad (15)$$

де m_1 – коефіцієнт корисної дії двигуна (ККД);

U_1^2 – квадрат напруги живлення статора;

r_2' – опір обмотки ротора;

p – кількість пар полюсів ротора;

f – частота живлення статора;

S – коефіцієнт форми статора;

r_1 – опір обмотки статора на одну фазу;

r_2' – реактивний опір обмотки ротора на одну фазу;

x_1 – реактивний опір обмотки статора на одну фазу;

x_2' – опір реактивної складової обмотки ротора на одну фазу.

Застосовуючи рівняння (15) в запропонованому алгоритмі (рис. 3) циклічно, за умов, його вірності, коли механічні імпульси будуть співпадати з електричними, можна збільшувати лічильник таких імпульсів на 1 за певний час дискретизації сигналу. Таким чином, створивши новий інформаційний параметр k_m , який буде дорівнювати кількості отриманих миттєвих навантажень за сталий проміжок часу.

Врахувавши його у виразі (4), отримуємо систему рівнянь із додатковим корегуючим параметром:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= r(1 + T'_s s) i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\alpha} - k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ u_{s\beta} &= r(1 + T'_s s) i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\alpha} + p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\beta} - p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p k_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \\ J \frac{d\omega_{\text{Mex}}}{dt} &= k_m \left[\frac{3}{2} p k_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_c \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким чином, змінна k_m відповідає за коефіцієнт пропорційності між обертальним моментом, струмом та кількістю миттєвих навантажень.

Змодельовавши вираз (16) для умовних параметрів електричної машини, отримуємо додаткову величину, що характеризує точність лічильника електричної енергії рис. 4.

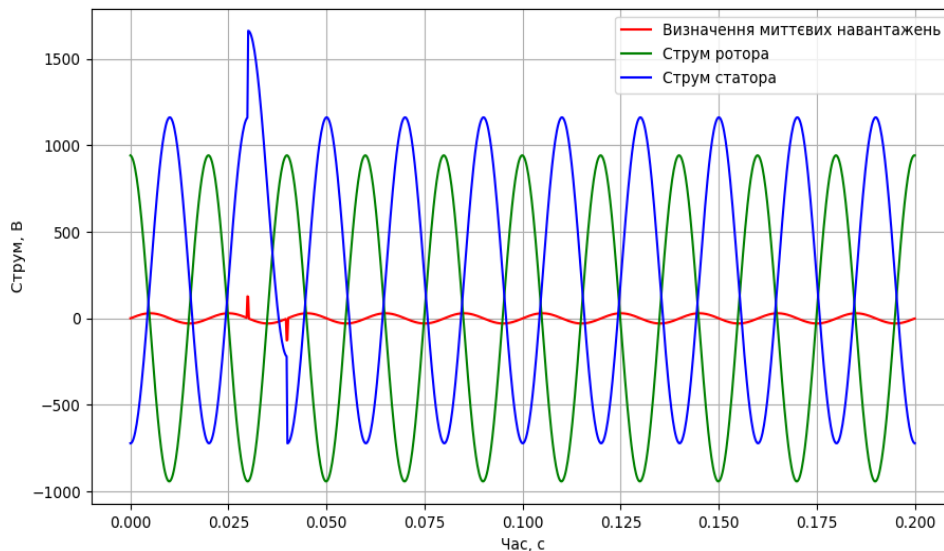


Рисунок 4 – Перехідні процеси однофазного асинхронного електродвигуна з урахуванням додаткового інформаційного параметра, що характеризує кількість миттєвих імпульсів

Джерело: розроблено авторами

Так, на рис. 4. представлено перехідну характеристику асинхронного двигуна з урахуванням додаткового інформаційного параметра, який дозволяє встановити кількість миттєвих навантажень у заданий період. Кількісні показники миттєвих імпульсів згідно із проведеними дослідженнями, під час вимірювання витрат електричної енергії електричних двигунів, можуть характеризувати точність лічильників електричної енергії.

Висновки. В результаті проведеного дослідження метрологічних характеристик вимірювальних лічильників, встановлено залежність їх точності від миттєвих, імпульсних навантажень під час вимірювання витрат електричної енергії асинхронних електродвигунів, що дозволило розробити алгоритм корекції похибки на основі нового інформаційного параметра. Такий параметр характеризується кількістю миттєвих навантажень, що обумовлені механічними, або індуктивними факторами впливу на роботу електродвигунів у певному, фіксованому проміжку часу. Таким чином, безпосереднє вимірювання обертальних моментів електродвигунів під діагностики споживання електричної енергії, дозволяє збільшити точність лічильників шляхом виявлення додаткових імпульсних, дестабілізуючих факторів впливу.

Список літератури

1. Pasinkov Y.A., Savinykh M.A. Tekhnologicheskii kontrol' metrologicheskikh kharakteristik schetchikov elektroenergii na proizvodstve [Technological control of metrological characteristics of electricity meters in manufacturing]. *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*. 2018. no.1 (70). pp. 177–188. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.
2. Kudrya S.O. Unconventional and renewable energy sources: a textbook . Kyiv: National Technical University of Ukraine («KPI»), 2011. 494 p.
3. Концепція побудови автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії в умовах енергоринку : затверджена спільним наказом Мінпаливенерго, НКРЕ, Держкоменергозбереження, Держстандарту, Держбуду, Держпромполітики № 32/28/28/276/75/54 від 17 квітня 2000 р. URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN4936.html (дата звернення: 14.03.2023)
4. Tarafdar Hagh M., Mahaei S. M., Zare K. Improving bad data detection in state estimation of power system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2011. Vol. 1, № 2. P. 85–92.
5. International Performance Measurement And Verification Protocol. U.S. Dep. of Energy. 2002. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31505.pdf>.
6. Денисюк С. П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах . *Енергетика: економіка, технології, екологія : наук. журнал*. 2014. № 1(35). С. 7–20.
7. Попов А.П., Чугулёв А.О., Горшенков А.А., Клеванский С.М . Влияние широтно-импульсной модуляции на погрешность индукционных счетчиков электроэнергии и на потери в асинхронном двигателе . Сиб. гос. автомоб. дор. академия. Омск, 2003. 6с.
8. Визгина, Е. И. (2011). Математическая модель высоковольтного асинхронного двигателя большой мощности. *Вестник Чувашского университета*, (3), 44-52.
9. Devendra M. Jaiswal, Mohan P. Thakre, Modeling & designing of smart energy meter for smart grid applications. *Global Transitions Proceedings*, Vol. 3, Issue 1, 2022, P. 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2022.03.017>.

References

1. Pasinkov, Y.A. & Savinykh, M.A. (2018). Tekhnologicheskii kontrol' metrologicheskikh kharakteristik schetchikov elektroenergii na proizvodstve [Technological control of metrological characteristics of electricity meters in manufacturing]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, no.1 (70), pp. 177–188. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188 [in English].
2. Kudrya, S.O. (2011). Unconventional and renewable energy sources: a textbook . Kyiv: National Technical University of Ukraine («KPI») [in English].
3. Kontseptsiya pobudovy avtomatyzovanykh system komertsyynoho obliku elektroenerhiyi v umovakh enerhorynku : zatverdzhena spil'nym nakazom Minpalyvenerho [The concept of building automated

- systems of commercial electricity accounting in the conditions of the energy market: approved by a joint order of the Ministry of Fuel and Energy]. (nd.). NKRE, Derzhkomenerhozberezhennya, Derzhstandartu, Derzhbudu, Derzhprompolityky № 32/28/28/276/75/54 vid 17 kvitnya 2000 r. Retrieved from http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN4936.html (data zvernennya: 15 kvitnya 2023 r.).
4. Tarafdar, Hagh M., Mahaei, S. M. & Zare, K. (2011). Improving bad data detection in state estimation of power system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 1, № 2. P. 85–92 [in English].
 5. International Performance Measurement And Verification Protocol. U.S. Dep. of Energy. (2002). *nrel.gov*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31505.pdf> [in English].
 6. Denysiuk, S.P. (2014). Tekhnolohichni oryentyry realizatsiyi kontseptsiyi Smart Grid v elektroenerhetychnykh systemakh [Guidelines of technological concepts of Smart Grid in power system]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia : naukovyj zhurnal – Power Engineering: economics, technique, ecology, (1)*, 7-20 [in Ukrainian].
 7. Popov, A.P., Chugulov, A.O., Gorshenkov, A.A. & Klevanskiy, SM . (2003). *Vliyaniye shiroti-impul'snoy modulyatsii na pogreshnost' induktsionnykh schetchikov elektroenergii i na poteri v asinkhronnom dvigatele [Influence of pulse-width modulation on the error of induction electricity meters and on losses in an asynchronous motor]* . Omsk, Sib. gos. avtomob. dor. akademiya. [in Russian].
 8. Vizgina, Ye. I. (2011). Matematicheskaya model' vysokovol'tnogo asinkhronnogo dvigatelya bol'shoy moshchnosti [Mathematical model of a high-voltage asynchronous motor of high power]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta – Bulletin of the Chuvash University, (3)*, 44-52 [in Ukrainian].
 9. Devendra, M. Jaiswal & Mohan, P. (2022). Thakre, Modeling & designing of smart energy meter for smart grid applications, *Global Transitions Proceedings, Vol. 3, Issue 1*, Pages 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2022.03.017> [in English].

Dmytro Kvashuk, Assoc. Prof., PhD econ. sci., Doctoral student, **Vitali Larin**, Prof., DSc., **Serhii Filonenko**, Prof., DSc., **Anzhelika Stakhova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Cost Modeling and Measurement of Electrical energy of Electric Motors

The activity of determining the energy efficiency of electric motors includes several stages of work. These include modeling the operation of engines with the help of specialized software products, which allows you to determine the necessary parameters of electrical energy consumption, load, and rotational parameters in various operating modes. However, the most effective way is to obtain the real operating characteristics of the electric motor on test stands. This is due to many factors, from mechanical malfunctions to inconsistencies in the technical characteristics declared by the manufacturer. At the same time, both for the first and other methods, the problem lies in the optimization of the measuring equipment, which requires reducing the error, increasing the speed and sensitivity of the measuring transducers.

The parameters that require special attention include the consumption of electrical energy, which in certain areas of industry is decisive during the design of technological sites, determination of industrial policy, production volumes, etc. This article proposes a way to establish the relationship between these parameters, the practical value of which, in different operating modes of the electric motor, will make it possible to evaluate both the economic efficiency of the electric machine and the possible risks associated with safe further operation, the period of operation and the ability to create the necessary acceleration moments at given loads.

As a result of the study of the metrological characteristics of measuring meters, the dependence of their accuracy on instantaneous, impulse loads during the measurement of electrical energy consumption of asynchronous electric motors was established, which made it possible to develop an error correction algorithm based on a new information parameter. This parameter is characterized by the number of instantaneous loads caused by mechanical or inductive factors influencing the operation of electric motors in a certain, fixed period of time. Thus, the direct measurement of the torques of electric motors under the diagnosis of electric energy consumption allows to increase the accuracy of the counters by detecting additional impulse, destabilizing factors of influence.

electric energy measurement, torque, electric energy meter, measurement, mathematical model, converter, feedback

Одержано (Received) 24.03.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2023

Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023