

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ МОДЕЛІ

Н. М. Істоміна

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: nmistomina@gmail.com

Робота присвячена оптимізації роботи вентиляльно-індукторного двигуна з точки зору енергетики і забезпечення робочого режиму шляхом формування відповідної комутації фаз. Проаналізовано застосовні типи комутації, кожна з яких характеризується власною формою імпульсу комутації. Визначено ключові точки імпульсів комутації і на їх базі визначена універсальна математична функція, за допомогою якої можна описати всі можливі форми імпульсу. Всі ключові точки мають прив'язку до робочого режиму фази. Після аналізу областей існування ключових точок, визначенні нові змінні – зміщення ключових точок відносно одиночного симетричного імпульсу. Для дослідження впливу сформованого імпульсу комутації на електромеханічні та енергетичні процеси вентиляльно-індукторного двигуна, була розроблена імітаційна модель. Імітаційна модель розділена на три рівні: базовий – моделі формування вхідних впливів, обчислювальний – модель перетворення електромеханічної енергії у двигуні, аналітичний – обчислення енергетичних параметрів та розробленого критерію якості. Запропонований критерій якості дозволяє визначити оптимальні значення зміщень ключових точок і ґрунтується на дотриманні заданих параметрів робочого режиму та мінімізації енергетичних втрат. Верифікація запропонованого критерію якості проводилася за допомогою модельних експериментів. При проведенні експериментів використовувались три варіативних параметри: характер навантаження, рівень навантаження, зміщення ключової точки. Для всіх значень варіативних параметрів під час симуляції фіксувались значення енергетичних параметрів та критерію якості. Оптимальними являються такі значення зміщення ключових точок, для яких при незмінному характері і рівні навантаження були отримані мінімальні значення критерію якості, при дотриманні рушійного робочого режиму. В результаті розроблений метод визначення оптимальної форми імпульсу комутації при заданих характері та рівні навантаження. Розроблений метод відрізняється використанням спеціалізованої мультиагентної моделі визначення миттєвих втрат і електромеханічних характеристик, і застосуванням цілеспрямованого пошуку параметрів керування ключами і критерію якості. Розроблений метод орієнтований на визначення оптимальних режимів живлення вентиляльно-індукторних двигунів і може бути застосований як на етапі підготовки, так і на етапі експлуатації.

Ключові слова: критерій якості, моделювання, багатоагентна система, метод оптимізації.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ

Н. Н. Истомина

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: nmistomina@gmail.com

Работа посвящена оптимизации работы вентиляльно-индукторного двигателя с точки зрения энергетики и обеспечения рабочего режима путем формирования соответствующей коммутации фаз. Проанализированы применимые типы коммутации, каждая из которых характеризуется собственной формой импульса коммутации. Определены ключевые точки импульсов коммутации и на их базе определена универсальная математическая функция, с помощью которой можно описать все возможные формы импульса. Все ключевые точки имеют привязку к эксплуатации фазы. После анализа областей существования ключевых точек, определены новые переменные - смещение ключевых точек относительно одиночного симметричного импульса. Для исследования влияния сложившегося импульса коммутации на электромеханические и энергетические процессы вентиляльно-индукторного двигателя, разработана имитационная модель. Имитационная модель разделена на три уровня: базовый – модели формирования входных воздействий, вычислительный – модель преобразования электромеханической энергии в двигателе, аналитический – вычисление энергетических параметров и разработанного критерия качества. Предложенный критерий качества позволяет определить оптимальные значения смещений ключевых точек и основывается на соблюдении заданных параметров рабочего режима и минимизации энергетических потерь. Верификация предложенного критерия качества проводилась с помощью модельных экспериментов. При проведении экспериментов использовались три вариативных параметра: характер нагрузки, уровень нагрузки, смещение ключевой точки. Для всех значений вариативных параметров во время симуляции фиксировались значения энергетических параметров и критерия качества. Оптимальными являются такие значения смещения ключевых точек, для которых при неизменном характере и уровне нагрузки были получены минимальные значения критерия качества, при соблюдении двигательного рабочего режима. В результате разработан метод определения оптимальной формы импульса коммутации при заданных характере и уровне нагрузки. Разработанный метод отличается использованием специализированной мультиагентной модели определения мгновенных потерь и электромеханических характеристик и применением целенаправленного поиска параметров управления ключами и критерия качества. Разработанный метод ориентирован на определение оптимальных режимов питания вентиляльно-индукторных двигателей и может быть применен как на этапе подготовки, так и на этапе эксплуатации.

Ключевые слова: критерий качества, моделирование, многоагентная система, метод оптимизации.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Вентильно-індукторний двигун (ВІД) являється відносно новим типом електромеханічного перетворювача енергії. Завдяки простоті своєї конструкції, підвищеним надійності та відмовостійкості, легкості експлуатації та обслуговування цей тип двигуна набуває все більшої популярності. Але теорії і методики проектування, виготовлення і дослідження ВІД знаходяться ще в стані становлення. Так в роботах [1–3] викладені нові підходи до проектування ВІД; в [4] викладені основи теорії та керування ВІД.

ВІД є сукупністю двох складових: індукторної машини (ІМ), що відповідає за перетворення електричної енергії у механічну, та силового перетворювача із системою керування, що формує подання напруги на фази ІМ (тобто відтворює вибраний тип комутації фаз). Згідно з [5] це дає можливість здійснювати керування процесами відповідно до особливостей конкретного навантаження: регулювати частоту обертання, момент, потужність і так далі.

Робочі характеристики ВІД напряму залежать від типу комутації напруги живлення. В свою чергу характер імпульсів керування напругою живлення залежить від конструктивних параметрів від та характеру навантаження, діапазону регулювання, вимог, що застосовуються до електроприводу.

Існує ряд робіт в яких, досліджується формування оптимальної комутації для вибраного типу двигуна у конкретних технологічних умовах [6–8]. У даних роботах відсутнє узагальнення отриманих даних, підкріплене математичним описом законів формування комутації, методами та алгоритмами.

Тому актуальною задачею являється розробка математично обґрунтованого способу формування

комутації, в залежності від типу і величини навантаження.

Мета роботи – підвищення ефективності роботи вентильно-індукторного двигуна, шляхом визначення оптимальних типів комутації при заданих характері та рівні навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі: проаналізувати основні типи комутації, що застосовуються для ВІД, порядок обчислення параметрів комутації, основні типи конструкції ВІД із самозбудженням; сформувати універсальний математичний опис імпульсу комутації, визначити основні змінні впливу на формування комутації; сформулювати критерій якості; розробити імітаційну модель для дослідження енергетичних процесів ВІД при формуванні заданого типу комутації; дослідити вплив змінних форми комутації на критерій якості; сформулювати метод визначення оптимальної форми імпульсу напруги живлення в залежності від конструктивних та технологічних умов.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Згідно з [5] виділяють такі типи комутації ВІД: одиночна симетрична комутація (ОСК); парна симетрична комутація (ПСК); одиночна несиметрична комутація (ОНК); парна несиметрична комутація (ПНК); одиночна симетрична з прикладенням зворотної напруги – ОСКЗН тощо.

Формування вхідних сигналів.

Ми пропонуємо перейти від опису багатьох типів комутації до опису універсальної форми імпульсу комутації з прив'язкою до ключових точок робочого режиму фази (рис. 1).

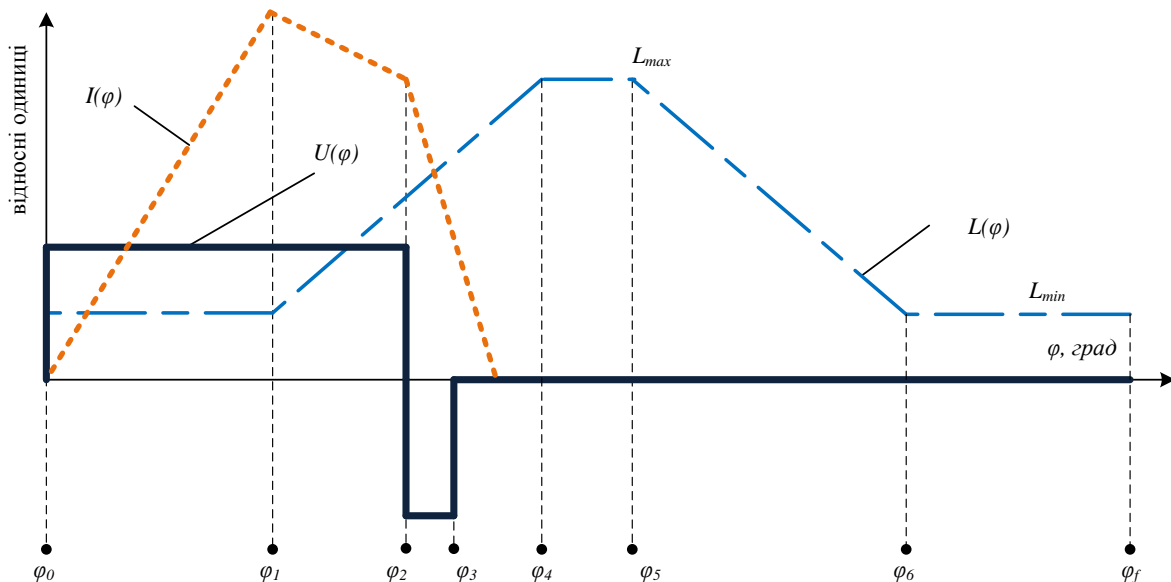


Рисунок 1 – Прив'язка опису імпульсу комутації до ключових точок робочого режиму

Ключові точки визначаються через взаємне положення зубців статора і ротору [4, 9–13]. Вони характеризуються наступним чином:

1) φ_0 – точка початку імпульсу комутації (точка повністю неузгодженого положення: зубець статора знаходиться посередині між двома зубцями ротору;

2) φ_1 – точка початку перекриття зубців статора і ротора (наростання фазної індуктивності);

3) φ_2 – точка відключення фази від живлення і прикладення зворотної імпульсу напруги;

4) φ_3 – точка відключення зворотної імпульсу напруги;

5) φ_4 – точка початкового повного перекриття зубців статора і ротора (фазна індуктивність має максимальне значення);

6) φ_5 – точка завершуючого повного перекриття зубців статора і ротора;

7) φ_6 – точка кінця перекриття зубців статора і ротора (фазна індуктивність зменшується до мінімального значення);

8) φ_f – точка повністю неузгодженого положення (завершення циклу комутації фази).

Першим кроком до формалізації опису універсального імпульсу є перехід до відносних одиниць: відповідно імпульс $U^*(\varphi)$ приймає лише три значення $-1, 0, -1$.

$$U(\varphi) = U^*(\varphi)U_s, \quad (1)$$

де U_s – напруга живлення фази, В.

Другим кроком є визначення інформативних ключових точок повороту ротора щодо формування напруги: φ_0 – відповідає моменту підключення фази, $U^*(\varphi)=1$; φ_2 – відповідає моменту відключення фази і прикладення імпульсу зворотної напруги фази, $U^*(\varphi)=-1$; φ_3 – відповідає моменту відключення імпульсу зворотної напруги фази, $U^*(\varphi)=0$.

Згідно з [9] можна описати форму імпульсу наступним чином:

$$U^*(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{if } \varphi_0 < \varphi \leq \varphi_2 \\ -1 & \text{if } \varphi_2 < \varphi \leq \varphi_3 \\ 0 & \text{if } \varphi_3 < \varphi \leq \varphi_f \end{cases} \quad (2)$$

Після аналізу джерел [4, 11, 12, 14–17] можна виділити наступні діапазони зміни ключових точок імпульсу комутації: φ_0 може змінюватись від 0 до φ_1 ; φ_2 може змінюватись від φ_1 до φ_4 ; φ_3 може змінюватись від φ_2 до φ_6 .

Діапазони зміни положення ключових точок проілюстровані на рис. 2.

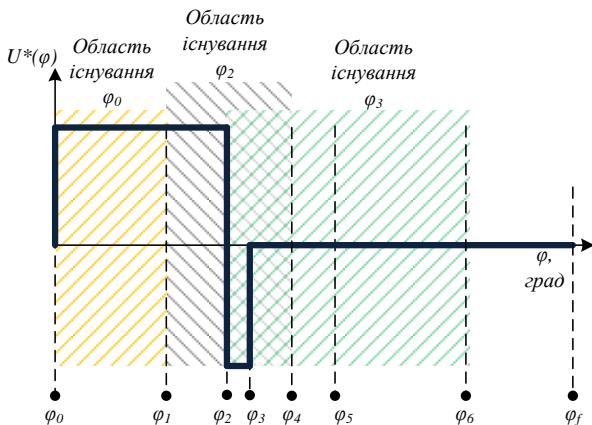


Рисунок 2 – Визначення областей існування ключових точок комутації

В реаліях діапазони зміни фронтів імпульсу комутації більш вузькі, оскільки в дослідженнях [10–12] вже доведені енергетично доцільні моменти початку і завершення комутації. Ми свідомо збільшили ці діапазони до фізично максимально можливих для забезпечення верифікації розробленого критерію якості.

Тому ми вводимо додаткові змінні, які будуть відповідати можливому зміщенню положення ключової точки $\Delta f_0, \Delta f_2, \Delta f_3$:

$$\begin{aligned} \Delta f_0 &\in (0, \varphi_2), \\ \Delta f_2 &\in (\varphi_1, \varphi_4), \\ \Delta f_3 &\in (\varphi_2, \varphi_6). \end{aligned} \quad (3)$$

Відповідно зміниться опис (2):

$$U^*(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{if } \varphi_0(\Delta f_0) < \varphi \leq \varphi_2(\Delta f_2) \\ -1 & \text{if } \varphi_2(\Delta f_2) < \varphi \leq \varphi_3(\Delta f_3) \\ 0 & \text{if } \varphi_3(\Delta f_3) < \varphi \leq \varphi_f \end{cases} \quad (4)$$

Функції ключових точок від зміщення сформулюємо наступним чином: приймемо за точки відліку базові точки фронтів сигналів – φ_0, φ_2 ; оскільки φ_3 залежить від положення φ_2 і являється вторинною функцією, для цього фронту за точку відліку приймемо $\varphi_2(\Delta f_2)$; зміщення вправо від точки відліку дає позитивне зміщення, вліво від'ємне. Тоді можемо записати:

$$\begin{aligned} \varphi_0(\Delta f_0) &= \varphi_0 + \Delta f_0, \\ \varphi_2(\Delta f_2) &= \varphi_2 + \Delta f_2, \\ \varphi_3(\Delta f_3) &= \varphi_2(\Delta f_2) + \Delta f_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Ми пропонуємо реалізувати функцію (4) через предикати, тому умовно розіб'ємо функцію на дві складові: формування імпульсу додатної напруги $U_1^*(\varphi)$ і імпульсу від'ємної напруги $U_2^*(\varphi)$ (рис. 3).

$$U^*(\varphi) = U_1^*(\varphi) + (-1)U_2^*(\varphi). \quad (6)$$

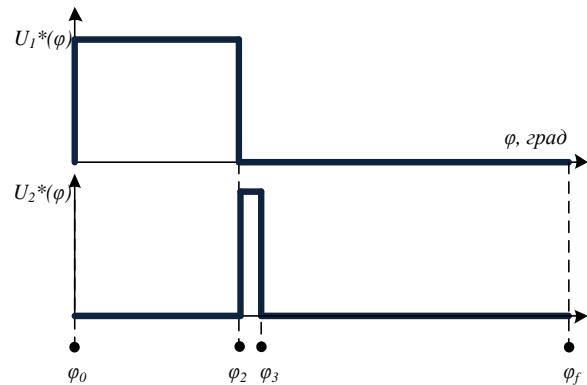


Рисунок 3 – Розбиття імпульсу комутації на складові

Опишемо складові імпульсу комутації за допомогою предикатів:

$$\begin{aligned} U_1^*(\varphi) &= (\varphi \geq \varphi_0(\Delta f_0) \wedge \varphi \geq \varphi_2(\Delta f_2)), \\ U_2^*(\varphi) &= (\varphi \geq \varphi_2(\Delta f_2) \wedge \varphi \geq \varphi_3(\Delta f_3)). \end{aligned} \quad (7)$$

Реалізація отриманого математичного опису імпульсу комутації у пакеті Matlab Simulink наведена на рис. 4.

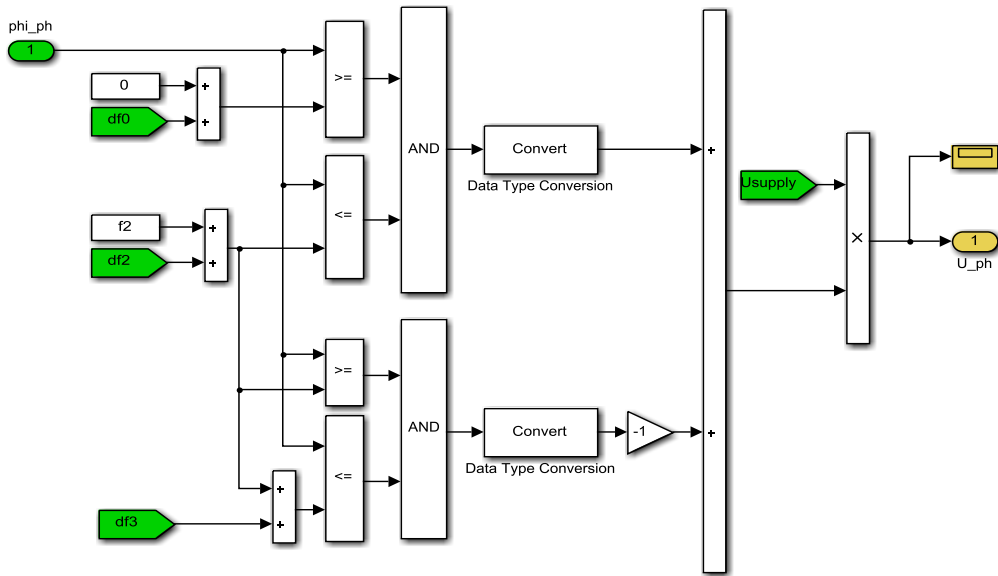


Рисунок 4 – Універсальна модель формування імпульсу комутації

Розробка імітаційної моделі.

Для дослідження впливу отриманого універсального імпульсу комутації була використана імітаційна математична модель ВІД на базі мультиагентних підсистем, представлена в [13] (рис. 5).

У дану мультиагентну модель були внесені наступні модифікації:

1. Всі агенти моделі розподілені на три рівні (рис. 5): базовий, обчислювальний і аналітичний.
2. Базовий рівень – це рівень вхідних завдань, містить агенти формування напруги живлення $U(\varphi)$, фазних індуктивностей $L(\varphi)$, характеру і рівня навантаження двигуна $M_c(\omega)$.
3. Обчислювальний рівень містить три агенти: агент обчислення електромагнітних параметрів (миттєві значення струмів і моментів), агент перетворення електричної енергії в механічну (миттєве значення швидкості) і агент отримання циклічних кутів для кожної фази $\varphi(t)$.
4. Аналітичний рівень містить агенти обчислення енергетичних процесів (споживаної потужності $P_1(t)$, корисної потужності $P_2(t)$, електричних втрат $dP_{el}(t)$, втрат у сталі $dP_s(t)$, значення ККД η) і обчислення критерію якості.

Агенти отримання фазних індуктивностей, формування моменту опору, обчислення електромеханічних миттєвих процесів, реалізовані так, як показано в [13]. На відміну від моделі в [13], пропонується використовувати не один загальний циклічний кут обертання ротора, а математичні абстракції кутів обертання, прив'язані до фаз, тобто до пар зубців ротора. При цьому за базовий сигнал приймаємо кут обертання, прив'язаний до першої фази. Для наступних фаз отримуємо кути за допомогою універсального блоку зсуву кута обертання. Дана ідея, реалізована у пакеті Matlab Simulink за допомогою блоку «Cycle angle of Phase».

На рис. 6, представлений приклад такого блоку для другої фази ВІД: вхідними даними являються базовий кут обертання, кутова швидкість та кут комутації (delay angle).

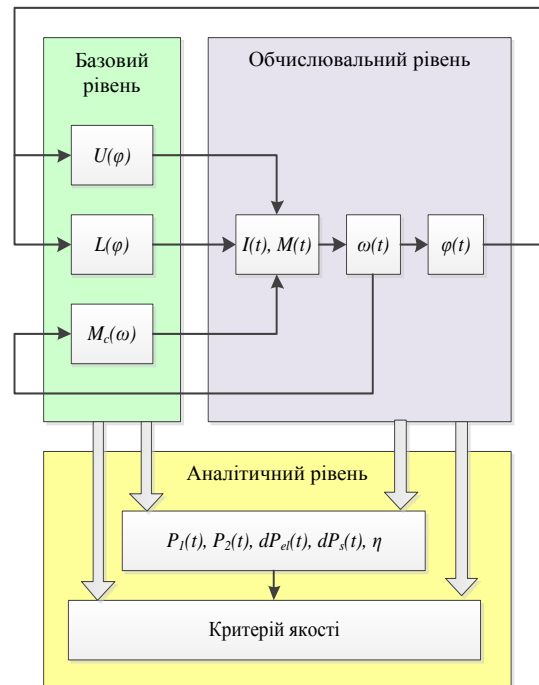


Рисунок 5 – Структура імітаційної мультиагентної моделі ВІД

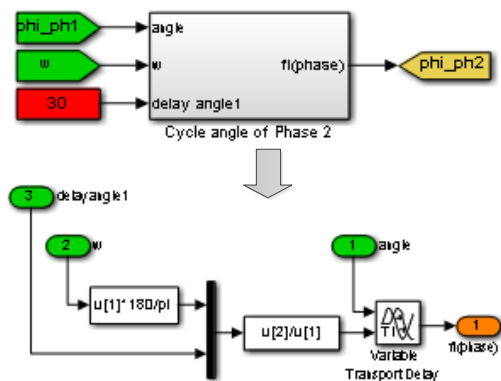


Рисунок 6 – Агент отримання фазного кута обертання

При використанні універсального блоку «Cycle angle of Phase» можна отримати всі фазні кути обертання для ВІД будь-якої фазності.

На рис. 7 представлений приклад отримання сигналів фазних кутів для ВІД 6х4 3 кВт (паспортні дані якого наведені у табл. 1).

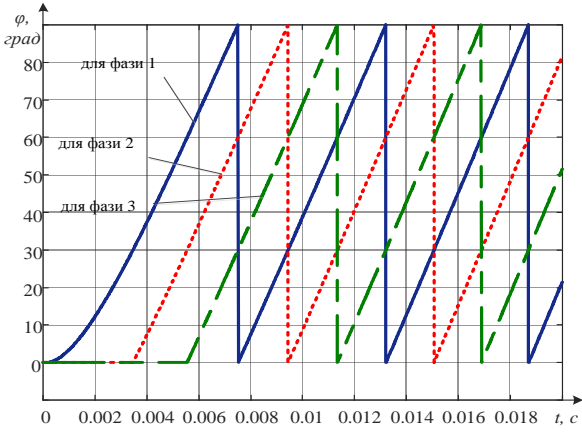


Рисунок 7 – Часові залежності фазних циклічних кутів

Таблиця 1 – Дані ВІД УХЛ4

Найменування	Позначення
Номинальна потужність	$P_{2n}=3$ кВт
Номинальна напруга ланки постійного струму	$U_{dn}=456$ В
Номинальна швидкість обертання	$\omega_n=314,16$ с ⁻¹
Номинальний момент	$M_n=9,549$ Н·м
Кількість фаз	$m=3$
Кількість зубців статора	$Z_S=6$
Кількість зубців ротора	$Z_R=4$

Розробка критерію якості.

Згідно з [14, 15] класичний критерій якості, що описує відповідність технологічним умовам досліджуваного процесу, має вигляд:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (q_1 y(t)^2 + q_2 \dot{y}(t)^2 + u(t)^2) dt, \quad (8)$$

де t_0, t_k – відповідно, початковий і кінцевий моменти часу дослідження процесу; q_1, q_2 – вагові коефіцієнти, що задають ступінь впливу відповідних складових на підсумкове значення критерію; $y(t), u(t)$ – керувана змінна і керуючий вплив.

В нашому випадку складові критерію якості будуть визначатися за такими вимогами технологічного процесу:

- швидкість обертання $\omega(t)$ повинна відповідати заданому значенню, приймаємо за таке номінальну швидкість обертання двигуна;
- сумарний електромагнітний момент $M(t)$ двигуна дорівнює заданому значенню, за таке приймаємо рівень навантаження (момент опору M_c), дана складова дозволяє оцінити ріст вібрації в залежності від форми імпульсу комутації;
- втрати електроенергії $\Delta P(t)$ повинні бути мінімальними.

Для оцінювання ефективності комутації ми будемо використовувати не проміжок часу ($t_0; t_k$), а кількість повних обертів ротора N . Найдоцільніше отримувати інформацію про N з сигналу кутової швидкості $\omega(t)$. Інтегрування сигналу $\omega(t)$ дозволяє отримати безперервний сигнал кута обертання $\phi(t)$, з якого, за допомогою конструкта наведеного на рис. 8, ми визначаємо умовну зупинку симуляції при досягненні кількості обертів ротора заданого значення N .

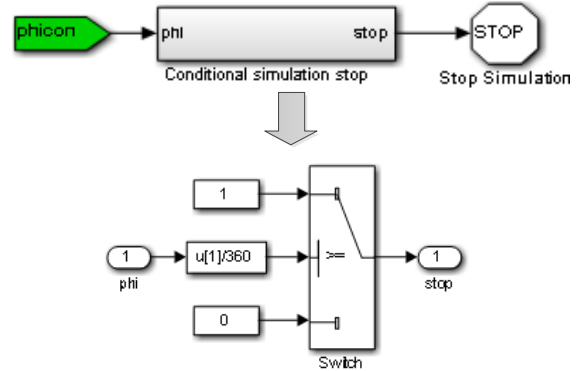


Рисунок 8 – Блок умовного припинення симуляції

Відповідно в нашому випадку критерій якості (8) набуває виду:

$$I = \int_0^{t_N} (y_\omega(t)^2 + q_2 y_M(t)^2 + q_3 y_P(t)^2) dt, \quad (9)$$

де $q_2=0,5, q_3=0,7$;

$$y_\omega(t) = \frac{\omega_z - \omega(t)}{\omega_z}$$

$$y_M(t) = \frac{M_c - M(t)}{M_c}, \quad (10)$$

$$y_P(t) = \frac{\Delta P(t)}{P_1(t)},$$

де ω_z – задана швидкість обертання двигуна; M_c – рівень навантаження.

Проведення модельних експериментів.

Дослідження будемо проводити за логічною схемою наведеною на рис. 9.

В експерименті використовуються 3 варіативних параметри:

- характер навантаження α ;
- зміщення ключових точок комутації $\Delta f_0, \Delta f_2, \Delta f_3$;
- рівень навантаження M_c .

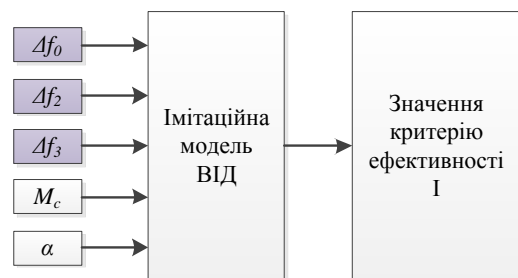


Рисунок 9 – Логічна схема проведення дослідження

Згідно з [16] даний коефіцієнт в залежності від характеру навантаження може приймати наступні значення:

- 1) для піднімальних установок, механізмів подач металорізальних верстатів, поршневих насосів при незмінній висоті подачі, конвеєрів з постійною масою матеріалу, що пересувається – $\alpha = 0$;
- 2) для приводів генератору постійного струму з незалежним збудженням, який працює на зовнішнє резистивне навантаження – $\alpha = 1$, це випадок ми не будемо розглядати оскільки вентиляційно-індукторні генератори мають конструкцію, що відрізняється від конструкції двигуна;
- 3) для виконавчих органів відцентрового типу (насоси, вентилятори, компресори, димососи, гребні гвинти й т.д.) – $\alpha = 2$;
- 4) для механізмів головного руху токарських, фрезерних та інших верстатів, пристроїв намотування – $\alpha = -1$.

Будемо розглядати три рівні навантаження: $0,5M_n; M_n; 2M_n$.

Відповідно кодування експериментальних даних будемо проводити, наступним чином: код експерименту складається з трьох цифр, перше відповідає характеру навантаження, друге – ключовій точці, третє – рівню навантаження (табл. 2).

Таблиця 2 – Кодування експериментальних даних

Цифра коду	Значення	Відповідні умови
перша	0	$\alpha = 0$
	1	$\alpha = 1$
	2	$\alpha = 2$
	3	$\alpha = -1$
друга	0	Δf_0
	1	Δf_2
	2	Δf_3
третя	0	$M_c = 0,5M_n$
	1	$M_c = M_n$
	2	$M_c = 2M_n$

Наприклад експериментальні дані отримані при $\alpha = -1$, для ключової точки Δf_0 , при номінальному навантаженні будуть мати код «301».

Ключові точки комутації пов'язані з конструктивними параметрами двигуна, як показано на рис. 10.

Ми пропонуємо наступну методику обчислення ключових точок комутації (на прикладі вибраного ВД).

1. Обчислюємо кут між зубцями ротора,

$$\gamma_R = \frac{2\pi}{Z_R} = \frac{2 \cdot 180}{4} = 90^\circ.$$

2. Обчислюємо кут між зубцями статора,

$$\gamma_S = \frac{2\pi}{Z_S} = \frac{2 \cdot 180}{6} = 60^\circ.$$

3. Обчислюємо кут комутації,

$$\varphi_k = \gamma_R - \gamma_S = 90 - 60 = 30^\circ$$

4. Обчислюємо полюсну дугу статора,

$$\beta_S = \frac{\pi}{Z_S} = \frac{180}{6} = 30^\circ.$$

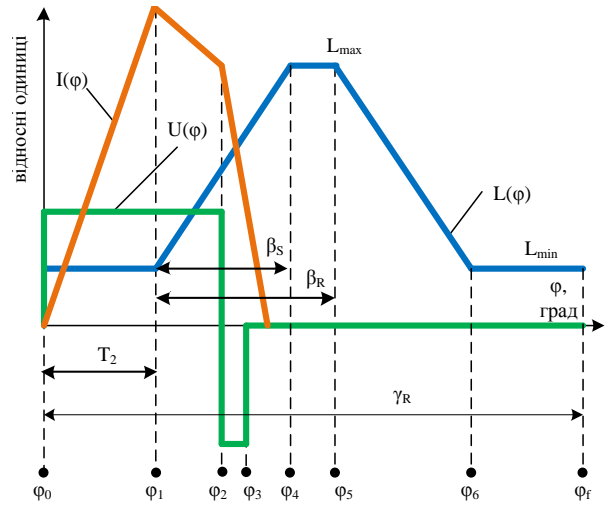


Рисунок 10 – Конструктивні параметри та ключові точки комутації

5. Обчислюємо полюсну дугу ротора,

$$\beta_R = \beta_S + (2 \div 4)^0 = 30 + 4 = 34^\circ.$$

6. Обчислюємо половинний період неузгодженого положення,

$$T_2 = \frac{1}{2}(\gamma_R - \beta_S - \beta_R) = \frac{1}{2}(90 - 30 - 34) = 13^\circ;$$

7. Приймаємо початковий кут комутації $\varphi_0 = 0$.

8. Обчислюємо точку

$$\varphi_1 = T_2 = 13^\circ.$$

9. Обчислюємо точку

$$\varphi_2 = \varphi_k = 30^\circ$$

10. Обчислюємо точку

$$\varphi_4 = \beta_S + T_2 = 30 + 13 = 43^\circ.$$

11. Обчислюємо точку

$$\varphi_5 = \beta_R + T_2 = 34 + 13 = 47^\circ.$$

12. Обчислюємо точку

$$\varphi_6 = \varphi_5 + \beta_S = 47 + 30 = 77^\circ.$$

13. Обчислюємо точку $\varphi_f = \gamma_R = 90^\circ$.

14. Вибираємо дискретність зміни точок зміщення, $\Delta f = 2$.

15. Визначаємо діапазон існування Δf_0 ,

$$\Delta f_0 \in (\varphi_0; \varphi_1), \Delta f_0 \in (0; 13).$$

16. Визначаємо діапазон існування Δf_2 ,

$$\Delta f_2 \in (\varphi_1; \varphi_4), \Delta f_0 \in (13; 43).$$

17. Визначаємо діапазон існування Δf_3 , мінімальну ширину зворотного імпульсу приймаємо рівною дискретності $\Delta f_3 = \Delta f = 2$, максимальну – куту комутації.

18. Формуємо ранжирувані змінні,

$$\Delta f_0 = 0, 2, 4 \dots 12, 13;$$

$$\Delta f_2 = -17, -16, \dots -2, 0, 2, \dots 12, 13;$$

$$\Delta f_0 = 0, 2, \dots 28, 30.$$

Для кожного набору варіативних параметрів результати дослідів представлялись у вигляді, як наведено у табл. 3 (коди дослідів 000, 001, 002; проче-

рками позначені режими несталої роботи або генераторні).

Таблиця 3 – Експериментальні данні $\Delta f_0 = \text{var}$
Вхідні умови: $\Delta f_2=0, \Delta f_3=0, M_c=0,5M_n, \alpha=0$ (код 000)

№	Δf_0	$\omega_d, \text{с}^{-1}$	$dP, \text{Вт}$	$\eta, \text{в.о.}$	$t, \text{с}$	I
1	0	391,3	363,7	0,86	0,1846	0,010830
2	2	381,8	231,2	0,9037	0,2079	0,009690
3	4	373,3	102,5	0,9531	0,2185	0,008211
4	6	364,2	29,92	0,9854	0,229	0,006955
5	8	–	–	–	–	–
6	10	–	–	–	–	–
7	12	–	–	–	–	–
8	13	–	–	–	–	–

Вхідні умови: $\Delta f_2=0, \Delta f_3=0, M_c=M_n, \alpha=0$ (код 001)

№	Δf_0	$\omega_d, \text{с}^{-1}$	$dP, \text{Вт}$	$\eta, \text{в.о.}$	$t, \text{с}$	I
9	0	315,9	609,9	0,8323	0,2124	0,007686
10	2	307,8	435,9	0,8712	0,2345	0,006739
11	4	299,9	273,9	0,913	0,2464	0,006983
12	6	291,7	147,9	0,9496	0,2789	0,007906
13	8	283	44,7	0,9837	0,291	0,009842
14	10	274,2	13,46	0,9949	0,301	0,012660
15	12	–	–	–	–	–
16	13	–	–	–	–	–

Вхідні умови: $\Delta f_2=0, \Delta f_3=0, M_c=2M_n, \alpha=0$ (код 002)

№	Δf_0	$\omega_d, \text{с}^{-1}$	$dP, \text{Вт}$	$\eta, \text{в.о.}$	$t, \text{с}$	I
17	0	241,5	1367	0,7693	0,2645	0,02583
18	2	235,4	1099	0,8025	0,2878	0,02486
19	4	229,4	860,7	0,8353	0,3134	0,02632
20	6	223	658,4	0,8657	0,3431	0,02829
21	8	216,6	509,7	0,8895	0,3559	0,030310
22	10	209,5	505,3	0,8883	0,3683	0,009759
23	12	201,5	397,2	0,908	0,3663	0,013300
24	13	194,3	335,3	0,9177	0,3784	0,008208

Результати проведених експериментів для ключової точки Δf_0 підтверджують, що найбільш ефективним для початку комутації являється кут 2–4° (табл. 3). Відповідно при регулюванні параметрів комутації ключова точка повинна змінюватись у цих межах. Отримані результати цілком відповідають законам комутації викладеним у [4–5].

Слід зазначити, що для отримання повної інформації були проведені досліді з наступними кодами: 001, 002, 003, 101, 102, 103, 201, 202, 203, 301, 302, 303 (тобто кількість проведених симуляцій – 96).

Серія експериментів проведених для ключової точки Δf_0 являється також етапом верифікації розробленого критерію якості. Оскільки в цьому пакеті експериментів вирішується задача визначення оптимального початку імпульсу комутації. Рішення даної задачі, як було вказано вище вже відоме, і співпадає з рішенням отриманим через застосування критерію (9). Відповідними серіями експериментів також були перевірені ключові точки $\Delta f_2, \Delta f_3$.

В результаті запропоновано метод формування оптимальної комутації в залежності від характеру і рівня навантаження, який складається з наступних етапів.

Етап 1. Завдання характеру навантаження. Оскільки для реального двигуна характер навантаження не змінюється, користувач одноразово задає значення коефіцієнту α .

Етап 2. Завдання діапазону зміни рівня навантаження. Ця інформація може бути отримана з навантажувальних діаграм.

Етап 3. Завдання паспортних і додаткових параметрів ВІД. Якщо деякі параметри відсутні користувачу пропонується скористатися процедурою автоматизованого проектувального розрахунку ВІД, яка ґрунтується на математичному апараті, представленому в [17].

Етап 4. Обчислення діапазону зміни ключових точок комутації згідно з розробленою методикою.

Етап 5. Проведення модельних експериментів за допомогою розробленої імітаційної моделі.

Етап 6. Виявлення значень ключових точок комутації, які забезпечують мінімальне значення критерію (9).

Етап 7. Формування звіту, який містить рекомендації, щодо оптимальної комутації для визначених користувачем умов експлуатації ВІД.

ВИСНОВКИ. В результаті роботи:

1. Проведений аналіз всіх можливих типів комутації. В результаті визначені ключові точки опису формування імпульсу комутації фази вентиляно-індукторного двигуна.

2. Визначені фізично можливі області існування ключових точок комутації, які залежать в першу чергу від конструктивних параметрів вентиляно-індукторного двигуна.

3. Сформульований універсальний математичний опис імпульсу комутації за допомогою умовної функції, оскільки в усіх ключових точках умовна напруга живлення може приймати лише три значення 1, 0, -1.

4. Математичний опис універсальної функції комутації представлений за допомогою предикатів, що дозволило реалізувати його на блоках булевої логіки і отримати універсального агента формування імпульсу комутації.

5. Модифікована мультиагентна модель визначення миттєвих втрат і електромеханічних характеристик, шляхом уведення базового, обчислювального та аналітичних рівнів.

6. Розроблений універсальний агент отримання циклічного кута обертання, який дозволяє отримати циклічні кути для всіх фаз, і відповідно використати універсальний агент формування імпульсу комутації незалежно від кількості фаз.

7. Запропонований критерій якості, за допомогою якого можна оцінити оптимальність сформованого імпульсу комутації, який ґрунтується на дотриманні заданих значень швидкості та моменту, а також мінімізації енергетичних втрат.

8. Сформована програма проведення модельних експериментів при використанні трьох варіативних

параметрів: характеру навантаження, рівня навантаження і зміщення ключових точок.

9. Розроблена методика обчислення діапазону зміни зміщення ключових точок, що дозволяє дослідити різні форми імпульсу комутації.

10. Проведена верифікація запропонованого критерію якості за допомогою розв'язання завдання визначення початкового моменту комутації, рішення якого вже відомо з теорії вентильно-індукторного електропривода.

11. Набув подальшого розвитку метод оптимізації керування ключами силового перетворювача для живлення вентильно-індукторного двигуна, який відрізняється використанням спеціалізованої мультиагентної моделі визначення миттєвих втрат і електромеханічних характеристик, застосуванням цілеспрямованого пошуку параметрів керування ключами і критерію оптимальності роботи комплексу силовий перетворювач – вентильно-індукторний двигун, що дозволяє підняти ефективність електроприводу на базі вентильно-індукторного двигуна і забезпечити виконання технологічної задачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Петрушин А. Д., Шевкунова А. В., Кашуба А. В. Оптимизация активной части вентильно индукторного двигателя методом Нелдера–Мида. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327. № 6. 83–92.

2. Рымша В. В., Радимов И. Н., Чан Тхи Тху-Хьонг. Влияние конфигурации зубцовой зоны статора на электромагнитный момент и радиальные электромагнитные силы вентильно-реактивного электродвигателя. *Электротехника и электромеханика*. 2006. № 1. С. 51–53.

3. Шевкунова А. В. Проектирование вентильно-индукторного двигателя как узла системы регулируемого привода с применением алгоритмов оптимизации. *Интернет-журнал “Науковедение”*. 2016. Том 8. №4. С. 1–13. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN416.pdf> (дата звернення 25.02.2020)

4. Бычков М. Г. *Основы теории, управление и проектирование вентильноиндукторного электропривода* : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. Московский энергетический институт. Москва, 1999. 38 с.

5. Кузнецов В. А., Кузьмичев В. А. *Вентильно-индукторные двигатели: учебное пособие*. URL: <http://elmech.mpei.ac.ru> (дата звернення 25.02.2020).

6. Амелькин А. В. *Оптимизация способов управления вентильно-индукторным двигателем на*

электрическом транспорте в тормозном режиме : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Московский энергетический институт. Москва, 2004. 20 с.

7. Темирёв А. П., Нгуен Куанг Кхоа. Исследование вентильно-индукторного двигателя большой мощности двухпакетной конструкции для пульповых насосов ГРАТ-1800/67 горнорудного оборудования. *Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”*. 2017. № 1. С. 54–62.

8. Красовский А. Б. Оптимизация на модели одиночного цикла коммутации фазы вентильно-индукторного двигателя. *Наука и образование*. 2013. № 6. С. 379–390.

9. Істоміна Н. М. Формування імпульсу напруги живлення фази вентильно-індукторного двигуна. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика”*. Кременчук, 2014. Вип. 1(2). С. 104–106.

10. Красовский А. Б. Исследование пульсаций момента вентильно-индукторного двигателя при регулировании среднего значения момента в зоне малых скоростей. *Электротехника*. 2017. № 5. С. 2–8

11. Рисованый С. В., Финкельштейн В. Б. *Проектирование вентильных реактивных двигателей: монография*. Х.: ХНУГХ, 2014. 245 с.

12. Чихняев В. А., Ахметзянов Д. И. Исследование электромеханических свойств вентильно-индукторного двигателя. *Вестник Чувашского университета*. 2013. № 3. С. 240–245.

13. Істоміна Н. М. Мультиагентна модель розрахунку перетворення енергії у комплексі силовий перетворювач – вентильно-індукторний двигун – технологічний об’єкт. *Radioelectronics & Informatics*. 2019. 4(87). С. 24–33.

14. Lutsenko I. Identification of target system operations. 1. Determination of the time of the actual completion of the target operation. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 6(2(72)). Pp. 42–47.

15. Lutsenko I. Identification of target system operations. 2. Determination of the value of the complex costs of the target operation. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 1(2(73)). Pp. 31–36.

16. Мирошник А. И., Лысенко О. А. *Электрический привод: конспект лекций*. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 100 с.

17. Фисенко В. Г., Попов А. Н. *Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие*. М.: Издательство МЭИ, 2005. 56 с.

OPTIMIZATION OF SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR OPERATION USING A MULTIAGENT MODEL

N. Istomina

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600. E-mail: nmistomina@gmail.com

Purpose. The work deals with optimizing the operation of switched reluctance motor from the point of energy and ensuring the operating mode by forming the corresponding phase switching. **Methodology.** The applicable switching types were analyzed. Each of applicable switching types is characterized by its own switching pulse form. The key points of the switching pulses were found and on their basis the universal mathematical function was determined. Determined universal switched function allows us to describe all possible forms of the pulse. All key points are associated with the

operation phase. After analyzing the areas of key points existence, new variables are defined – the shift of key points relative to a single symmetrical impulse. To study the influence of the existing switching pulse on the electromechanical and energy processes of a switched reluctance motor, a simulation model was developed. The simulation model is divided into three levels: basic level – models of the input actions formation; computational level – the model of electromechanical energy conversion in the motor; analytical level – calculation of energy parameters and the developed quality criterion. The proposed quality criterion allows us to determine the optimal values of key points shift. The proposed quality criterion is based on compliance with the specified parameters of the operating mode and minimizes energy losses. Verification of the proposed quality criterion was carried out using model experiments. During the experiments, three variable parameters were used: the load nature, the load level, and the key points shift. For all values of the variable parameters during the simulation, the values of energy parameters and quality criterion were recorded. The optimal values of key points shift are match to the minimum values of the quality criterion obtained under rated character and level of load with assurance the motor operating mode. **Results.** The method for determining the optimal switching pulse shape has been developed under conditional nature and level of load. **Originality.** The developed method is distinguished by using specialized multi-agent model for determining instantaneous losses and electromechanical characteristics and by using targeted search for key control parameters and quality criterion. **Practical value.** The developed method is focused on determining the optimal power supply conditions for switched reluctance motors and can be applied both at the preparation stage and at the operation stage.

Key words: quality criterion, modeling, multi-agent system, optimization method.

REFERENCES

- Petrushin, A. D., Shevkunova, A. V., Kashuba, A. V. (2016), Optimization of the switched reluctance motor active part by the Nelder-Mead method', *The Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. 327, no. 6, pp. 83-92.
- Rymsha, V. V., Radimov, I. N., Chan, T. T. H. (2006), Influence of stator tooth zone configuration on electromagnetic torque and radial electromagnetic forces in a switched reluctance motor, *Electrical engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 51-53.
- Shevkunova, A. V. (2016), Design of switched-reluctance motor as a unit controlled drive system with the use of optimization algorithms, *Internet-journal "Naukovedenie"* [science of science], vol. 8, no. 4, pp. 1–13.
- Bychkov, M. G. (1999), "Osnovy teorii, upravlenie i proektirovanie ventilnoinduktornogo elektroprivoda" [Fundamentals of theory, control and design of a switched reluctance electric drive], Doctor Thesis, specialty 05.09.03, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia, 38 p.
- Kuznetsov, V. A., Kuzmichev, V. A. (2003), "Ventilno-induktornye dvigateli: elektronnyi uchebnyk" [Switched Reluctance Motors: Tutorial], available at: <http://elmech.mpei.ac.ru> (accessed 25.02.2020).
- Amelkin, A. V. (2004), *Optimization of control methods for a switched reluctance motor in electric transport in a braking mode*, Candidate Thesis, specialty 05.09.03, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia, 20 p.
- Temirev, A. P., Nguyen, Q. Kh. (2017), Research of the High Power Two-Package Switched Reluctance Motor for Pulp Pumps Grat-1800/67 of a Mining Equipment, *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, no. 1, pp. 54-62.
- Krasovskii, A. B. (2013), Optimization in the model of the individual cycle of phase switching of gated inductor motor, *Science and Education*, no. 6, pp. 379-390.
- Istomina, N. M. (2014), "Forming of supply voltage impulse for phase of switched reluctance motor", *Conference Proceedings "Problems of Energy and Resource Saving in Electrical Systems. Science, Education and Practice"*, Kremenchuk, iss. 1(2), pp. 104-106.
- Krasovskii, A. B. (2017), The research of pulsations of the moment of the switched reluctance motor under adjusting the average value of the moment in the low-speed zone, *Electrotechnics*, no. 5, pp. 2-8.
- Risovanyi, S. V., Finkelshtein, V. B. "Proektirovanie ventilnykh reaktivnykh dvigatelei: monografiya" [Switched Reluctance Motor Design: a monograph], National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, 245 p.
- Chihnyaev, V. A., Akhmetzyanov, D. I. (2013), Investigation of Electromechanical Characteristic of Switched Reluctance Motor, *Bulletin of the Chuvash University*, no. 3, pp. 240-245.
- Istomina, N. M. (2019), Multiagent model of energy conversion calculation in a complex power converter - valve-induction motor - technological object, *Radioelectronics & Informatics*, 4(87), pp. 24–33.
- Lutsenko, I. (2014), Identification of target system operations. 1. Determination of the time of the actual completion of the target operation, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 6(2(72)), pp. 42-47.
- Lutsenko, I. (2015), Identification of target system operations. 2. Determination of the value of the complex costs of the target operation, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 1(2(73)), pp. 31–36.
- Miroshnik, A. I., Lysenko, O. A. (2010), "Elektricheskii privod: konspekt lekcii" [Electric drive: lecture notes], Publishing House of Omsk State Technical University, Omsk, Russia, 100 p.
- Fisenko, V. G., Popov, A. N. (2005), *Designing Switched Reluctance Motors: a toolkit*, Publishing House of Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia, 56 p.

Стаття надійшла 28.05.2020.