

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.12

УДК 62-83:681.513.5

Клюєв О.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-4542-3317, e-mail: kluev2006@ukr.net

Садовой О.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9739-3661, e-mail: sadovoyav@ukr.net

Сохіна Ю.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-4329-5182, e-mail: jvsokhina@gmail.com

Жидко Ю.О., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kliuiev Oleh, Candidate of technical sciences, Associate professor Electrotechnical and electromechanical department

Sadovoi Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor Electrotechnical and electromechanical department

Sokhina Yuliya, Candidate of technical sciences, Associate professor Electrotechnical and electromechanical department

Zhydko Yurii, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ СТРУМУ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ

У статті високочастотні пульсації струму статора асинхронної машини (АМ), що утворюються при роботі в її системі керування релейних регуляторів в ковзному режимі, вперше розглянуті як випадковий процес переешкоди, що накладається на гладку детерміновану складову струму. Виявлено закони розподілу та кореляційні функції випадкового процесу пульсацій струму при роботі регуляторів струму та швидкості в ковзному режимі. Виявлено залежність статистичних характеристик струму від структури перемикаючої функції регулятора швидкості. Результати досліджень обґрунтовують доцільність використання фільтра Калмана як спостерігача координат АМ з релейно-векторною системою керування.

Ключові слова: релейний регулятор; ковзний режим; випадковий процес; закон розподілу; кореляційна функція; фільтр Калмана.

In the article, high-frequency pulsations of the stator current of an asynchronous machine (AM), formed when relay regulators operate in its control system in a sliding mode, are considered for the first time as a random process of interference superimposed on a smooth deterministic current component. The distribution laws and correlation functions of the random process of current pulsations during operation of current and speed controllers in sliding mode have been identified. The dependence of the statistical characteristics of the current on the structure of the switching function of the speed controller was discovered. The research results justify the feasibility of using the Kalman filter as an observer of AM coordinates with a relay-vector control system.

Keywords: relay controller; sliding mode; random process; distribution law; correlation function; Kalman filter.

Постановка проблеми

У статтях [1, 2] запропоновані системи векторного керування асинхронною машиною (АМ), у яких для ідентифікації опорного вектора потокозчеплення ротора і кутової швидкості обертання ротора використовується дискретний розширений фільтр Калмана. Для прив'язки спостерігача Калмана до об'єкта керування вимірюються активна і реактивна складові струму

статора, у які вводиться стаціонарний гаусівський білий шум, який імітує перешкоди виміру цих струмів. Доведено працездатність таких систем керування методом математичного моделювання. В обох статтях використовуються релейні регулятори складових вектора струму статора і модуля потокозчеплення ротора. Розходження полягає в тому, що в першій статті лінійний регулятор швидкості, а в другій релейний регулятор швидкості, у якого перемикаюча функція з жорсткими зворотними зв'язками та інтегральною складовою в її складі. Однак інтегральні складові вводять перерегулювання в процес керування швидкістю обертання ротора. При цьому виявилось, що спостерігач Калмана ефективно ідентифікує змінні стану електропривода, а система керування не втрачає своїх показників якості також і в тому випадку, якщо забрати гаусівську перешкоду у вимірі струмів і думати, що на вхід фільтра подаються реальні струми без перешкод. Прагнення побудувати релейно-векторну систему керування швидкістю обертання ротора АМ без перерегулювання з урахуванням зазначеної вище властивості призвело до необхідності подальших досліджень спільної роботи фільтра Калмана і релейних регуляторів у ковзних режимах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [3] досліджується вплив коефіцієнтів зворотних зв'язків на вхідний сигнал релейного регулятора, а значення функції перемикавання розгортаються у часі. Значення поверхні ковзання розглядаються як сума безперервної і переривчастої частин. При цьому статистичний аналіз пульсацій поверхні ковзання не виконується, а параметри функції перемикавання підбираються так, щоб амплітуда переривчастої частини поверхні ковзання звелася до мінімуму. У статті [4] визначається закон розподілу помилки стабілізації швидкості на вході відповідного регулятора. Закон розподілу вийшов гаусівським, а параметри регулятора вибираються з умови мінімізації середнього квадратичного відхилення помилки стабілізації швидкості при нульовій середній.

У літературних джерелах з теорії калманівської фільтрації вказується на те, що алгоритм фільтра Калмана спершу був отриманий для оцінювання змінних стану динамічних систем у випадку, якщо вимірювані змінні мають у своєму складі гаусівський білий шум [5]. Таким чином, змінні, які вимірюються фільтром Калмана для оцінювання інших координат системи, розглядаються як випадковий процес. Якщо центрувати випадковий процес шляхом вилучення його детермінованої складової, то шум виміру може розглядатися як корельований або некорельований випадковий процес з нульовим середнім. У роботі [6] визначена можливість роботи фільтра Калмана в умовах, коли перешкода виміру не білий шум, а являє собою випадковий процес з експоненціальною кореляційною функцією.

Формулювання мети дослідження

Ставиться задача в АМ з векторною системою керування провести статистичний аналіз високочастотних пульсацій струму статора, які утворюються при роботі релейних регуляторів у ковзних режимах, з метою виявлення оптимальності в сенсі загальної теорії фільтра Калмана використання для нього струмів статора як вхідних вимірюваних величин у релейних системах керування.

Виклад основного матеріалу

Канал активної потужності АМ без урахування інерційності транзисторного перетворювача, представляє динамічну підсистему другого порядку. Тоді, як впливає з викладеної в [7] методики, функція перемикавання релейного регулятора швидкості повинна мати тільки один гнучкий зворотний зв'язок за першою похідною швидкості. Однак дослідження на математичній моделі показали, що одного гнучкого зворотного зв'язку за швидкістю недостатньо для її якісного регулювання, оскільки в такому випадку в системі виникають стійкі автоколивання швидкості зі значними пульсаціями активного струму статора й електромагнітного моменту, що робить систему стабілізації швидкості непрацездатною. Тому необхідно враховувати інерційність фільтра Калмана при синтезі регулятора швидкості. Якщо інерційність фільтра Калмана врахувати аперіодичною ланкою першого порядку, то контур регулювання швидкості стане динамічною підсистемою третього порядку, і, отже, функція перемикавання релейного регулятора швидкості буде містити зворотні зв'язки за першою і другою похідними швидкості. У такий спосіб одержимо структуру релейного регулятора швидкості, синтезованого в базисі старших похідних.

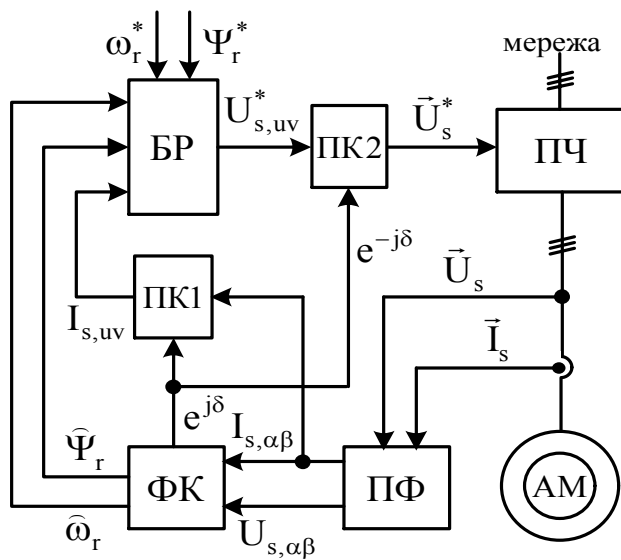


Рис. 1. Функціональна схема релейно-векторної системи керування АМ

нерухливої системи координат α, β до системи координат u, v , яка обертається зі швидкістю опорного вектора потокозчеплення ротора. Перетворювач координат ПК2 виконує зворотні перетворення проєкцій вектора керуючої напруги $U_{s,uv}^*$ з обертової системи координат u, v , до ортогональних осей α, β і далі у фазні осі статора АМ. У блоці регуляторів БР є двоканальна система керування. У каналі реактивної потужності релейний регулятор реактивного струму статора I_{su} підпорядкований релейному регулятору модуля потокозчеплення ротора. У каналі активної потужності здійснюється регулювання швидкості з двома релейними регуляторами: внутрішній регулятор активного струму статора I_{sv} підпорядкований зовнішньому регулятору швидкості. При цьому регулятор струму використовує одиничний зворотний зв'язок безпосередньо за самим струмом, а регулятор швидкості крім одиничного зворотного зв'язку з оцінки швидкості ще використовує зворотні зв'язки за першою і другою похідними від оцінки швидкості, яка обчислюється фільтром Калмана. Таким чином, контур формування керуючого впливу U_{sv}^* містить регулятори з наступними законами керування:

$$U_{sv}^* = U_m \text{sign}[U_\omega - I_{sv}], \quad (1)$$

$$U_\omega = I_{sv}^* \text{sign}[\omega_r^* - \hat{\omega}_r - \gamma_1 p \hat{\omega}_r - \gamma_2 p^2 \hat{\omega}_r]. \quad (2)$$

У ході дослідження на математичній моделі з'ясовано, що якщо в системі керування, запропонованій в [2], замість застосованого в ній регулятора швидкості використовувати релейний регулятор швидкості з перемикаючою функцією (2), то досягається висока якість регулювання швидкості без перерегулювання і статичної помилки. При цьому вимірюваними величинами в алгоритмі фільтра Калмана були активна і реактивна проєкції вектора струму статора. Вимірювані струми розглядалися як випадкові процеси для аналізу ступеня відповідності реальних умов роботи фільтра Калмана в цій системі керування теоретично найбільш сприятливим умовам. Високочастотні пульсації струмів, породжувані перемикальними релейними регуляторів у ковзних режимах, апріорно приймалися за центрований випадковий процес, властивості якого треба дослідити на предмет близькості до гаусівського розподілу, і, що більш важливо, на предмет близькості до білого шуму — відсутності кореляції між сусідніми дискретними вимірами струму.

У середовищі програмування Matlab написана програма математичної моделі АМ з релейно-векторною системою керування, яка має в контурі зворотного зв'язку фільтр Калмана для ідентифікації опорного вектора потокозчеплення ротора і швидкості обертання ротора. За основу електропривода взята АМ типу 4A132M4Y3 з наступними технічними даними:

Основні блоки системи керування АМ, з якої для дослідження брався активний струм статора, показані на функціональній схемі рис. 1. Асинхронна машина АМ живиться від перетворювача частоти ПЧ з векторним керуванням. В перетворювачі фаз ПФ вимірювані фазні струми і напруги статора АМ переводяться до ортогональної нерухливої системи координат α, β і далі подаються на вхід фільтра Калмана (ФК). В колі зворотного зв'язку ФК визначає модуль $\hat{\Psi}_r$ опорного вектора потокозчеплення ротора, синус і косинус кута δ його повороту відносно статора і оцінку кутової швидкості обертання ротора $\hat{\omega}_r$. Перетворювач координат ПК1 призначений для переведення двох сигналів проєкцій вхідного вектора струму статора з

$P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_{sl} = 380 \text{ В}$; $n_n = 1460 \text{ об/хв}$. З інтервалом дискретизації за часом $\Delta t = 10^{-5} \text{ с}$ розраховані перехідні процеси і точки значень координат записувалися на кожному кроці в текстовий файл. Потім цей текстовий файл зчитувався в Mathcad і засобами цієї програми точки значень координат електропривода піддавалися необхідній обробці й статистичному аналізу.

Спершу було здійснено збудження АМ по каналу реактивної потужності і регулятор модуля поточозчеплення утримує його на номінальному рівні Ψ_{rn} . При цьому структура системи керування в каналі активної потужності містить релейні регулятори із законами керування (1) і (2). Досліджувався активний струм статора I_{sv} як випадковий процес на інтервалах роботи і релейного регулятора струму (1) і релейного регулятора швидкості з перемикаючою функцією (2). Графіки кутової швидкості ротора ω_r , її оцінки $\hat{\omega}_r$ і активного струму статора I_{sv} представлені на рис. 2.

На інтервалах пуску і гальмування в ковзному режимі працює регулятор струму і обумовлює його високочастотні пульсації, що як центрований випадковий процес показаний на рис. 3. Взята ділянка графіка струму довжиною 0.08 с, що складається з $N=8000$ точок вимірів струму. По цій вибірці побудована емпірична функція щільності розподілу $f^*(\tilde{I}_{sv})$, показана на рис. 4. З гістограми на рис. 4 випливає практична рівність ймовірностей влучення значень струму \tilde{I}_{sv} в кожний з інтервалів, на які розбивається весь діапазон можливих значень струму. Таким чином, при роботі релейного регулятора струму його пульсації розподілені за рівномірним законом.

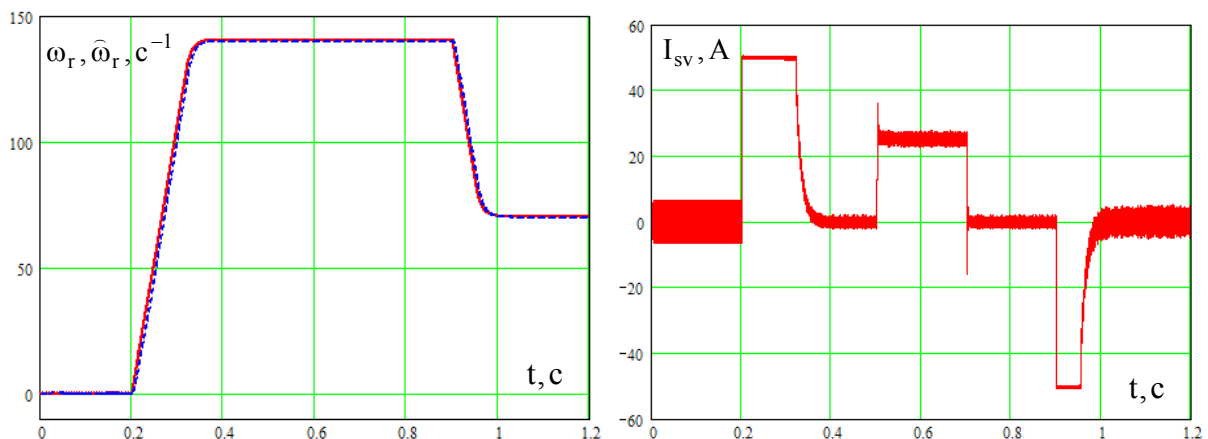


Рис. 2. Графіки перехідних процесів швидкості, її оцінки (пунктирна лінія) та активної складової струму статора

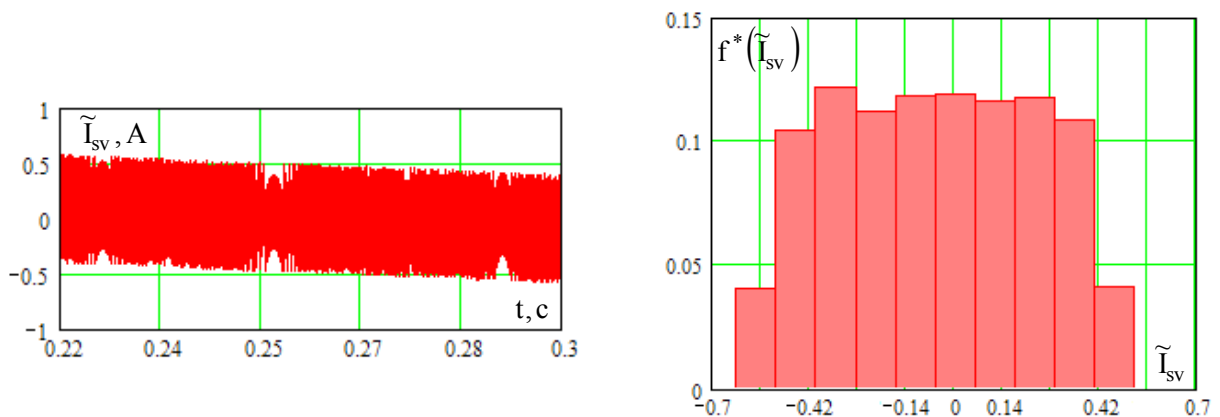


Рис. 3. Пульсації струму на інтервалі пуску

Рис. 4. Емпірична функція щільності розподілу значень пульсацій струму

Щоб з'ясувати, чи існують у шумі \tilde{I}_{sv} сховані періодичності і зв'язок між близькими його значеннями, потрібно побудувати автокореляційну функцію. Припускаючи вихідну послідовність ергодичною, замінюємо розрахунок за багатьма реалізаціями розрахунком за однією довгою часовою реалізацією, тобто користуємося відомою формулою [8]:

$$R_\tau = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} (\tilde{I}_{sv})_i (\tilde{I}_{sv})_{i+\tau} . \quad (3)$$

Як правило, аналізу піддають нормовану автокореляційну функцію $r_\tau = R_\tau / R_0$. Розрахована нормована автокореляційна функція дискретної послідовності значень пульсацій струму \tilde{I}_{sv} на обраному інтервалі перехідного процесу. Ця емпірична нормована автокореляційна функція активного струму статора на інтервалах роботи його релейного регулятора в ковзному режимі зображена на рис. 5 під цифрою 1. У результаті апроксимації емпіричної кореляційної функції ергодичного стаціонарного випадкового процесу пульсацій активного струму статора загасаючою косинусоїдою одержали наступний аналітичний вираз

$$r(\tau) = e^{-a|\tau|} \cos(2\pi f_0 \tau), \quad (4)$$

де $a = 33900 \text{ c}^{-1}$, $f_0 = 33760 \text{ Гц}$.

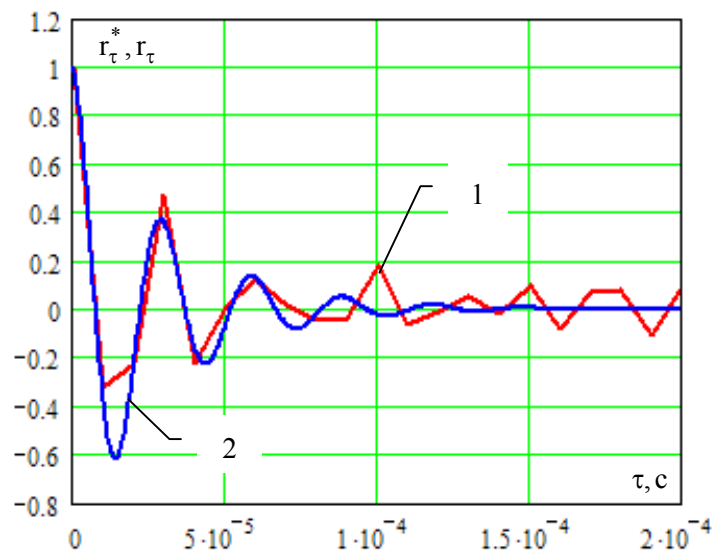


Рис. 5. Автокореляційні функції струму при роботі регулятора струму в ковзному режимі: 1 — емпірична нормована автокореляційна функція струму; 2 — графік аналітичної автокореляційної функції (4), який згладжує ламану 1

Якість апроксимації видно при розгляді графіка 2 на рис. 5. Аналітична автокореляційна функція представляє стандартну загасаючу косинусоїду. Найбільшої потужності (максимум спектральної щільності) сигнал досягає на частоті f_0 . Інтервал кореляції не більший ніж $3/a = 8.85 \cdot 10^{-5} \approx 10^{-4} \text{ c}$. При $\tau = 0$ буде $r(0) = 1$. Інші значення автокореляційної функції для білого шуму повинні бути близькими до нуля. У даному випадку час кореляції струму більше періоду відновлення даних $\Delta t = 10^{-5} \text{ c}$. Тому пульсації струму представлені корельованим випадковим сигналом. Якщо час відновлення даних узяти порядку 10^{-4} c або більший, то час кореляції струму буде менше ($3/a = 8.85 \cdot 10^{-5} \approx 10^{-4} \text{ c}$) періоду відновлення даних. У такому випадку функція r_τ^* практично буде задовольняти умовам (перевірено на математичній моделі):

$$r_{\tau}^* = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \tau = 0; \\ 0, & \text{якщо } \tau \neq 0, \end{cases} \quad (5)$$

і випадкову складову струму можна вважати білим шумом. Для інтервалу гальмування результати аналізу випадкового процесу струму аналогічні. Таким чином, за рахунок малого інтервалу дискретизації за часом ($\Delta t = 10^{-5} \text{ c}$) вдалося виявити автокореляційну функцію шуму струму. Однак практично при роботі релейного регулятора струму в ковзному режимі високочастотні пульсації струму можна прийняти за квазібілий шум.

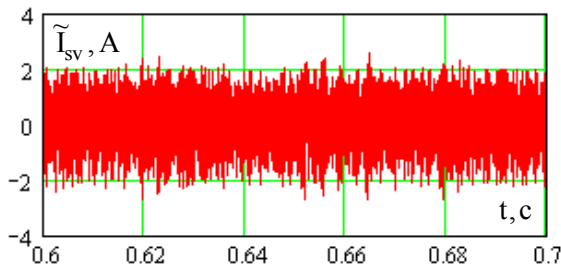


Рис. 6. Пульсації струму при роботі регулятора швидкості в ковзному режимі

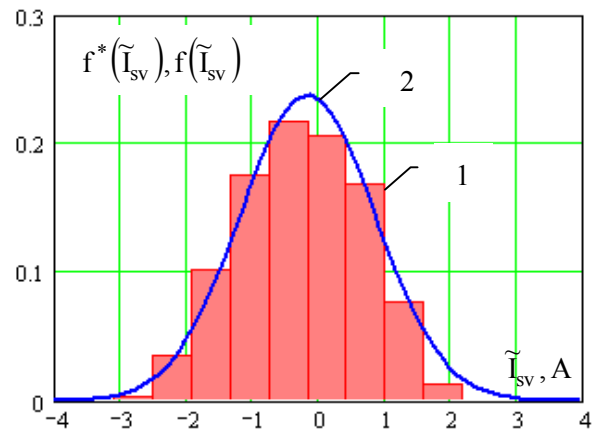


Рис. 7. Емпірична функція щільності розподілу (1) значень пульсацій струму і функція, яка її згладжує (2)

Крім інтервалів пуску і гальмування існують інтервали стабілізації швидкості, на яких випадковий процес пульсацій струму створюється релейним регулятором швидкості, який працює в ковзному режимі. На ділянці 0.6 — 0.7 с, коли прикладене навантаження, швидкість стабілізується її регулятором, який має перемикаючу функцію (2) і працює в ковзному режимі. З графіка струму віднімалася його детермінована складова і залишився високочастотний шум \tilde{I}_{sv} , що піддався статистичному аналізу (рис. 6). Інтервал дискретизації за часом той же самий ($\Delta t = 10^{-5} \text{ c}$) і об'єм вибірки дорівнює $N=10000$. По цій вибірці побудована емпірична функція щільності розподілу $f^*(\tilde{I}_{sv})$ і зроблена її апроксимація $f(\tilde{I}_{sv})$, що показані на рис. 7. Крива, що згладжує, описується аналітичною залежністю

$$f(\tilde{I}_{sv}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \alpha} \exp \left[-\frac{(\tilde{I}_{sv} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (6)$$

нормального (гаусівського) закону розподілу з наступними значеннями параметрів: $\alpha = 1.677$, $\mu = -0.176$, $\sigma = 1.016$.

Таким чином, з'ясовано, що при роботі регулятора швидкості в ковзному режимі з перемикаючою функцією (2), значення пульсацій активного струму статора підлягають нормальному закону розподілу. Додаткові дослідження на математичній моделі показали, що, якщо перейти у функції перемикавання (2) від гнучких до жорстких зворотних зв'язків, то шум струму при роботі такого регулятора швидкості буде описуватися рівномірним законом розподілу. Виходить, що різні структури релейних регуляторів породжують різні закони розподілу значень випадкового процесу струму. Статистичний аналіз струму при роботі регуляторів струму і швидкості з різними функціями перемикавання виявив поки тільки два види розподілу пульсацій струму: рівномірний і нормальний.

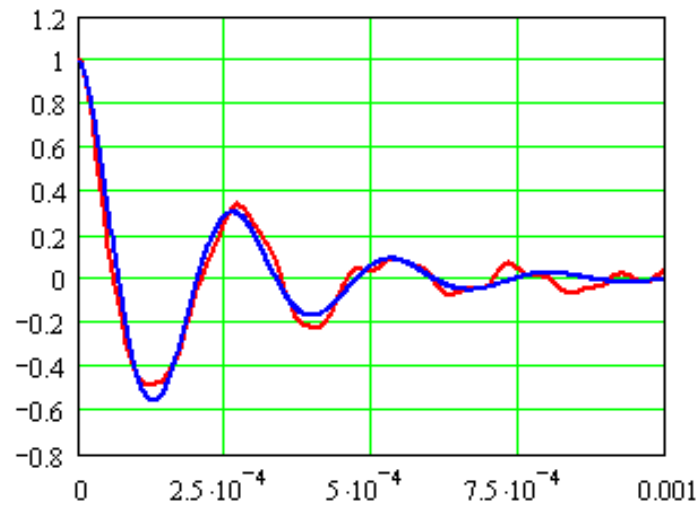


Рис. 8. Автокореляційні функції струму при роботі регулятора швидкості в ковзному режимі: 1 — емпірична нормована автокореляційна функція струму; 2 — графік аналітичної автокореляційної функції (4), який згладжує ламану 1 при роботі регулятора швидкості

За формулою (3) розрахована автокореляційна функція випадкового процесу струму при роботі регулятора швидкості з перемикаючою функцією (2) у ковзному режимі. Результати розрахунку представлені на рис. 8 під цифрою 1. Здійснено апроксимацію кривої 1 на рис. 8 аналітичною залежністю вигляду (4) з наступними значеннями параметрів: $a = 4474 \text{ c}^{-1}$, $f_0 = 3716 \text{ Гц}$. Аналітична автокореляційна функція представляє загасаючу косинусоїду, яка зображена на рис. 8 під цифрою 2. Найбільшої потужності (максимум спектральної щільності) сигнал досягає на частоті $f_0 = 3716 \text{ Гц}$. Кореляційна функція загасає за час $3/a = 6.7 \cdot 10^{-4} \approx 10^{-3} \text{ c}$. На інших інтервалах роботи регулятора швидкості автокореляційна функція має такий же вигляд (формула (4)) з параметрами, які змінюються незначно. Можна сказати, що для всіх показаних на рис. 2 динамічних режимів роботи електропривода випадковий процес струму має незмінний вигляд автокореляційної функції (4). У ході дослідження випадкового процесу струму з іншими структурами релейних регуляторів струму і швидкості інших видів кореляційних функцій не виявлено.

Кореляційні функції в обох випадках загасаючі, що вказує на відсутність схованих періодичностей в активній складовій струму статора. Однак час згасання автокореляційної функції характеризує частотний спектр сигналу. З порівняння аналітичних виразів функції r_t на рис. 5 і рис. 8 випливає, що спектр пульсацій струму при роботі регулятора струму на порядок більш високочастотний, ніж спектр цього ж струму при роботі регулятора швидкості. На це вказує той факт, що автокореляційна функція на рис. 8 має час згасання на порядок більший, ніж час згасання такої ж функції на рис. 5. Цей висновок наочно демонструють графіки спектральної щільності потужності на рис. 9, побудовані за формулою

$$W(f) = 2a \left(\frac{1}{a^2 + 4\pi^2(f + f_0)^2} + \frac{1}{a^2 + 4\pi^2(f - f_0)^2} \right), \quad (7)$$

яка відповідає автокореляційній функції вигляду (4) при двох парах знайдених числових параметрів a і f_0 . На рис. 9 спектральна щільність пульсацій струму при роботі релейного регулятора струму в ковзному режимі показана лінією 1, а спектральна щільність пульсацій струму при роботі релейного регулятора швидкості в ковзному режимі показана лінією 2. Видно, що шум струму на порядок більш високочастотний при роботі релейного регулятора струму, ніж шум струму у випадку ковзного режиму регулятора швидкості. Амплітуда пульсацій струму

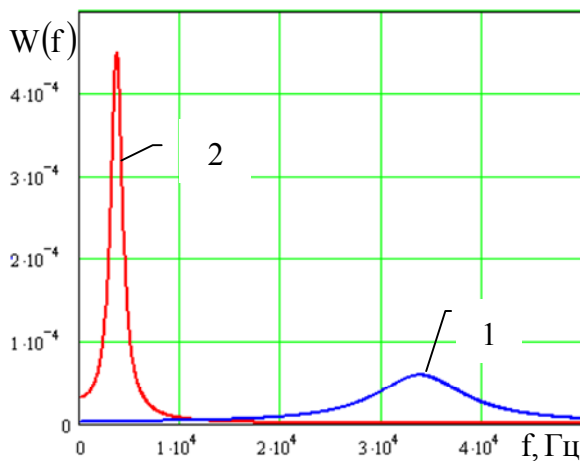


Рис. 9. Спектральна щільність потужності пульсацій активного струму статора при роботі регуляторів струму (1) і швидкості (2)

ними вимірюваними сигналами для фільтра Калмана служать проекції вектора струму статора. При роботі релейного регулятора в ковзному режимі пульсації активного струму статора можна розглядати як випадковий процес. Регулятор струму підпорядкований регулятору швидкості. Підпорядковане включення регуляторів забезпечує те, що шум струму при всіх перехідних процесах створюється зшиванням за часом ділянок випадкового процесу струму, на яких працюють у ковзному режимі регулятор струму або регулятор швидкості. Ці ділянки випадкового процесу струму різні за своїми статистичними характеристиками. Ковзний режим регулятора струму забезпечує ділянки пульсацій струму, які можна прийняти за квазібілий шум. Цього не можна сказати про інтервали пульсацій струму, де в ковзному режимі працює регулятор швидкості. Пульсації струму, створені ковзним режимом регулятора швидкості, представляють випадковий процес з повільно загасаючою косинусоїдальною кореляційною функцією — час згасання кореляційної функції ($10^{-3} c$) приблизно в десять разів більший максимально можливого інтервалу дискретизації за часом ($\Delta t = 10^{-4} c$), при якому розширений фільтр Калмана з його лінеаризованою моделлю ще зберігає асимптотичну стійкість. Виходить, що при роботі регулятора швидкості, коли вимірювані струми статора являють собою корельований випадковий процес, фільтр Калмана при достатньо малих кроках дискретизації за часом не тільки зберігає асимптотичну стійкість, але і якісно ідентифікує швидкість і потокозчеплення, тобто область практичного застосування фільтра Калмана ширше, ніж теоретичні передумови щодо статистичних властивостей шумів виміру, апріорно прийняті при виведенні цього алгоритму ідентифікації. Таким чином, у релейно-векторній системі керування АМ алгоритм фільтра Калмана успішно справляється з задачею ідентифікації координат електропривода навіть на тих ділянках кривих струму, де їх високочастотна складова не квазібілий шум, а корельований випадковий процес.

Список використаної літератури

1. Ключев О., Садовой О., Сергієнко С., Сохіна Ю. Використання фільтра Калмана як спостерігача стану у векторній системі керування асинхронною машиною. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук, Випуск 5/2022(136). С. 27–35.
DOI: 10.32782/1995-0519.2022.5.3

більша при роботі регулятора швидкості, що відображається великим значенням максимуму спектральної щільності потужності.

Висновки

Отримані результати можна інтерпретувати в такий спосіб. Асинхронна машина разом з релейно-векторною системою керування і фільтром Калмана в колі зворотного зв'язку представляє складну нелінійну систему керування, для якісної роботи якої необхідний малий інтервал дискретизації за часом — порядку $10^{-5} c$. При такому незначному прирощенні за часом лінеаризована модель (матриці Якобі у фільтрі Калмана) достатньо точно описує динаміку реального об'єкта керування на кожному кроці розрахунку керуючих впливів. Вхід-

2. Kliuiev O., Sadovoi O., Sokhina Yu., Serhiienko S. Kalman Filter as Part of a Relay-Vector System Control of Asynchronous Electric Drive. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2023. P. 1–5.
DOI:10.1109/MEES61502.2023.10402448
3. Jairo C., Javier V., Edwar J. Flight Control of a 1-DOF Helicopter System using a Sliding Mode Controller for Disturbance Rejection. *International Journal of Engineering Research and Technology*, ISSN 0974-3154, 2020, Vol. 13, No. 11. pp. 3292–3297.
4. Lahari L., Madhav G. Dual Sliding Mode with PI Controller Based Switched Reluctance Motor Drive. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, Vol. 8, Issue 11. pp. 197–202.
5. Balakrishnan A.V. Kalman Filtering Theory, 1987. 253 p.
6. Швець О.В., Жук С.Я. Алгоритм оцінювання параметрів руху цілі з виявленням маневру. *Вісник Національного технічного університету України “КПІ”, Серія – Радіотехніка*, 2009, №38. С. 45–50.
7. Загірняк М.В., Клепиков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. Енергоєфективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ, 2018. 311 с.
8. Валєєв К.Г., Джалладова І.А. Теорія ймовірностей та теорія випадкових процесів: Навч. посіб., Київ: КНЕУ, 2009. 378 с.

STATISTICAL ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS MACHINE CURRENT WITH RELAY-VECTOR CONTROL SYSTEM

Abstract

Kalman filters are widely used as observers of the coordinates of electric drives in the case when the measured variables include random disturbances. The extended Kalman filter is perfectly described as part of vector control systems with linear current and speed regulators, when there are noises in the measurement of the variables by means of which this observer is synchronized with the control object. But the work of the Kalman observer together with the relay regulators, when there is no obstacle to the measurement of the input variables, which are most often used as currents, has not yet been investigated. This paper proves the effective operation of the Kalman observer in the relay-vector control system of an asynchronous machine when the stator currents and voltages are measured without interference. This is due to the fact that the currents in the sliding modes of the relay regulators have slight high-frequency pulsations. The paper carried out a statistical analysis of these high-frequency current pulsations and found that they represent a random process with a uniform or normal distribution law. Moreover, when the current regulator operates in the sliding mode, it is possible to consider high-frequency current fluctuations as quasi-white noise. When the speed controller is operating in the sliding mode, the random current process has a decaying cosine correlation function. The dependence of the statistical characteristics of the current on the structure of the switching function of the speed regulator was also revealed. The method of mathematical modeling confirmed that the Kalman filter works effectively even when the random disturbance in the form of current pulsations, which are generated in the sliding mode of the relay regulators, is a correlated random process. The time quantization step for the asymptotic stability of the control system should be insignificant, namely, an order of magnitude smaller than the decay time of the correlation function of the random process of current ripples when operating in the sliding mode of the speed controller.

References

- [1] Kliuiev O. & Sadovoi O. & Serhiienko S. & Sokhina Yu. (2022) «*Vykorystannia filtra Kalmana yak sposterihacha stanu u vektornii systemi keruvannia asynkhronnoi mashynoiu*» [Using the Kalman filter as a state observer in the vector control system asynchronous machine]. Mykhailo

- Ostrogradsky KrNU Bulletin. Kremenchuk, Issue 5/2022(136), pp. 27–35. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.5.3 [in Ukrainian].
- [2] Kliuiev O. & Sadovoi O. & Sokhina Yu. & Serhiienko S. (2023). *Kalman Filter as Part of a Relay-Vector System Control of Asynchronous Electric Drive*. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023. P.1–5. DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402448
- [3] Jairo C. & Javier V. & Edwar J. (2020). *Flight Control of a 1-DOF Helicopter System using a Sliding Mode Controller for Disturbance Rejection*. International Journal of Engineering Research and Technology. ISSN 0974-3154, Vol. 13, No. 11, pp. 3292–3297.
- [4] Lahari L. & Madhav G. (2019). *Dual Sliding Mode with PI Controller Based Switched Reluctance Motor Drive*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Vol. 8, Issue 11. pp. 197–202.
- [5] Balakrishnan A.V. (1987) *Kalman Filtering Theory*, 1987. 253 p.
- [6] Shvets O.V. & Zhuk S.Ia. (2009) «*Alhorytm otsiniuvannia parametriv rukhu tsili z vyavlenniam manevru*» [Algorithm for estimating target movement parameters with maneuver detection]. Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI", Series - Radio Engineering, No. 38. pp. 45–50. [in Ukrainian].
- [7] Zahirnyak M.V. & Klepikov V.B. & Kovbasa S.M. & Mikhalskyi V.M. & Peresada S.M. & Sadovoi O.V. & Shapoval I.A. (2018) *Enerhoefektyvni elektromekhanichni systemy shyrokoho tekhnolohichnoho pryznachennia*. [Energy-efficient electromechanical systems of a wide technological purpose]. Institute of Electrodynamics, National Academy Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018. 311p. [in Ukrainian].
- [8] Valieiev K.H. & Dzhalladova I.A. (2009) *Teoriia ymovirnostei ta teoriia vypadkovykh protsesiv* [The theory of probabilities and the theory of random processes]. Education guide, Kyiv: KNEU, 2009.378 p.

Надійшла до редколегії 30.01.2024