# *АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ*

**УДК 629.4.014** **DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.157.2015.62010**

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У ТЯГОВОМУ АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ НА ОСНОВІ ЙОГО МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

**Асп. Я.В. Ващенко**

## МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТЯГОВОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ НА ОСНОВАНИИ ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**Асп. Я.В. Ващенко**

## THE METHOD OF IDENTIFYING FAULTS IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC TRACTION DRIVE ON THE BASIS OF ITS MATHEMATICAL MODEL

**Postgraduate Y.V. Vashchenko**

*Розглянуто концепцію побудови системи діагностування тягового асинхронного електропривода рухомого складу на основі його математичної моделі. На прикладі алгоритму фільтра Калмана розглянуто спосіб для визначення появи несправностей (пошкоджень) в асинхронному електродвигуні. Визначено критерії оцінки ефективності роботи запропонованого алгоритму діагностування.*

***Ключові слова:*** *асинхронний електропривод, аварійні режими, діагностика несправностей, методи на основі моделі системи, фільтр Калмана.*

*Рассмотрена концепция построения системы диагностирования тягового асинхронного электропривода подвижного состава на основании его математической модели. На примере алгоритма фильтра Калмана рассмотрен способ для определения появления неисправностей (повреждений) в асинхронном двигателе. Определены критерии оценки эффективности работы предложенного алгоритма диагностирования.*

***Ключевые слова:*** *асинхронный электропривод, аварийные режимы, диагностика неисправностей, методы на основании модели системы, фильтр Калмана.*

*Modern diagnostic system to perform the protection functions of electric rail vehicle equipment suggest the use of efficient computer algorithms. Its operation principle is usually based on a mathematical object model, which is diagnosed, in this case - traction induction motor.*

*In the paper is considered the concept of building a traction asynchronous electric rolling stock diagnostic system on the mathematical model-based approach. On the example of Kalman filter algorithm is discussed method for determining the occurrence of faults (damages) in the induction motor. The criteria for evaluating the performance of the proposed algorithm diagnosis are defined.*

*The proposed approach will determine the diagnostic parameters in real time to prevent the emergency modes of asynchronous traction electric drive.*

***Keywords:*** *asynchronous traction drive, emergency modes, fault diagnosis, model-based methods, Kalman filter.*

**Вступ.** З урахуванням постійного удосконалення тягового асинхронного електропривода (ТАЕП) особливої актуальності набувають завдання з розроблення загальних методів дослідження аварійних станів, принципів побудови та практичних рекомендацій зі створення ефективних систем захисту обладнання рухомого складу з асинхронними двигунами.

На сьогоднішній день існуючі засоби захисту ТАЕП у цілому дозволяють виконувати своєчасне обмеження критичних значень параметрів привода для попередження виникнення аварійних режимів [1]. У першу чергу це забезпечується використанням пристроїв, побудованих, як правило, на принципах реєстрації відхилень від контрольного (амплітудного) рівня.

Незважаючи на різноманіття видів пристроїв захисту, експлуатація потребує систем діагностування, які б упереджували виникнення передумов аварійних режимів. Перспективи розвитку таких систем вбачаються у програмних (математичних, розрахункових) алгоритмах і методах вирішення, оскільки вони дозволяють швидко змінювати необхідні налаштування, реалізовувати цифрові алгоритми спостереження і оцінки стану та ін. [2].

**Аналіз останніх публікацій.** На сьогодні час серед методів діагностування переважного поширення набули методи гармонічного (спектрального) аналізу. Здебільшого вони застосовуються при аналізі струму (MCSA) або вібродіагностиці стаціонарно працюючих асинхронних двигунів [3, 4].

У випадку, коли асинхронний двигун отримує живлення змінної частоти від перетворювача, такий аналіз є більш ускладненим, зважаючи на додаткові гармоніки, згенеровані інвертором, які частково збігаються (перекриваються) з гармоніками, викликаними несправностями [5]. Тому звичайні способи, засновані на спектральному аналізі, не зовсім добре адаптовані для частотно-регульованих електроприводів, і деякі автори пропонують методи на основі безперервної оцінки параметрів двигуна, що змінюються при появі відмови двигуна, - методи, засновані на моделі системи [6, 7].

Методи на основі моделі системи дозволяють порівнювати діагностичні параметри фізичного процесу та математичної моделі, що дозволяє на основі вимірювань у системі встановлювати її стан. Особлива увага в таких методах діагностики приділяється точності оцінки, отриманої різними підходами.

По-перше, це можуть бути: метод найменших квадратів, метод моделювання (нелінійним програмуванням в оф-лайн режимі) у звичайній формі або з урахуванням апріорної інформації, метод максимальної правдоподібності.

Другою групою методів моделювання є генератори залишків: спостерігач Luenberger, рівняння парності, спостерігачі невідомих входів, узагальнені спостерігачі та ін.

Особливий випадок складають розширені спостерігачі стану, що можуть включати всі або частину параметрів вектора стану: розширений спостерігач Люенбергера ELO, розширений фільтр Калмана EKF, спостерігачі на основі еталонної моделі (MRAS) та ін., які базуються на нелінійній розширеній моделі досліджуваної системи.

Недосконалістю всіх методів є необхідність вибору компромісу між якісним представленням і часом обчислення, оскільки аналітичні моделі являють собою сукупність всіх пов'язаних фізичних явищ з урахуванням певних допущень.

Для здійснення безперервної («он-лайн») діагностики тягового асинхронного електропривода рухомого складу необхідна також адаптація зазначених методів до умов змінних швидкості та навантаження.

**Мета роботи.** Розроблення удосконаленого методу діагностики тягового асинхронного електропривода шляхом підходу «на основі математичної моделі системи».

**Результати досліджень.** Одним з ефективних методів є фільтр Калмана, який дозволяє здійснювати ідентифікацію (оцінку, діагностику) вектора стану параметрів досліджуваної системи при відомій структурі її динамічної моделі з використанням ряду неповних або зашумлених вимірювань.

Алгоритм «розширеного» фільтра Калмана дозволяє не тільки здійснювати оцінку параметрів у реальному часі, але і проводити визначення тих змінних стану об’єкта, що не можуть бути виміряні безпосередньо. Виконаний у даній роботі розширений фільтр Калмана призначений для неперервної оцінки значень струмів, потокозчеплень, розрахунку частоти обертання ротора асинхронного тягового привода, активних опорів статора та ротора.

Алгоритм розрахунку розширеного фільтра Калмана включає в себе математичну динамічну модель одного з основних об’єктів привода – тягового асинхронного двигуна на основі відомих диференціальних рівнянь і допущень (рис. 1) [8]. Відомими вхідними

сигналами для фільтра Калмана є управляючий сигнал – напруга живлення $U_S$ та виміряні струми статора $I_S$ в двокоординатних проекціях. Змінними стану є струми статора $i_{ds}$, $i_{qs}$ та потокозчеплення ротора $\psi_{dr}$, $\psi_{qr}$. Розширеним фільтр Калмана стає при включенні до змінних стану швидкості обертання ротора $\omega_p$, активних опорів статора $R_s$ або ротора $R_r$, електромагнітного моменту $M_e$, постійної часу $T_e$ тощо.

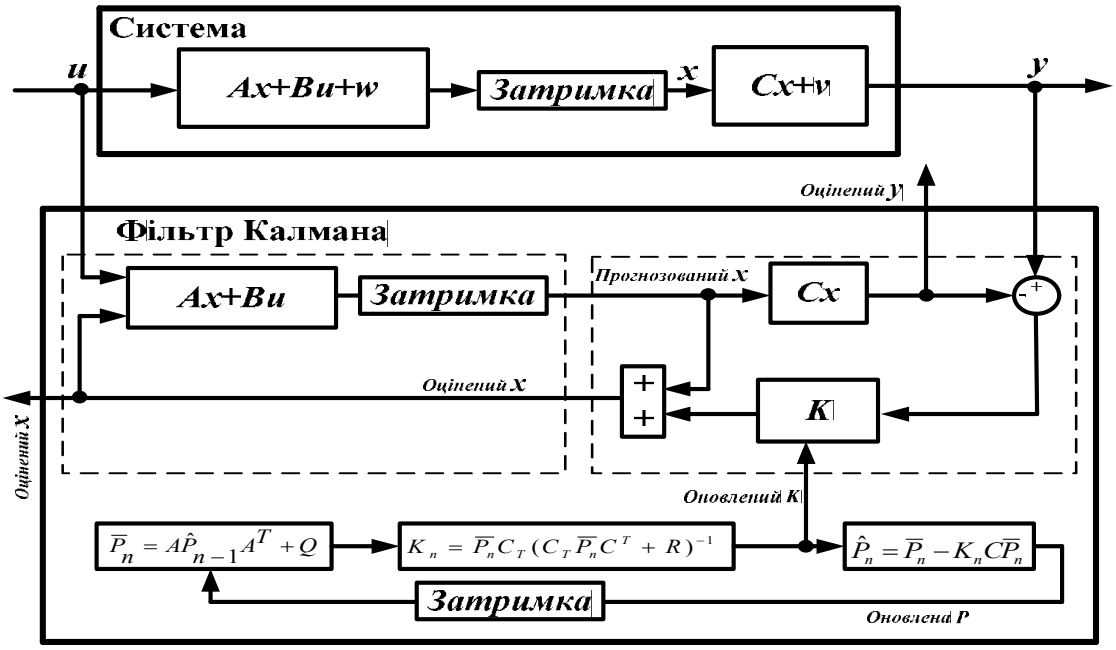


Рис. 1. Структура фільтра Калмана

Алгоритм полягає в розрахунку двох повторюваних циклів: прогнозування стану та коригування прогнозованого значення. Все це виконується з урахуванням можливостей появи неточностей і зашумленостей вимірювань. До випадкових шумів належать всі фактори, що викликають відхилення від нормального режиму функціонування тягового електропривода (інформація, що не передається вимірювальним датчикам, випадкові величини): наприклад, нагрів та охолодження обмоток, зміна стану магнітних кіл, частота при роботі широтно-імпульсної модуляції тощо.

Розширені рівняння моделі системи подаються як

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + G(t)w(t) \quad \textit{система} \\ y &= Cx + v(t) \quad \textit{вимірювання} \end{aligned}, \qquad (1)$$

де $A$, $B$, $C$ – вхідні та вихідна матриці системи;

$G$ – вагова матриця шуму;

$x$ – вектор стану системи;

$u$ – вектор функції управління;

$w(t)$ – матриця шуму стану моделі;

$v(t)$ – матриця шуму виходу моделі (вимірювань).

Достовірність прийнятих рішень при побудові системи діагностування проілюстровано на прикладі процесу оцінки швидкості та струму, наведених на рис. 2.

Для діагностування несправностей обмоток статора і стержнів ротора фільтром Калмана необхідно відслідковувати деякий параметр схеми заміщення. Параметрами заміщення Т-подібної схеми заміщення ТАД є активні опори $Rs$, $Rr$, індуктивності фаз обмоток статора $Ls$ і ротора $Lr$, а також взаємна індуктивність $Lm$.

Наявність різних типів дефектів або пошкоджень вносить дисбаланс у двигуні [9]. Відомі результати показують, що якщо це пошкодження ротора, то збільшується його

опір, а інші параметри – опір статора і індуктивності розсіювання статора і ротора – зменшуються. Під час короткого замикання між витками обмотки статора опір статора зростає, а інші параметри зменшуються.

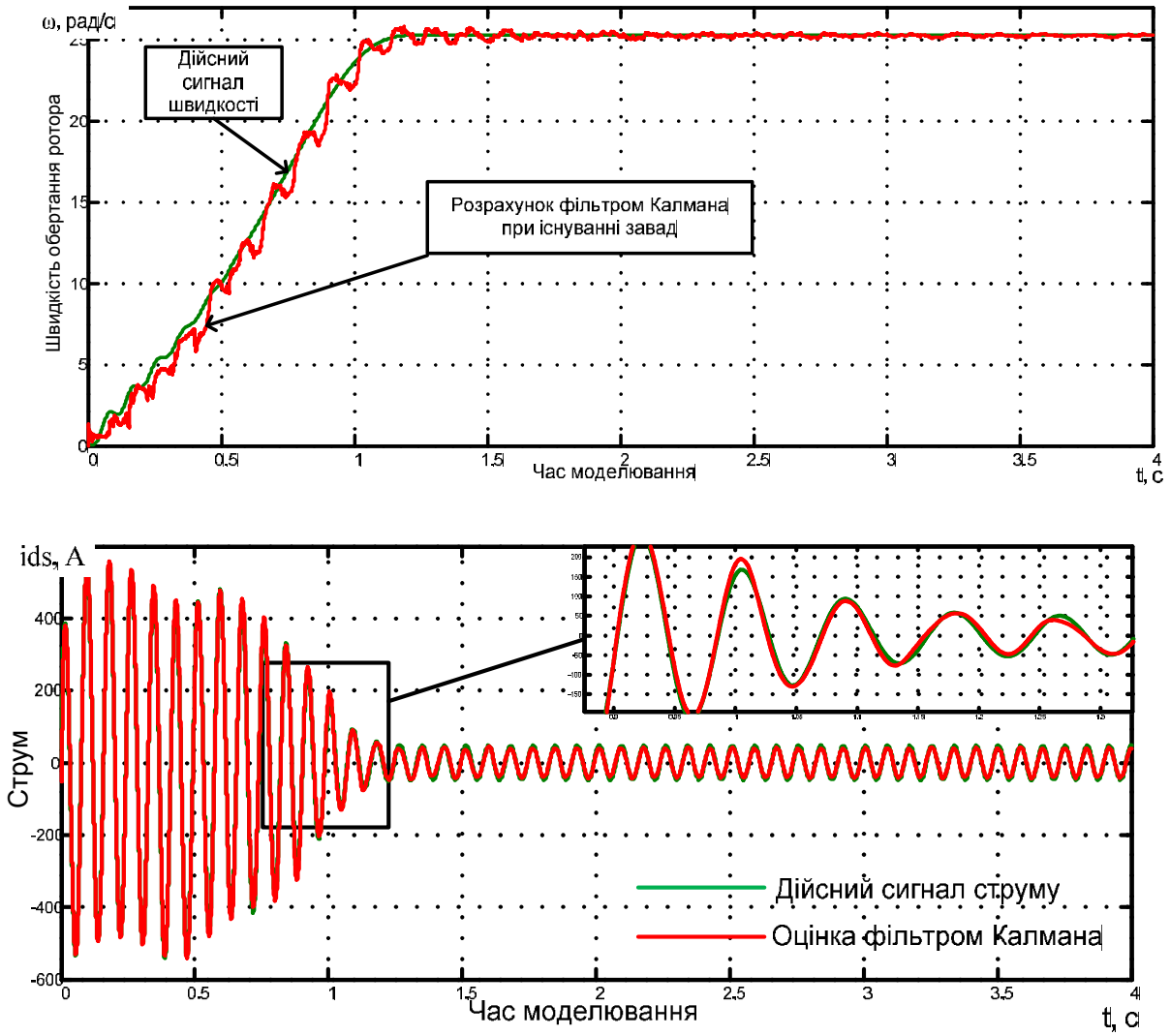


Рис. 2. Процес оцінки швидкості (*а*) і струму статора (*б*) розширеним фільтром Калмана

Для діагностування обриву стержнів ротора [10] на основі оцінки активного опору *Rr* модель змінних стану виглядатиме таким чином:

$$x(k) = [i_{s\alpha}(k)\; i_{s\beta}(k)\; \psi_{r\alpha}(k)\; \psi_{rb}(k)\; R_r(k)]^T \quad . \tag{2}$$

Для виконання розрахунків розширеним фільтром Калмана необхідне отримання похідної по активному опору ротора для системи рівнянь двигуна (динамічної моделі системи):

$$F(k)=\begin{bmatrix} 1-T(\gamma_1+\gamma_2 x_5) & 0 & T\frac{K_1}{L_r}x_5 & TpK_1\omega_p & T\left(\frac{K_1}{L_r}x_3-\gamma_2 x_1\right) \\ 0 & 1-T(\gamma_1+\gamma_2 x_5) & -TpK_1\omega_p & T\frac{K_1}{L_r}x_5 & T\left(\frac{K_1}{L_r}x_4-\gamma_2 x_2\right) \\ T\frac{L_m}{L_r}x_5 & 0 & 1-\frac{T}{L_r}x_5 & Tp\omega_p & T\left(\frac{L_m}{L_r}x_1-\frac{1}{L_r}x_3\right) \\ 0 & T\frac{L_m}{L_r}x_5 & Tp\omega_p & 1-\frac{T}{L_r}x_5 & T\left(\frac{L_m}{L_r}x_2-\frac{1}{L_r}x_4\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

У даній роботі на прикладі оцінки опору ротора *Rr* виконано моделювання, що дозволяє оцінити його величину та приймати на основі цього рішення про злам стержнів білячої клітки (рис. 3). Моделювання виконано в присутності шумових завад при вимірюванні на рівні ξ=±10 %.

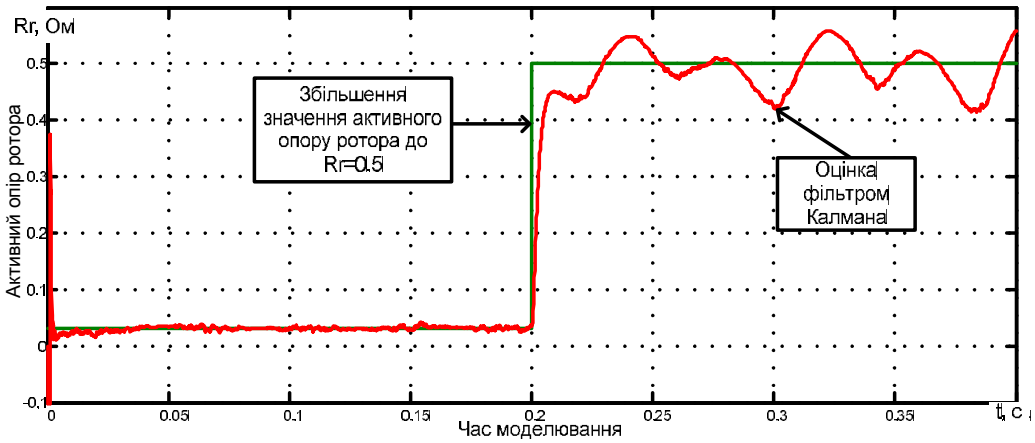


Рис. 3. Діагностування зламу стержнів ротора асинхронного двигуна розширеним фільтром Калмана

Наступним етапом проведення досліджень було виявлення коротких замикань (КЗ) в обмотках статора [11] асинхронного двигуна розширеним фільтром Калмана. Новий розширений вектор стану визначається як

$$x(k)=[i_{s\alpha}(k)\; i_{s\beta}(k)\; \psi_{r\alpha}(k)\; \psi_{rb}(k)\; R_s(k)]^T \quad . \quad (4)$$

Динамічна модель асинхронного двигуна при коротких замиканнях обмоток статора описується так:

$$F(k)=\begin{bmatrix} 1-\frac{K_r}{K_l}\cdot T & 0 & \frac{L_m\cdot R_r\cdot T}{L_r^2\cdot K_l} & \frac{p\cdot L_m\cdot x_5}{L_r\cdot K_l}\cdot T & \frac{(L_r^2+L_m^2\cdot R_r)\cdot L_r\cdot L_s}{L_r^2\cdot L_s\cdot(L_r\cdot L_s-L_m^2)}\cdot T \\ 0 & 1-\frac{K_r}{K_l}\cdot T & \frac{-p\cdot L_m\cdot x_5}{L_r\cdot K_l}\cdot T & \frac{L_m\cdot R_r\cdot T}{L_r^2\cdot K_l} & \frac{(L_r^2+L_m^2\cdot R_r)\cdot L_r\cdot L_s}{L_r^2\cdot L_s\cdot(L_r\cdot L_s-L_m^2)}\cdot T \\ \frac{L_m}{T_r}T & 0 & 1-\frac{T}{T_r} & -p\cdot x_5\cdot T & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{T_r}T & p\cdot x_5\cdot T & 1-\frac{T}{T_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де $T$ – інтервал вибірки (дискретність).

Як показано на рис. 4, за допомогою фільтра Калмана вдається знайти добре наближення оцінюваного сигналу до реального опору статора $R_s$. Кількісна величина збільшення цього опору може свідчити про кількість (процент) пошкоджених коротким замиканням витків.

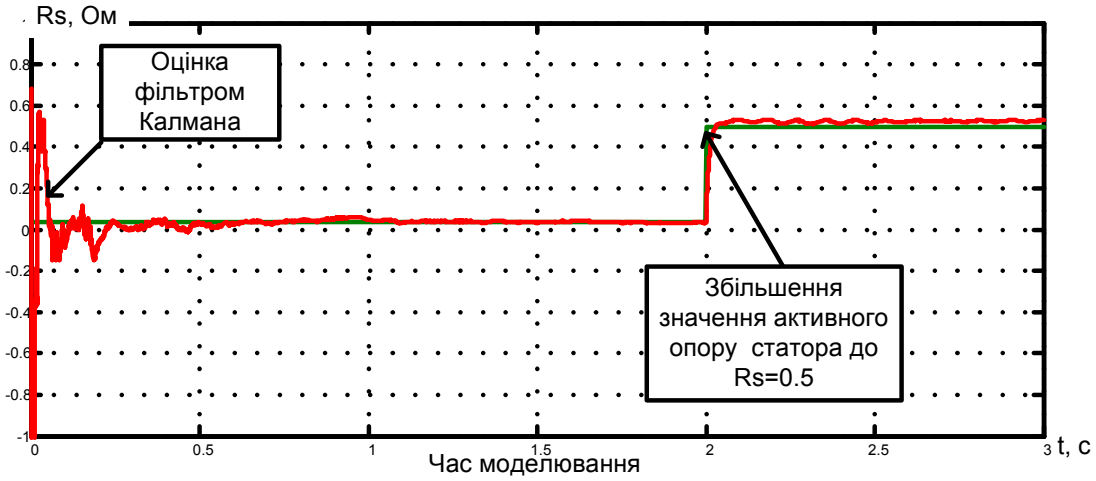


Рис. 4. Виявлення пошкодження витків обмотки статора ТАД за допомогою фільтра Калмана

Аналіз отриманих результатів показує, що фільтр Калмана дозволяє визначати параметри і змінні стану в реальному часі з допустимою для практичного використання похибкою і його можна використовувати для отримання інформації, необхідної для системи функціональної діагностики і захисту від аварійних режимів ТАД.

Оскільки на практиці практично неможливо виміряти ефективність роботи фільтра Калмана з урахуванням стану помилки вимірювань, оскільки не відомі істинні значення стану, постає завдання в розробленні методів перевірки правильності роботи фільтра. Пропонується визначення показників ефективності фільтра за допомогою «інновацій» [12].

Інновація (нововведення) $v_{k+1}$ визначається як різниця між спостереженням (вимірюванням) величини і її передбаченим значення $\hat{z}_{k+1|k}$ з використанням інформації, доступної в момент часу $k$.

$$v_{k+1}=z_{k+1}-H_{k+1}\hat{x}_{k+1|k} \quad . \quad (6)$$

Інновації або залишки є важливою мірою того, наскільки добре працює оцінювач. Очевидно, що якщо фільтр працює правильно, тоді $v_k$ – нульове середнє і біле з коваріацією $S_k$.

Відповідність фільтра можна оцінити шляхом застосування трьох процедур.

Тест 1 – переконатися, що інновації відповідні їх коваріаціям, перевіривши, що величина інновацій обмежена $\pm 2\sqrt{S_k}$ .

Для перевірки границь амплітуди інновації на рис. 5, *а* показано інноваційну послідовність разом з $\pm\sigma$ та $\pm 2\sigma$ границями від її амплітуди. Рисунок показує, що інновація незміщена і приблизно 95 % значень лежать у межах $\pm 2\sigma$ необхідних границь. Цього тесту іноді достатньо, щоб перевірити відповідність фільтра, але, тим не менш, на практиці доцільно також застосувати інші два тести.

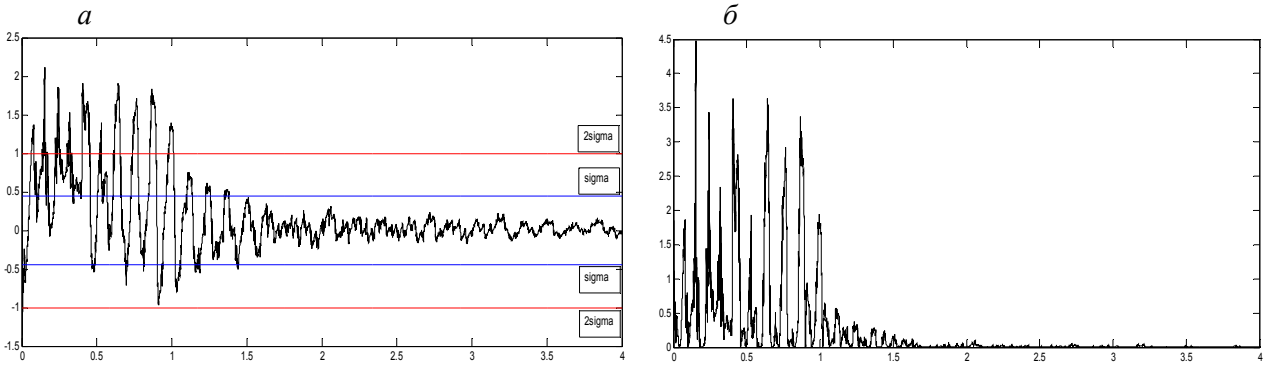


Рис. 5. Інновація та границі її стандартного відхилення (*а*), нормалізована інновація (*б*)

Тест 2 – переконатися, що інновація незміщена і біла. Це можна перевірити за допомогою перевірки гіпотези нормованих квадратичних інновацій – «$\chi^2$-тесту».

Для перевірки незміщеності обчислюються нормовані квадратичні інновації для послідовності *i* точок розрахунку фільтра Калмана:

$$q_{k+1}(i) = v_{k+1}(i) S_{k+1}^{-1}(i) v_{k+1}(i) \quad . \qquad (7)$$

Якщо це припущення виконується, тоді $q_{k+1}(i)$ існує для кожного $\chi^2$.

Для оцінки середнього необхідно мати *N* незалежних вибірок $q_{k+1}(i), i = 1,...N$ . Середнє цієї сукупності

$$\overline{q}_{k+1} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_{k-1}(i) \quad . \qquad (8)$$

У даному випадку можна використовувати той факт, що інновації є ергодичними, щоб оцінити середнє вибірки від середнього часу для довжини послідовності точок (тобто рухомого середнього), а не в середньому сукупності. Таким чином, можливо оцінити середнє від одного прогону фільтра Калмана як

$$\overline{q} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_k \; . \qquad (9)$$

Рис. 5, *б* показує нормалізовану інновацію та рухоме середнє інновації. Останнє, як правило, прагне до 1.0, коли *k* стає більшим. Щоб перевірити незміщеності, необхідно переконатися, що $\overline{q}$ лежить у довірчому інтервалі $[r_1,r_2]$, визначеному за гіпотезою $H_0$, що $N\overline{q} \in \chi^2_{Nm}$, розподіленою з імовірністю 1-$\alpha$. Таким чином, потрібно знайти такий $[r_1,r_2]$, що

$$P(N\overline{q} \in [r_1 r_2] \mid H_0) = 1 - \alpha \; . \qquad (10)$$

Для прикладу візьмемо *N*=100, $\overline{q}$ =1.11, нехай $\alpha$=0.05 (тобто визначаємо двосторонню 95 % довірчу область). Використовуючи статистичні таблиці (функція ‘chi2inv’ в Matlab), знаходимо, що

$$[r_1 r_2] = [\chi^2_{100}(0.025), \chi^2_{100}(0.975)] = [74.22, 129.56] \; .$$

Гіпотеза насправді прийнятна для цього прикладу.

Тест 3 – тест білизни (автокореляції) інновації. Для перевірки «білизни» необхідно довести, що

$$E[v_i^T v_j] = S_i \delta_{ij} \quad , \qquad (11)$$

Це можливо перевірити, перевіряючи, що скрізь, за виключенням, коли $i=j$, статистика, визначена рівнянням (11), дорівнює нулю в межах допустимої статистичної похибки. Можливо використовувати ергодичності, щоб перевизначити тестову статистику як усереднену за часом кореляцію:

$$r(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-\tau-1} v_k^T v_{k+\tau} \quad . \qquad (12)$$

Для досить великого $N$ можна вважати, що $r(\tau)$ нормально розподілена з нульовим середнім і дисперсією $1/N$. Тоді можна обчислити $2\sigma$-межі як $\pm 2/\sqrt{N}$ і переконатися, що принаймні 95 % значень потрапляють у цю довірчу область.

**Висновки**

1. Розглянута концепція побудови системи діагностування тягового асинхронного електропривода на основі алгоритму розширеного фільтра Калмана, що включає математичну модель об'єкта діагностування, дозволяє здійснювати безперервне відстеження та оцінку параметрів привода в режимі реального часу.

2. Виконане моделювання показало здатність виявлення відхилень параметрів двигуна на основі оцінки значень активних опорів ротора і статора, що може вказувати на злами стержнів ротора та міжвиткові короткі замикання обмоток статора.

3. Наведено основні критерії оцінки ефективності роботи фільтра Калмана.

***Список використаних джерел***

1. Покровский, С.В. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 [Текст] / под ред. С.В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.

2. Flammini, F. Railway safety, reliability and security: Technologies and systems engineering [Text] / Francesco Flammini. – Ansaldo STS, Italy, 2012. – 463 p.

3. Capolino, G.-A. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques [Text] / G.-A. Capolino, C. Bruzzese, R. Rosca, J. Estima // IEEE Industrial electronics magazine. – 2014. – P. 30-42.

4. Nandi, S. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – A rewiew [Text] / S. Nandi, Hamid A. Toliyat, X. Li // IEEE Transactions of energy conversion. – Vol.20, No.4. – 2005. – P. 719-729.

5. Kowalski, C.T. Stator and rotor faults monitoring of the inverter-fed induction motor drive using state estimators [Text] / C.T. Kowalski, R. Wierzbicki, M. Wolkiewicz // Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland: AUTOMATIKA. – № 54(3). – 2013. – P. 348-355.

6. Hamid, A.T. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis [Text] // Hamid A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin-Kelk. - CRC Press. - 2013. – 253 p.

7. Trigeassou, J.-C. Electrical machines diagnosis [Text] / J.-C. Trigeassou. – John Wiley & Sons, Inc.,2011. – 318 p.

8. Chan, T.-F. Applied intelligent control of induction motor drives [Text] / T. Chan, K. Shi. - John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2011. - 431 p.

9. Raison, B. Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique [Text] / These pour obtenir le grade de docteur de l'institut national polytechnique de Grenoble. – 2000. - 214 p.

10. Khaled, Y. Indirect vector control of induction motor with on line rotor resistance identification [Text] / K. Yahia, S.-E. Zouzou, F. Benchabane // Asian journal of information technology. 2006. – № 5(12). – P. 1410-1415.

11. Bachir, S. Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines [Text] / S. Bachir, S. Tnani, J.-C. Trigeassou, G. Champenois // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2006. – Vol.53, NO.3. – P. 963-972.

12. Reid I. Estimation II: Discrete-time Kalman filter [Text] / I. Reid, H. Term. – 2001. – 44 p.

Рецензент д-р техн. наук, професор А.П. Фалендиш

Ващенко Ярослав Васильович, аспірант кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050) 728-21-92. E-mail: yarl7680@gmail.com.

Vashchenko Yaroslav Vasylovych, postgraduate Chair of the automated systems of electric transport Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (050) 728-21-92. E-mail: yarl7680@gmail.com.

Стаття прийнята 13.10.2015 р.