

УДК 681.5.075

С. М. ПЕРЕСАДА, Т.В. ДИННИК

## АДАПТИВНИЙ СПОСТЕРІГАЧ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ

Національний технічний університет України,  
«Київський політехнічний інститут»

**Анотація.** Синтезовано адаптивний спостерігач частоти та миттєвих значень складових двофазної системи напруг мережі живлення для використання в алгоритмах векторного керування. Спостерігач гарантує глобальне експоненційне оцінювання та високу швидкодію, що підтверджено шляхом моделювання.

**Ключові слова:** адаптивний спостерігач, напруга живлення, частота, миттєве значення, амплітуда, асимптотичність.

**Аннотация.** Синтезирован адаптивный наблюдатель частоты и мгновенных значений составляющих двухфазной системы напряжений питающей сети для использования в алгоритмах векторного управления. Наблюдатель обеспечивает глобальное экспоненциальное оценивание и высокое быстродействие, что подтверждено путем моделирования.

**Ключевые слова:** адаптивный наблюдатель, питающее напряжение, частота, мгновенное значение, амплитуда, асимптотичность.

**Abstract.** Adaptive observer of frequency and instantaneous value of two-phase voltage components of mains supply is designed. The observer may be used in vector control algorithms. Designed observer provides global exponential estimation and high performance, which is confirmed by simulation.

**Keywords:** Adaptive observer, mains supply, frequency, instantaneous value, amplitude, asymptotic.

### ВСТУП

Для значної кількості систем перетворення енергії потрібна синхронізація алгоритму векторного керування з вектором напруги живлення. Типовими представниками такого підходу є системи керування активними силовими фільтрами [1], керованими вхідними випрямлячами перетворювачів частоти [2], асинхронними машинами подвійного живлення [3], та інші. Інформація про значення вектора напруги живлення використовується для здійснення перетворень координат, і тому результати вимірювань потребують додаткової цифрової обробки з метою фільтрації вищих гармонік, імпульсних завад та інших неідеальностей. Типове рішення, яке є промисловим стандартом, базується на використанні систем фазової синхронізації (PLL – Phase locked loops) [4], які є складними нелінійними фільтрами. Метою дослідження є розробка нового концептуального підходу до вимірювання вектору напруги живлення, що базується на використанні адаптивних спостерігачів.

#### 1. Синтез адаптивного спостерігача

Після перетворення трифазної системи напруг в нерухому ортогональну систему координат (a-b) отримаємо

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_m \cdot \cos(\varepsilon_1) \\ U_m \cdot \sin(\varepsilon_1) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $U_m$  та  $\varepsilon_1 = \omega_1 t$  визначають амплітуду та кутове положення вектора напруги, який обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega_1$ .

Нехай складові вектора напруги  $u_{1a}$ ,  $u_{1b}$  є вимірюваними, частота напруги  $\omega_1$  є невідомою. При виконанні цих припущень необхідно синтезувати адаптивний спостерігач, який гарантує асимптотичність оцінювання складових напруги і частоти так, що

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{u}_{1a}, \tilde{u}_{1b}, \tilde{\omega}_1) = 0, \quad (2)$$

де  $\tilde{u}_{1a} = u_{1a} - \hat{u}_{1a}$ ,  $\tilde{u}_{1b} = u_{1b} - \hat{u}_{1b}$ ,  $\tilde{\omega}_1 = \omega_1 - \hat{\omega}_1$  – похибки оцінювання;  $\hat{u}_{1a}$ ,  $\hat{u}_{1b}$ ,  $\hat{\omega}_1$  – оцінки координат  $u_{1a}$ ,  $u_{1b}$  та  $\omega_1$  відповідно.

Динамічна модель гармонійного сигналу (1) має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{u}_{1a} &= -\omega_1 u_{1b}, & u_{1a}(0) &= U_m, \\ \dot{u}_{1b} &= \omega_1 u_{1a}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для динамічної системи (3) сконструюємо адаптивний спостерігач:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{u}}_{1a} &= -\hat{\omega}_1 u_{1b} + k \cdot \tilde{u}_{1a}, \\ \dot{\hat{u}}_{1b} &= \hat{\omega}_1 u_{1a} + k \cdot \tilde{u}_{1b}, \\ \dot{\hat{\omega}}_1 &= -\gamma (\tilde{u}_{1a} u_{1b} - \tilde{u}_{1b} u_{1a}), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $(k, \gamma) > 0$  – параметри налаштування.

З (3) і (4) рівняння динаміки похибок оцінювання мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{u}}_{1a} &= -\tilde{\omega}_1 u_{1b} - k \cdot \tilde{u}_{1a}, \\ \dot{\tilde{u}}_{1b} &= \tilde{\omega}_1 u_{1a} - k \cdot \tilde{u}_{1b}, \\ \dot{\tilde{\omega}}_1 &= -\dot{\hat{\omega}}_1 = \gamma (\tilde{u}_{1a} u_{1b} - \tilde{u}_{1b} u_{1a}). \end{aligned} \quad (5)$$

Для доведення асимптотичності спостерігача (5) розглянемо наступну функцію Ляпунова:

$$V(t) = \frac{1}{2} (\tilde{u}_{1a}^2 + \tilde{u}_{1b}^2 + \gamma^{-1} \tilde{\omega}_1^2). \quad (6)$$

Похідна (6) вздовж траєкторії руху системи (5) має вигляд

$$\dot{V} = -k (\tilde{u}_{1a}^2 + \tilde{u}_{1b}^2). \quad (7)$$

Із виразів (6) і (7) встановлюємо, що  $(\tilde{u}_{1a}, \tilde{u}_{1b}, \tilde{\omega}_1)$  є обмеженими, оскільки  $V > 0$ ,  $\dot{V} \leq 0$ . З іншого боку, оскільки  $(u_{1a}, u_{1b}, \omega_1)$  обмежені, то і  $(\hat{u}_{1a}, \hat{u}_{1b}, \hat{\omega}_1)$  є обмеженими, а це означає, що  $(\dot{\tilde{u}}_{1a}, \dot{\tilde{u}}_{1b})$  обмежені. Отже,  $\int_0^t (\tilde{u}_{1a}^2(\tau) + \tilde{u}_{1b}^2(\tau)) d\tau = -\frac{1}{k} (V(t) - V(0)) \leq \frac{V(0)}{k}$ , а тому

сигнали  $\tilde{u}_{1a}(t), \tilde{u}_{1b}(t)$  є квадратично інтегрованими і обмеженими з обмеженою похідною. З цього пряме використання леми Барбалат дає умову

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{u}_{1a} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{u}_{1b} = 0. \quad (8)$$

Систему (5) запишемо у наступному стандартному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{u}}} &= \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{\Gamma}^T \tilde{\omega}_1, \\ \dot{\tilde{\omega}}_1 &= -\gamma \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \tilde{\mathbf{u}}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}_{1a}, \tilde{u}_{1b})^T$ ,  $\mathbf{\Gamma} = (-u_{1b}, u_{1a})$ ,  $\mathbf{A}$  – матриця, що задовольняє умовам Гурвіца.

Якщо умови персистентності збудження задовольняються, тобто матриця

$$\int_t^{t+t_1} \Gamma(\tau) \cdot \Gamma^T(\tau) d\tau \quad (10)$$

є позитивно визначеною для деякого  $t_1 > 0$ , а також усіх  $t \geq 0$ , то оскільки  $\dot{\Gamma}(t)$  обмежена, положення рівноваги  $(\tilde{u}_{1a}, \tilde{u}_{1b}, \tilde{\omega}_1) = 0$  є експоненційно стійким. Умова (10) має вигляд  $(u_{1a}^2 + u_{1b}^2) > 0$ , тобто модуль напруги має бути ненульовим

Для оцінювання значення модуля вектора напруги маємо  $|\hat{\mathbf{u}}|^2 = \hat{u}_{1a}^2 + \hat{u}_{1b}^2$ , а з урахуванням (8) встановлюємо, що  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\hat{\mathbf{u}}|^2 = U_m^2$ .

Введемо наступні позначення:

$$\cos(\hat{\varepsilon}_1) = \frac{\hat{u}_{1a}}{\sqrt{\hat{u}_{1a}^2 + \hat{u}_{1b}^2}}, \quad \sin(\hat{\varepsilon}_1) = \frac{\hat{u}_{1b}}{\sqrt{\hat{u}_{1a}^2 + \hat{u}_{1b}^2}}, \quad (11)$$

де  $\hat{\varepsilon}_1$  – оцінка  $\varepsilon_1$ .

Враховуючи (8) отримуємо, що

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \cos(\hat{\varepsilon}_1) = \cos(\varepsilon_1) = \frac{u_{1a}}{U_m}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \sin(\hat{\varepsilon}_1) = \sin(\varepsilon_1) = \frac{u_{1b}}{U_m}. \quad (12)$$

Звідки для похибки оцінювання кута  $\tilde{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 - \hat{\varepsilon}_1$  маємо  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\varepsilon}_1 = 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots, \infty$ .

Таким чином синтезований адаптивний спостерігач гарантує глобальне асимптотичне оцінювання компонент вектора напруги живлення  $u_{1a}, u_{1b}$ , а також його частоти обертання  $\omega_1$ . Оскільки динамічна система (4) може розглядатись також як адаптивний фільтр, то в оцінених значеннях  $\hat{u}_{1a}, \hat{u}_{1b}$  буде забезпечуватися фільтрація вищих гармонік.

## 2. Дослідження динамічних властивостей спостерігача

Для дослідження динамічних властивостей спостерігача моделювався сигнал (3), що відповідає стандартним параметрам мережі з амплітудою фазної напруги  $U_m = \sqrt{2} \cdot 220$  В, та частотою  $\omega_1 = 2\pi \cdot 50$  рад/с. Початкові значення спостерігача дорівнювали  $\hat{u}_{1a}(0) = U_m, \hat{u}_{1b}(0) = 0, \hat{\omega}_1(0) = 0.9 \cdot \omega_1$ , а коефіцієнти спостерігача  $\gamma = 1, k = 500$ . Після відпрацювання початкових умов в момент часу 0,1с амплітуда напруги стрибком зростала на 10%. Отримані перехідні процеси показані на рис. 1. Помилки оцінювання частоти та складових напруги спадають до нуля менше ніж за один період напруги.

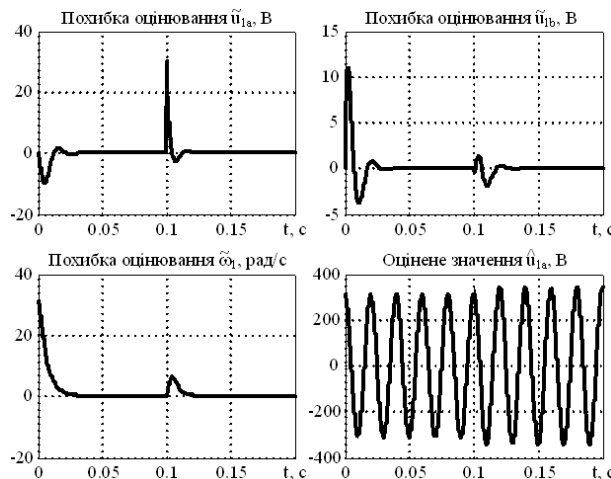


Рис. 1. Отримані перехідні процеси

## ВИСНОВКИ

Представлено результати синтезу адаптивного спостерігача частоти і миттєвих значень складових вектора напруги мережі живлення на основі вимірювання складових напруги. Синтезований спостерігач забезпечує експоненційне зменшення до нуля похибок спостереження та оцінювання з довільною швидкістю. Оцінені значення частоти та складових вектора напруги мережі живлення можуть бути використані в координатних перетвореннях векторних алгоритмів керування. Адаптивний спостерігач додатково забезпечує фільтрацію оцінених складових вектора напруги відносно вимірених значень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra. "A review of active filters for power quality improvement". IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.46, no 5, Oct. 1999, pp. 960-971.
2. Пересада С. М., Король С. В., «Новая концепция управления входным преобразователем: формирование полной энергии преобразования» //Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”. –2002. –Ч. 1. –С. 66 – 70.
3. S. Peresada, A. Tilli, A. Tonielli, "Robust Active-Reactive Control of a Doubly-Fed Induction Machine", Proc. of IEEE - IECON'98, Aachen, Germany, Sept. 1998, pp.1621-1625.
4. G-C.Hsieh, J.C. Hung. Phase-locked loop techniques-a survey" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.43, no.6, 1996, pp. 609-615.

Надійшла до редакції 09.12.2013р.

**ПЕРЕСАДА СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ** – д.т.н., проф., завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна.

**ДИННИК ТАРАС ВОЛОДИМИРОВИЧ** – аспірант, здобувач кафедри Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», інженер 1к бюро тех. засобів АСК ТП управління автоматизації і механізації ПРАТ «ДонецькСталь-МЗ», м. Київ, Україна.