

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ІНФРАНИЗЬКОЇ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЗА НАПРУГАМИ СИНХРОННОГО ТИХОХІДНОГО ТАХОГЕНЕРАТОРА

© Щур І.З., Козій В.Б., Костинюк Л.Д., 2006

Проведено дослідження чутливості розробленого алгоритму обробки фазних напруг синхронного тахогенератора інфранизької швидкості до можливих куткових, амплітудних та гармонічних фазових відхилень. Розроблені математичні та алгоритмічні рішення, здатні знизити рівень похибки визначення куткової швидкості.

This paper investigates the sensitivity of the elaborated algorithm for the treatment of the phase voltages of synchronous tachogenerator with infralow speed to possible angle, amplitude and harmonic deviations. The mathematical and algorithm solutions which can decrease the error of determining the angle speed were found.

Постановка задачі. Для прецизійного керування системами наведення окремих груп спеціальних об'єктів (оптичні і радіотелескопи, системи орієнтації штучних супутників Землі і космічних апаратів, комплекси озброєнь тощо) [1] доцільно використовувати тихохідні безредукторні електроприводи. З метою векторного керування моментом привідних безконтактних електродвигунів у цих електроприводах та побудови на нижньому рівні автономної САР куткової швидкості, розробляється комплексний давач кута положення, швидкості і напрямку обертання [2]. Він реалізується у вигляді трифазного багатополусного синхронного тахогенератора (ТГ) з високою крутизною вихідної характеристики і збудженням від постійних магнітів та цифрового алгоритму обробки фазних напруг ТГ. Алгоритм потрібно розробляти на принципово нових підходах порівняно з відомими способами для швидкохідних ТГ [3], оскільки цей ТГ призначений для роботи на інфранизьких частотах обертання (порядку одного оберту за добу).

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Оскільки комплексний давач призначений для роботи в системі прецизійного автоматичного регулювання, особливо важливими є питання його точності та завадостійкості. Їх вирішують як апаратними, так і алгоритмічно-програмними засобами. У конструкції апаратної частини комплексного давача (власне ТГ), яку розробляють спеціалісти СКБ електромеханічних систем, прийнято низку спеціальних технічних і технологічних рішень, спрямованих на максимальне наближення вихідних характеристик ТГ до ідеальних щодо симетрії, лінійності, синусоїдальності тощо. Алгоритмічно-програмна частина давача, яка на цьому етапі досліджень реалізується персональним комп'ютером, зважаючи на необхідність отримання комплексної інформації, побудована за принципом визначення амплітуди фазної напруги через попередньо знайдене значення кута положення ротора в електричних градусах [2]. Іншим, простішим, принципом визначення амплітуди є обчислення її як середнього квадратичного від біжучих значень фазних напруг [4]. Проте, як показали дослідження, у цьому разі через необхідність піднесення до квадрата напруг з неминучими шумами знижується завадостійкість системи.

Практична реалізація показала працездатність запропонованого алгоритму обробки вихідних напруг ТГ [2]. Наступним етапом роботи є оцінювання точності, отриманої від комплексного давача інформації. Особливо важливою є похибка у визначенні куткової швидкості, оскільки від неї залежить точність роботи САР швидкості електропривода в режимі ведення об'єкта спостереження.

До похибки визначення кута положення вимоги є менш суворими, оскільки вона впливає на величину моменту двигуна, а останній, як правило, регулюється своєю САР.

Метою роботи є дослідження чутливості запропонованого алгоритму обробки фазних напруг синхронного ТГ до можливих систематичних і випадкових їх відхилень від симетрії та синусоїдальності, розробка алгоритмічних рішень щодо зниження цієї чутливості та оцінювання точності визначення значення кутової швидкості.

Виклад основного матеріалу. Якщо абстрагуватися від проблеми завадостійкості у визначенні кутової швидкості, пов'язаної із шумами у вимірних фазних напругах ТГ, що буде предметом окремого дослідження, то важливою особливістю роботи тихохідного синхронного ТГ є збереження пропорцій між величинами основних збурюючих відхилень від ідеальності та амплітудою фазної напруги. Це дає змогу твердити про незалежність відносно похибки визначення кутової швидкості від величини останньої, тобто про збереження значення цієї похибки у всіх діапазонах роботи електропривода. Натомість величина похибки істотно залежить від алгоритмічних особливостей обробки фазних напруг ТГ.

Основними збурюючими точність визначення кутової швидкості факторами є відхилення від кутової, амплітудної симетрії трифазної системи напруг ТГ та складові вищих гармонік у цих напругах. Вказані фактори зумовлені конструктивними особливостями ТГ як електричної машини. У зв'язку з обов'язковою багатополісністю такої машини вплив окремих неточностей і відхилень параметрів, що існують в конструкції ТГ, знижується завдяки усередненню між взаємодією окремих пар полюсів ротора з окремими секціями обмоток статора. Оскільки взаємна орієнтація ротора щодо статора протягом фізичного кола весь час змінюється, то вплив цих неточностей і відхилень можна розглядати як випадковий. На відміну від цього, дію окремих факторів потрібно вважати систематичною, якщо є можливість отримати наперед інформацію про її величину і місце.

Розглянемо по чергово вплив кожного з названих вище факторів на точність визначення кутової швидкості ω .

Кутова несиметрія. Систематичну кутову несиметрію фазних напруг ТГ можна повністю скомпенсувати, доопрацювавши запропонований алгоритм їх обробки [2] так.

Виразимо напруги фаз U, V і W ТГ, між якими є довільні наперед відомі кутові зміщення α_u , α_v , α_w , як

$$U_u(t) = U_a \sin(\omega_e t + \alpha_u); \quad (1)$$

$$U_v(t) = U_a \sin(\omega_e t + \alpha_v); \quad (2)$$

$$U_w(t) = U_a \sin(\omega_e t + \alpha_w), \quad (3)$$

де U_a – амплітудне значення вихідних напруг ТГ; $\omega_e = \omega p$ – кругова частота; p – кількість пар полюсів ТГ.

Для кожної з пар вимірних значень фазних напруг (1)–(3) визначають кути

$$\varphi_{12}(t) = \arctg \left[\left(\frac{U_u(t) + U_v(t)}{U_u(t) - U_v(t)} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_u - \alpha_v}{2} \right) \right]; \quad (4)$$

$$\varphi_{23}(t) = \arctg \left[\left(\frac{U_v(t) + U_w(t)}{U_v(t) - U_w(t)} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_v - \alpha_w}{2} \right) \right]; \quad (5)$$

$$\varphi_{31}(t) = \arctg \left[\left(\frac{U_w(t) + U_u(t)}{U_w(t) - U_u(t)} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_w - \alpha_u}{2} \right) \right]. \quad (6)$$

За умови трифазної симетрії ($\alpha_u = 0$, $\alpha_v = \frac{4}{3}\pi$, $\alpha_w = \frac{2}{3}\pi$) кожен зі знайдених кутів (4)–(6) відповідатиме тій фазній напрузі, яку не використовували у його визначенні. У разі відхилення від трифазної симетрії, з метою узгодження кутів з відповідними напругами, необхідно скоректувати значення кутів (4)–(6) так:

$$\varphi_{12k}(t) = \varphi_{12}(t) + \alpha_w - \frac{\alpha_u + \alpha_v}{2}; \quad (7)$$

$$\varphi_{23k}(t) = \varphi_{23}(t) + \alpha_u - \frac{\alpha_v + \alpha_w}{2} + \pi; \quad (8)$$

$$\varphi_{31k}(t) = \varphi_{31}(t) + \alpha_v - \frac{\alpha_w + \alpha_u}{2} - \pi. \quad (9)$$

За отриманими від ТГ миттєвими значеннями фазних напруг та визначеними, враховуючи їх, кутами (7)–(9) можна знайти біжучі значення амплітуд цих напруг, які пропорційні модулю кутової швидкості:

$$\omega_1(t) = \frac{1}{k} \left| \frac{U_w(t)}{\sin(\varphi_{12k}(t))} \right|; \quad \omega_2(t) = \frac{1}{k} \left| \frac{U_u(t)}{\sin(\varphi_{23k}(t))} \right|; \quad \omega_3(t) = \frac{1}{k} \left| \frac{U_v(t)}{\sin(\varphi_{31k}(t))} \right|, \quad (10)$$

де k – крутизна вихідної характеристики ТГ.

У теоретичному випадку синусоїдальності фазних напруг ТГ та рівності їх амплітуд результати, отримані за будь-яким з виразів (10), збігаються, що видно з рис. 1. На цьому рисунку, а також на всіх наступних, з метою спрощення аналізу, прийнято $k = 1$ і $\omega_e = 1$. У такому разі кутова швидкість числово дорівнює амплітуді напруги ТГ. В реальних умовах за наявності систематичних та випадкових відхилень від ідеальності доцільно знаходити три значення модуля кутової швидкості за виразами (10) та використовувати їх для зменшення похибки.

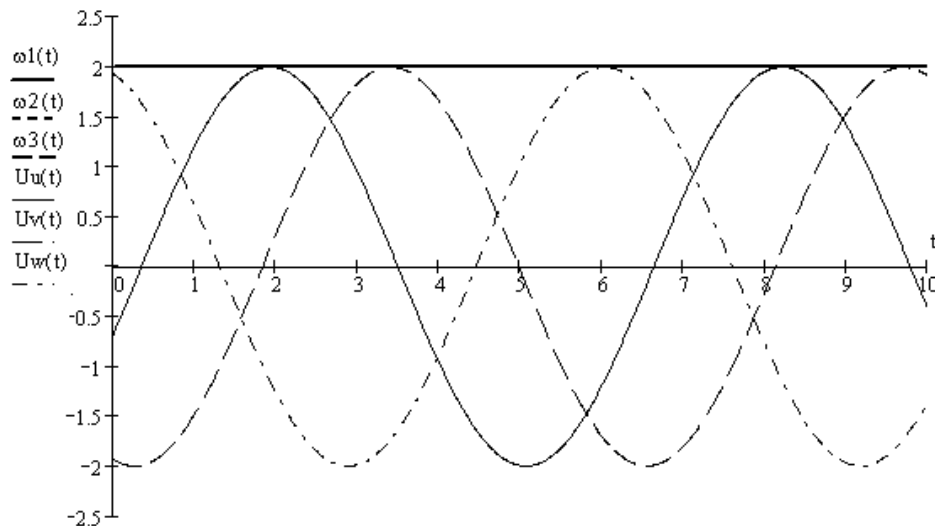


Рис. 1. Визначення модулів кутових швидкостей за виразами (10) при несиметричних кутових зміщеннях:

$$\alpha_u = -15 \text{ ел. град}, \quad \alpha_v = 255 \text{ ел. град}, \quad \alpha_w = 105 \text{ ел. град}$$

Для дослідження впливу випадкових наперед невідомих кутових зміщень фазних напруг ТГ $\Delta\alpha_u$, $\Delta\alpha_v$, $\Delta\alpha_w$, введемо їх у вирази (1)–(3):

$$U_u(t) = U_a \sin(\omega_e t + \alpha_u + \Delta\alpha_u); \quad (11)$$

$$U_v(t) = U_a \sin(\omega_e t + \alpha_v + \Delta\alpha_v); \quad (12)$$

$$U_w(t) = U_a \sin(\omega_e t + \alpha_w + \Delta\alpha_w). \quad (13)$$

На рис. 2 зображені результати розрахунку за виразами (4)–(10), враховуючи фазні напруги (11)–(13); для спрощення систематичні кутові зміщення прийняті симетричними. З отриманих графічних залежностей (для кожної фази прийнято однакове позначення ліній) можна побачити, що найбільші відхилення кутових швидкостей $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\omega_3(t)$ існують в околі переходу відповідних кривих фазних напруг через нульову позначку, що зумовлено зростанням відносної похибки у разі зменшення величини напруги. Оскільки ці відхилення локалізовані для кожної з фаз у межах іншого кута положення ротора, то найпростішим способом їх усунення є вилучення з розрахунку тієї кутової швидкості, для якої значення відповідного кута за виразами (10) близьке до нуля. Такий прийом називатимемо “вирізанням”. Значення кутової швидкості визначається як середнє арифметичне зі швидкостей (10) – такий прийом називатимемо “усередненням”. На інтервалах вирізання усереднення проводитиметься між двома величинами кутової швидкості, або й за одним значенням залежно від величини інтервалу вирізання. Проаналізуємо закономірності цього процесу.

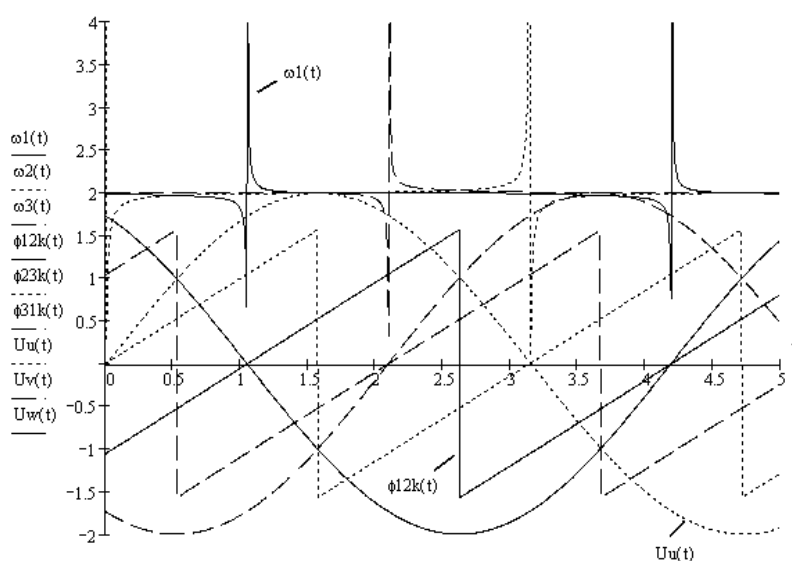


Рис. 2. Результати розрахунку за виразами (4)–(10) при випадковому кутовому зміщенні в одній із фаз величиною $\Delta\alpha_u = 0,5$ ел. град

Як видно з рис. 2, величина похибки визначення кутової швидкості залежить від величини кута вирізання. Для дослідження цієї залежності розроблена методика числових досліджень, реалізована в пакеті MathCad. На рис. 3. графічно продемонстровано як, задавшись кутом відхилення $\pm\psi$ від нульового значення коректованого кута $\varphi_{23k}(t)$, можна визначити значення абсолютних похибок Δ_1 і Δ_2 кутової швидкості $\omega_1(t)$. Збільшення кута вирізання $\pm\psi$ приводить, з одного боку, до зменшення абсолютної похибки кутової швидкості, проте, з іншого боку, якщо $|\psi| > \pi/6$, то на деяких інтервалах кута положення ротора визначення кутової швидкості відбуватиметься вже лише за одним значенням, що призведе до зменшення точності, особливо за наявності амплітудних відхилень, що буде показано далі. Існує також межа збільшення кута $|\psi|$, після якої появляються кутові інтервали без інформації про значення кутової швидкості. Для симетричних кутових змішень ця межа становить $\pi/3$, а для несиметричних знижується зі збільшенням кутової несиметрії. Для прикладу, ефективність прийомів вирізання і усереднення продемонстрована на рис. 4.

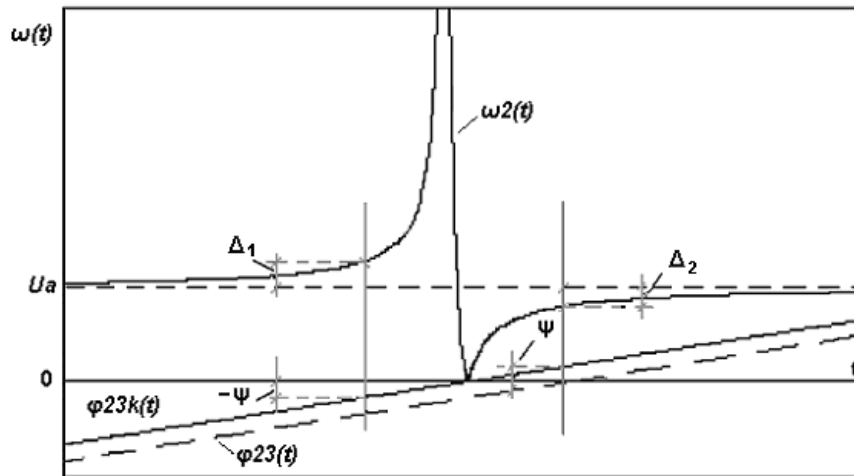


Рис. 3. Ілюстрація методики визначення залежності абсолютної похибки кутової швидкості від величини кута вирізання

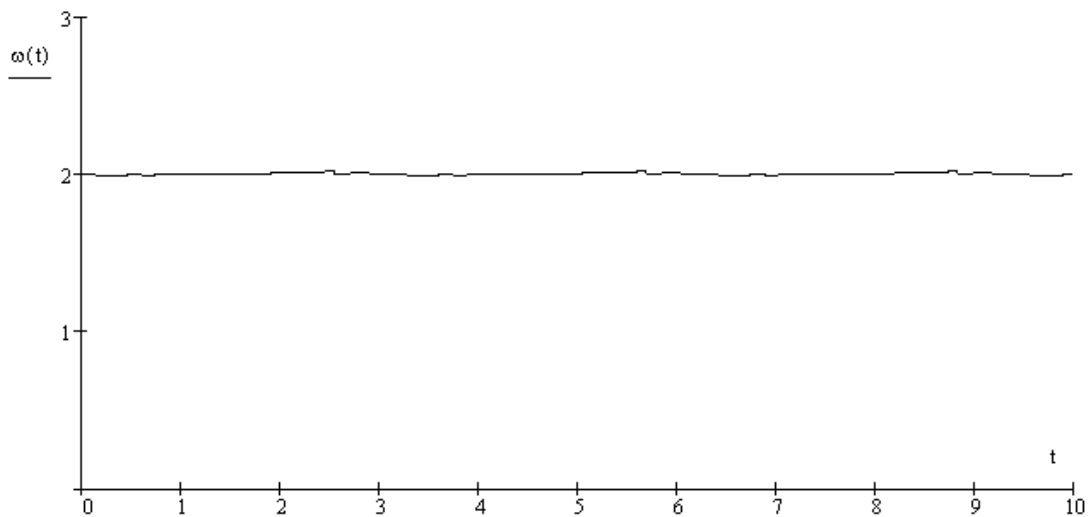


Рис. 4. Демонстрація ефективності прийомів вирізання і усереднення для досліджуваного показаного на рис. 2, при $\psi = \pm 0,6$

Проведено комплекс комп'ютерних досліджень залежності відносної похибки визначення кутової швидкості $\delta = (U_a - \Delta)/U_a$ від величини кута вирізання ψ . На рис. 5 показані залежності $\delta(\psi)$ для найгіршого варіанта (максимальної відносної похибки) за умови дії випадкових кутових зміщень, що не перевищують 1 ел. град., який існує, коли кутові зміщення набувають максимальних значень, різних за знаком у фазах. Залежності на рис. 5, як і аналогічні наступні, отримані з врахуванням вирізання для однієї фази, і тому на них не відображається вплив вирізання сусідніх фаз, що проявлятиметься на ділянках $\pi/6 < |\psi(t)| < \pi/3$ у вигляді деякого збільшення відносної похибки δ . Використовуючи лише прийом вирізання (рис. 5, а), при $\psi(t) = \pm \pi/6$ можна забезпечити максимальну відносну похибку визначення кутової швидкості на рівні 6–7%. Під час використання обох прийомів – вирізання і усереднення – за того самого значення кута вирізання ψ (рис. 5, б) можна зменшити відносну похибку до 5%. Якщо ж інші відхилення від симетрії будуть неістотними, то за допомогою прийому вирізання з максимальним значенням $\psi(t) = \pm \pi/3$ можна знизити похибку від дії випадкових кутових зміщень, які не перевищують 1 ел. град., до 2%.

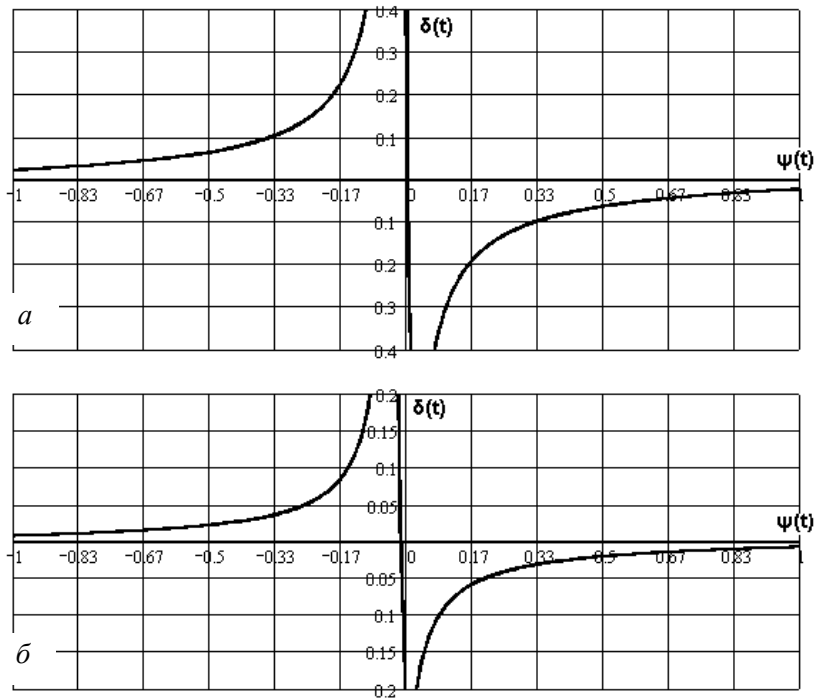


Рис. 5. Залежність максимальної відносної похибки визначення кутової швидкості від величини кута вирізання за дії випадкових кутових зміщень $\Delta\alpha_u = -1$ ел. градус, $\Delta\alpha_v = 1$ ел. градус, $\Delta\alpha_w = 1$ ел. градус: без усереднення (а) і з усередненням (б)

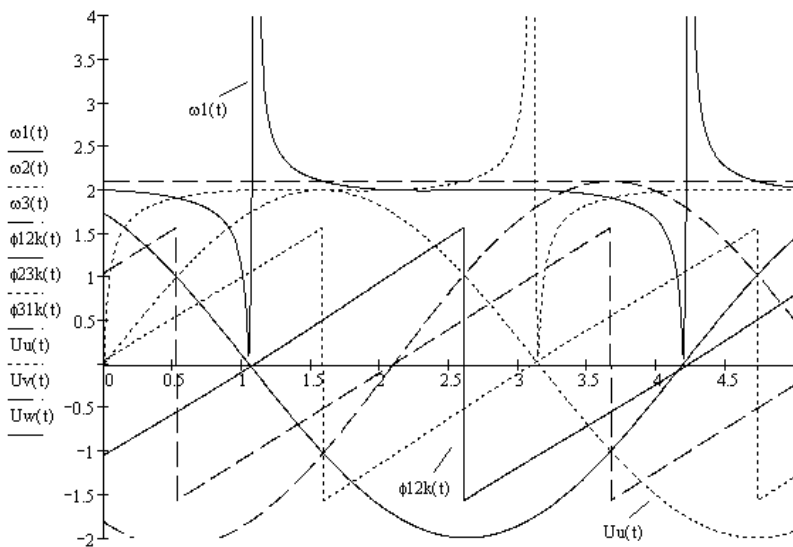


Рис. 6. Результати розрахунку за виразами (4)–(10) при збільшенні амплітуди фазної напруги $U_v(t)$ на 5% порівняно з двома іншими фазами

Амплітудна несиметрія. Амплітудна несиметрія пов'язана, переважно, з відхиленнями параметрів постійних магнітів полюсів ротора ТГ. Для вивчення впливу випадкових амплітудних відхилень використана описана вище методика комп'ютерних досліджень. Відхилення моделювалися різними значеннями U_a у виразах (1)–(3), кутові випадкові зміщення на цьому етапі не задавалися. На рис. 6 зображені результати розрахунку за виразами (4)–(10); для спрощення систематичні кутові зміщення прийняті симетричними. З отриманих графічних залежностей можна побачити, що, як і за випадкових кутових зміщень, відхилення кутових швидкостей $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\omega_3(t)$

існують теж в околі переходу відповідних кривих фазних напруг через нуль. Тому прийом вирізання одночасно сприятиме зменшенню відносної похибки як пов'язаної з випадковими кутівими, так і з випадковими амплітудними відхиленнями від симетрії. Але, крім значних відхилень кутової швидкості на інтервалі вирізання, похибка від амплітудних відхилень зберігає своє значення (на рис. 6 – не менше 5 %) для інших кутів

положення. Зменшенню цієї похибки сприяє прийом усереднення значень кутівих швидкостей, визначених за напругами різних фаз ТГ. Тому значення модуля кута вирізання, з точки зору зниження впливу випадкових амплітудних відхилень, не доцільно збільшувати понад $\pi/6$. Це видно з рис. 7, на якому показана залежність $\delta(\psi)$ для найгіршої комбінації випадкових амплітудних

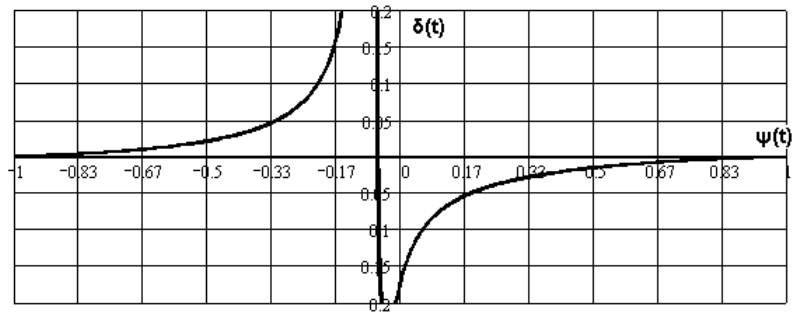


Рис. 7. Залежність максимальної відносної похибки визначення кутової швидкості від величини кута вирізання за дії випадкових амплітудних відхилень на рівні 5 % від теоретичних за найгіршої їх комбінації

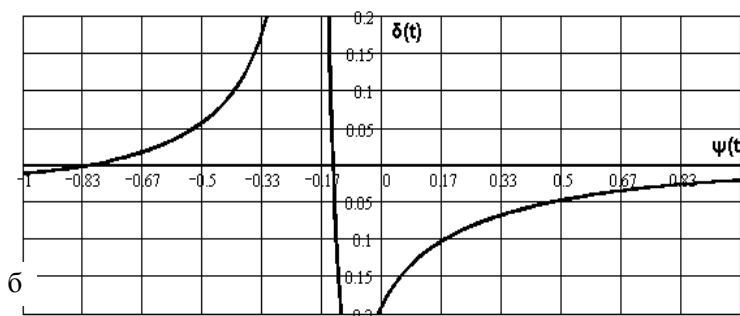
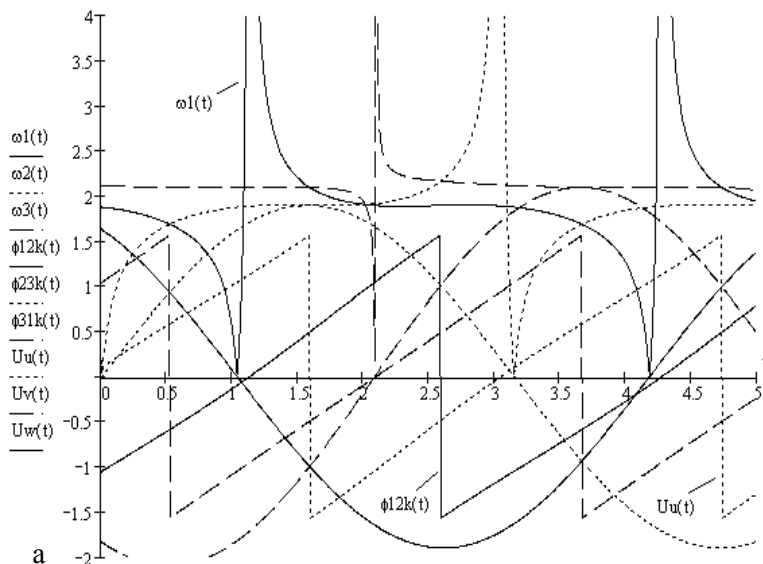


Рис. 8. Результати розрахунку за виразами (4)–(10) (а) та залежність максимальної відносної похибки визначення кутової швидкості від величини кута вирізання (б) за дії амплітудних відхилень на рівні 5 % від теоретичних та випадкових кутівих зміщень величиною 0,5 ел. град за найгіршої їх комбінації

відхилень на рівні 5 % від теоретичних значень: у двох фазах напруга підвищується, а в одній – знижується. Аналіз рис. 7 показує, що за допомогою поєднання прийомів вирізання і усереднення можна забезпечити максимальну величину відносної похибки визначення кутової швидкості у два рази нижчою від величини випадкових амплітудних відхилень (2,5 % на рис. 7).

Кутова і амплітудна несиметрії. Знайдено також найгірше поєднання кутівих і амплітудних випадкових відхилень: у першій фазі амплітуда і кутове зміщення знижуються, в другій – підвищуються, а в третій – амплітуда знижується, а кутове зміщення підвищується. На рис. 8, а показані результати розрахунку за виразами (4)–(10), а на рис. 8, б залежність $\delta(\psi)$ для такого випадку, коли амплітудні відхилення становлять 5 % від теоретичних значень, а випадкові кутіві зміщення – 0,5 ел. град за найгіршої їх комбінації. Як видно з рис. 8, б, максимальна відносна похибка визначення кутової швидкості при $\psi(t) = \pm \pi/6$ в такому випадку не перевищує 6 %.

Гармонічні відхилення. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що за допомогою спеціальних конструктивних рішень, спрямованих на забезпечення синусоїдальності вихідних напруг цього тихохідного синхронного ТГ, можна добитися за постійної кутової швидкості наявності у кривій потокозчеплення статорних обмоток 3-ї гармоніки на рівні 1 % та 5-ї гармоніки на рівні 0,5 % від рівня першої гармоніки. Ці результати й були використані для дослідження на гармонічні відхилення розробленого алгоритму визначення кутової швидкості шляхом заміни виразів для фазних напруг ТГ (11)–(13) такими:

$$U_u(t) = U_a [\sin(\omega_e t + \alpha_u + \Delta\alpha_u) + 0,01 \sin(3\omega_e t) + 0,005 \sin(5\omega_e t)]; \quad (14)$$

$$U_v(t) = U_a [\sin(\omega_e t + \alpha_v + \Delta\alpha_v) + 0,01 \sin(3\omega_e t) + 0,005 \sin(5\omega_e t)]; \quad (15)$$

$$U_w(t) = U_a [\sin(\omega_e t + \alpha_w + \Delta\alpha_w) + 0,01 \sin(3\omega_e t) + 0,005 \sin(5\omega_e t)]. \quad (16)$$

Результати розрахунків за виразами (4)–(10) для симетричних систематичних кутових зміщень зображені на рис. 9, а (випадкові кутові зміщення і амплітудні відхилення відсутні). Аналіз показує, що прийом вирізання теж сприяє зниженню похибки від гармонічних відхилень, які в околі кутів вирізання мають максимальні значення. Внаслідок вирізання і усереднення максимальна відносна похибка визначення кутової швидкості, зумовлена гармонічними відхиленнями вказаної величини (рис. 9, б), є меншою від похибки, зумовленої випадковими кутовими і амплітудними відхиленнями і при $\psi(t) = \pm \pi/6$ не перевищує 2 %.

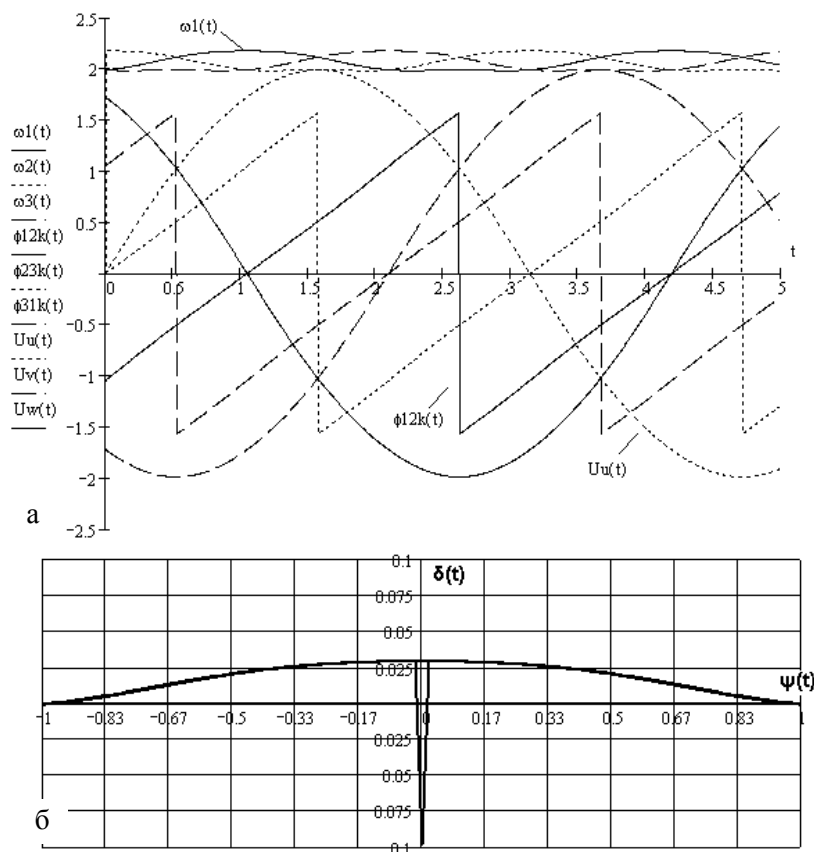


Рис. 9. Результати розрахунку за виразами (4)–(10) а) та залежність максимальної відносної похибки визначення кутової швидкості від величини кута вирізання б) за наявності гармонічних складових у фазних напругах (14)–(16)

Висновки. 1. Удосконалено розроблений алгоритм визначення кутової швидкості тиххідного синхронного ТГ за його вихідними напругами через обчислені за цими напругами фазні кути в напрямку повної компенсації систематичних кутових зміщень, відмінних від трифазної симетрії.

2. Розроблена методика комп'ютерного дослідження відносної похибки визначення кутової швидкості, що зумовлена дією фазних напруг з відхиленнями від симетрії та синусоїдальності, дає змогу оперативно проводити аналіз різних алгоритмічних рішень.

3. Внаслідок дослідження чутливості запропонованого алгоритму оброблення фазних напруг ТГ до можливих випадкових кутових, амплітудних та гармонічних відхилень запропоновано прийоми вирізання та усереднення, які дозволяють істотно знизити рівень відносної похибки визначеної кутової швидкості.

4. Відносна похибка, зумовлена комплексною дією випадкових кутових зміщень і амплітудних відхилень, все ж залишається значною і для її зниження необхідно шукати нових прийомів.

1. *Следящие приводы: В 3 т. / Под ред. Б.К. Чемоданова. Т. 2: Электрические следящие приводы / Е.С. Блейз, В.Н. Бродовский, В.А. Введенский и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 880 с. 2. Щур І.З., Малярчук С.О., Козій В.Б. Алгоритм роботи комплексного давача кута положення, швидкості і напрямку обертання для тиххідного електроприводу // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2005. – № 544. – С. 168–173. 3. Тун А.Я. Системы контроля скорости электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с. 3. Столов Л.И, Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.*

УДК 621.3.049.77.002.72:52.072.13:621.317.33

Л.Д. Юрченко, Д.Т. Дячок, В.А. Павлиш*

Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут,

*Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра ЕЗІКТ

МОДЕЛЬ ПЕРЕХІДНОЇ ДІЛЯНКИ МІЖ ВНУТРІШНІМ І ЗОВНІШНІМ ВИВОДОМ ІС ТА ЇЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© Юрченко Л.Д., Дячок Д.Т., Павлиш В.А., 2006

Розглянуто модель перехідної ланки між контактною площинкою підкладки і зовнішнім виводом інтегральної схеми. Наведено формули, що описують її параметри – опір, час затримки, стала часу дільниці, тривалість перехідного процесу і її втрати. Розраховано залежність втрат від частоти. Показано, що втрати на частотах до 3 ГГц задовольняють працездатність дільниці. Визначено, що час затримки на дільниці слабо залежить від активної складової її опору. На нижчих частотах ця залежність зростає, але сам час затримки при цьому зменшується

The article considers the model of the transition area between the substrate pad and the IC external terminal. There are presented the formulae describing its parameters: resistance, delay time, area time constant, transient process duration and its loss. The dependence of the loss on the frequency is calculated. It is shown that the loss at frequencies up to 3 GHz satisfy the area operability. It is found that delay time in the area depends negligibly on its resistance active component. At lower frequencies this dependence increases while the delay time decreases

Вступ. Характерною ознакою сучасних надвеликих цифрових ІС є значна кількість їхніх внутрішніх і зовнішніх мікроконтактних з'єднань, до декількох тисяч. Отже, зростає їхній вплив на