

Дослідження умов порушення стійкості системи „тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун” при керуванні пуском електропривода

Постановка проблеми та її зв’язок з прикладними задачами. Ефективність застосування асинхронного двигуна (АД) шляхом поступового підвищення напруги живлення від фіксованого низького рівня до номінального (як спосіб зменшення коливальної складової електромагнітного моменту двигуна) обумовлює широке використання в промисловості засобів повільного пуску “Soft start”. Їх основою є силові тиристорні регулятори напруги (ТРН) [1]. Зміна величини напруги на виході ТРН в таких пристроях, як правило, відбувається у відповідності до лінійного закону зміни кута α відкриття тиристорів регулятора в межах заданого часового інтервалу. В той же час, характерною особливістю щодо експлуатації АД є наявність на клеммах його статора трифазної ЕРС обертання, індукованої полем струмів ротора. Дія цієї ЕРС відносно ТРН може привести до відхилення фактичних параметрів вихідної напруги регулятора від заданих і спричинити відповідні зміни параметрів процесу пуску АД. Таким чином, дослідження процесів в системі “тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун” за умови фазового регулювання напруги живлення АД під час його керованого пуску є актуальним.

Стан питання. Питання стійкості системи “ТРН-АД” під час фазового регулювання напруги живлення АД розглянуті в дослідженні [2]. Зокрема, встановлені умови, необхідні для виникнення і підтримання автоколивань в ланцюзі статора АД (I_{1m}), ЕРС обертання

$E_{обт}$ АД, а також кутів відкривання α та провідності β тиристорів ТРН (рис. 1, де $\frac{E_{обт}}{U_{т ном}}$ - відношення амплітуд ЕРС обертання та номінальної напруги відповідної фази; $\frac{I_{1m}}{I_{1тн}}$ - відношення амплітуд фактичного та номінального струму статора АД).

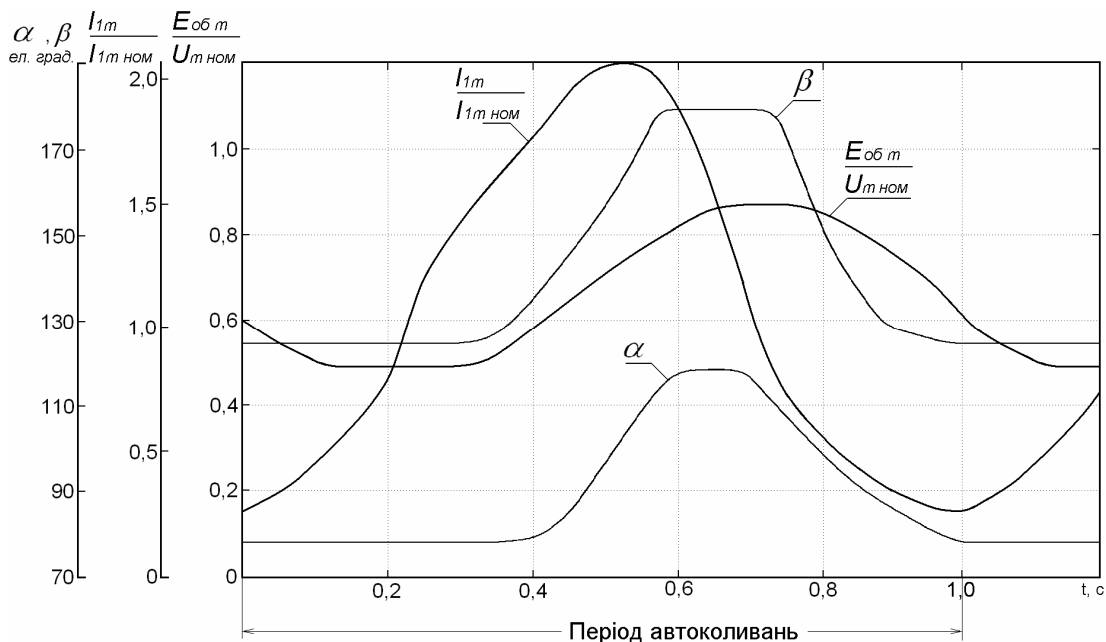


Рис. 1

Визначена причина штучного відхилення кутів α та β від заданих величин, якою є підвищення ЕРС обертання АД за умови підвищеного рівня струму живлення АД при $\alpha \gg 0$ та високої (близької до номінальної) кутової швидкості ротора. З'ясовано, що штучне збільшення кута β провідності тиристорів ТРН до 180 ел. град. обумовлює підвищення напруги живлення АД до номінальної величини, зменшення споживаного струму та ЕРС обертання АД, чим створює умови для повертання кутів комутації (α ; β) тиристорів ТРН до початкових параметрів і подальшого нового підвищення струму та ЕРС обертання двигуна.

Невирішені частини загальної проблеми. Наведені результати базуються на експериментальних даних дослідження сталого процесу автоколивань параметрів “тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун” при незмінній величині заданого кута α . Однак, актуальною є задача теоретичного дослідження зазначених вище автоколивальних процесів на основі моделювання з метою визначення особливостей їх протікання під час зміни в певному часовому інтервалі заданих кутів α відкриття тиристорів ТРН. Одним із актуальних результатів цього дослідження має бути визначення особливостей протікання автоколивальних процесів в системі “ТРН-АД” за умови наявності динаміки зміни величини заданого кута α відкриття силових тиристорів ТРН. Практичне значення цього дослідження має бути в обґрунтуванні часової діаграми зміни фазового кута α під час пуску АД з метою мінімізації амплітудно-часових параметрів автоколивального процесу в системі “ТРН-АД”.

Постановка задачі. Задачею досліджень є обґрунтування вимог до діаграми зміни в часі величини кута відкриття тиристорів регулятора напруги під час керування пуском АД за умови мінімізації амплітудно-часових параметрів автоколивального процесу з урахуванням результатів моделювання в системі “тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун”.

Результати досліджень. Теоретичний аналіз процесів в системі “тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун” в динаміці зміни кута α відкриття тиристорів в процесі керування пуском асинхронного двигуна передбачає обґрунтування і дослідження відповідних математичної та комп'ютерної моделей.

Як правило, розрахункова схема для систем фазового управління в статорі асинхронного двигуна містить трифазне джерело живлення u_A ; u_B ; u_C , тиристорний регулятор напруги VS1-VS6, підключений виходом до статора асинхронного двигуна М (рис. 2, а) [3].

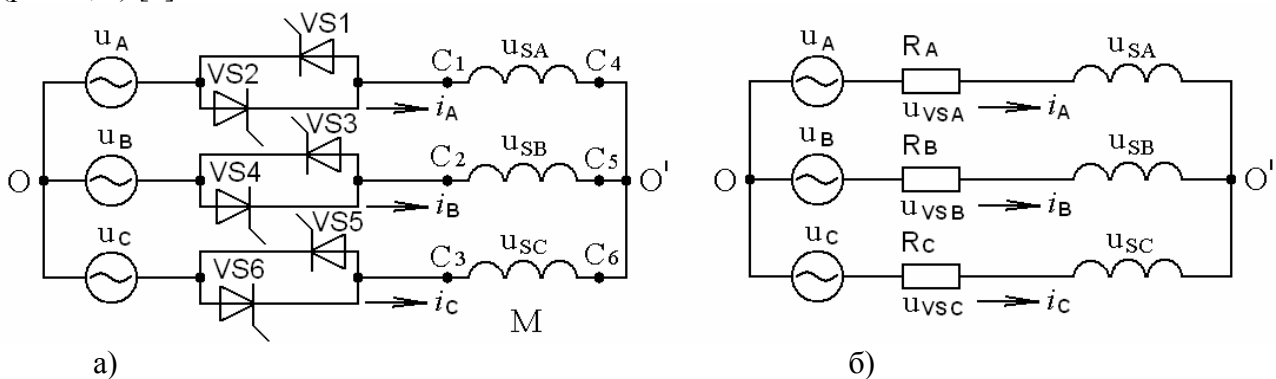


Рис. 2

Оскільки з двох тиристорів, що включені у кожен фазу зустрічно-паралельно, у стані провідності в кожен момент часу може знаходитися лише один, кожен з таких пар тиристорів (VS1 - VS2; VS3 - VS4; VS5 - VS6) можна під час розрахунків уявити активними опорами R_A , R_B , R_C відповідно. Величина кожного такого опору змінюється

стрибкоподібно від R_{\max} до R_{\min} при відкриванні одного з тиристорів пари (рис. 2, б), наприклад:

$$R_A = \begin{cases} R_{\min}, & \text{якщо } VS1 = 1 \text{ або } VS2 = 1; \\ R_{\max}, & \text{якщо } VS1 = 0 \text{ та } VS2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де $VS1=1$ позначає відкритий стан тиристора $VS1$, а $VS1=0$, відповідно, - невідкритий.

Падіння напруги u_{VSA} ; u_{VSB} та u_{VSC} на кожному такому опорі дорівнює:

$$u_{VSA} = i_A R_A; \quad u_{VSB} = i_B R_B; \quad u_{VSC} = i_C R_C, \quad (2)$$

де i_A , i_B , i_C - струми у фазах А, В та С відповідно.

Якщо позначити напругу між нульовими точками джерела живлення (О) та обмотки статора двигуна (О') через $u_{OO'}$, то для кожної з фаз можна скласти рівняння згідно II закону Кірхгофа [3]:

$$\begin{cases} u_{VSA} = u_A - u_{OO'} - u_{SA}; \\ u_{VSB} = u_B - u_{OO'} - u_{SB}; \\ u_{VSC} = u_C - u_{OO'} - u_{SC}. \end{cases} \quad (3)$$

де u_{SA} ; u_{VB} ; u_{SC} - падіння напруги на обмотках статора АД.

Користуючись I законом Кірхгофа, враховуючи симетрію обмоток статора та систему (3), напругу $u_{OO'}$ можна визначити наступним чином:

$$u_{OO'} = \frac{(u_A - u_{VSA}) + (u_B - u_{VSB}) + (u_C - u_{VSC})}{3}. \quad (4)$$

З урахуванням параметрів активних опорів статора і ротора (R_s, R_r), індуктивностей статора, ротора і головного магнітного поля, відповідно, $L_s; L_r; L_m$, розрахункова схема системи "ТРН-АД" має бути представлена відповідно до рис. 3. В цій системі суттєвим є вплив на процеси з боку фазних електрорушійних сил кутової швидкості ротора (ЕРСШ), індукованої в обмотці статора [2]:

$$-e_{обr} = \frac{1}{\sqrt{3}} p \omega (L_m (2i_{sA} + i_{sB}) + L_r (2i_{rB} + i_{rA})), \quad (5)$$

де p - кількість пар полюсів АД; i_s та i_r - струми статора та ротора; ЕРС $e_{обr}$ має знак (-) по відношенню до ЕРС обертання, індукованої в обмотці статора.

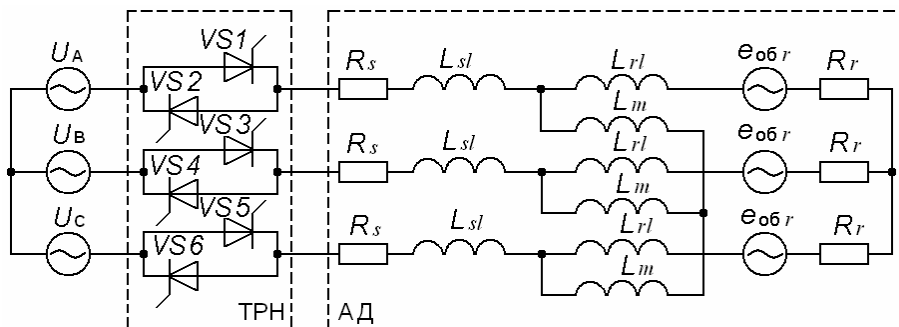


Рис. 3

Для опису асинхронного двигуна використовується математична модель складена згідно методу просторового вектора у системі координат статора [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\psi}_s = \int (\bar{u}_s - \bar{i}_s R_s) dt + \bar{\psi}_s(0); \\ \bar{\psi}_r = \int (j\omega \bar{\psi}_r - \bar{i}_r R_r) dt + \bar{\psi}_r(0); \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M - M_C) dt + \omega(0); \\ M = -\frac{3}{2} I_M [\hat{\psi} \cdot \bar{i}_r]; \\ \bar{i}_s = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (L_r \bar{\psi}_s - L_m \bar{\psi}_r); \\ \bar{i}_r = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (L_s \bar{\psi}_r - L_m \bar{\psi}_s). \end{array} \right. \quad (6)$$

Початковими є величини:

$\bar{\psi}_s(0+) = \bar{\psi}_r(0+) = \omega(0+) = 0$, що відповідає процесу пуску АД,

де $\bar{\psi}_r$, $\bar{\psi}_s$, \bar{i}_r , \bar{i}_s - просторові вектори, $\hat{\psi}_r$ - спряжений вектор к $\bar{\psi}_r$.

Залежність моменту машини від кутової швидкості визначається з відношення:

$$M_C(\omega) = M_0 + (M_H - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^k, \quad (7)$$

де M_0 - момент опору руху при нульовій швидкості; M_H - момент опору при номінальній швидкості; k - коефіцієнт, що характеризує зміну моменту при збільшенні швидкості ($0 < k \leq 2$). [5]

Просторовий вектор напруги статора \bar{u}_s формується з фазних напруг u_{sA} , u_{sB} , u_{sC} :

$$\bar{u}_s = \frac{2}{3} [u_{sA} + e^{j120^\circ} \cdot u_{sB} + e^{j240^\circ} \cdot u_{sC}], \quad (8)$$

а струми у фазах мережі i_A , i_B , i_C обраховуються за просторовим вектором струму статора \bar{i}_s наступним чином:

$$i_A = \text{Re}[\bar{i}_s]; \quad i_B = \text{Re}[e^{j120^\circ} \cdot \bar{i}_s]; \quad i_C = \text{Re}[e^{j240^\circ} \cdot \bar{i}_s]. \quad (9)$$

Моделювання незалежної роботи тиристорів різних фаз при фазовому регулюванні та трифазній комутації вентилів базується на використанні логічної функції [6]:

$$V_i = X_i \cdot Z_i + Y_i, \quad (10)$$

де V_i - логічна змінна, що дорівнює "1" при відкритому стані i -го тиристора та "0" в разі його несправності; X_i відповідає напрузі на тиристорі, Y_i - струму через тиристор, Z_i - сигналу керування.

Наведені залежності являють собою математичну модель системи "ТРН - АД" при фазовому регулюванні напруги на виході ТРН. Структурна схема, що реалізує таку модель, наведена на рис. 4

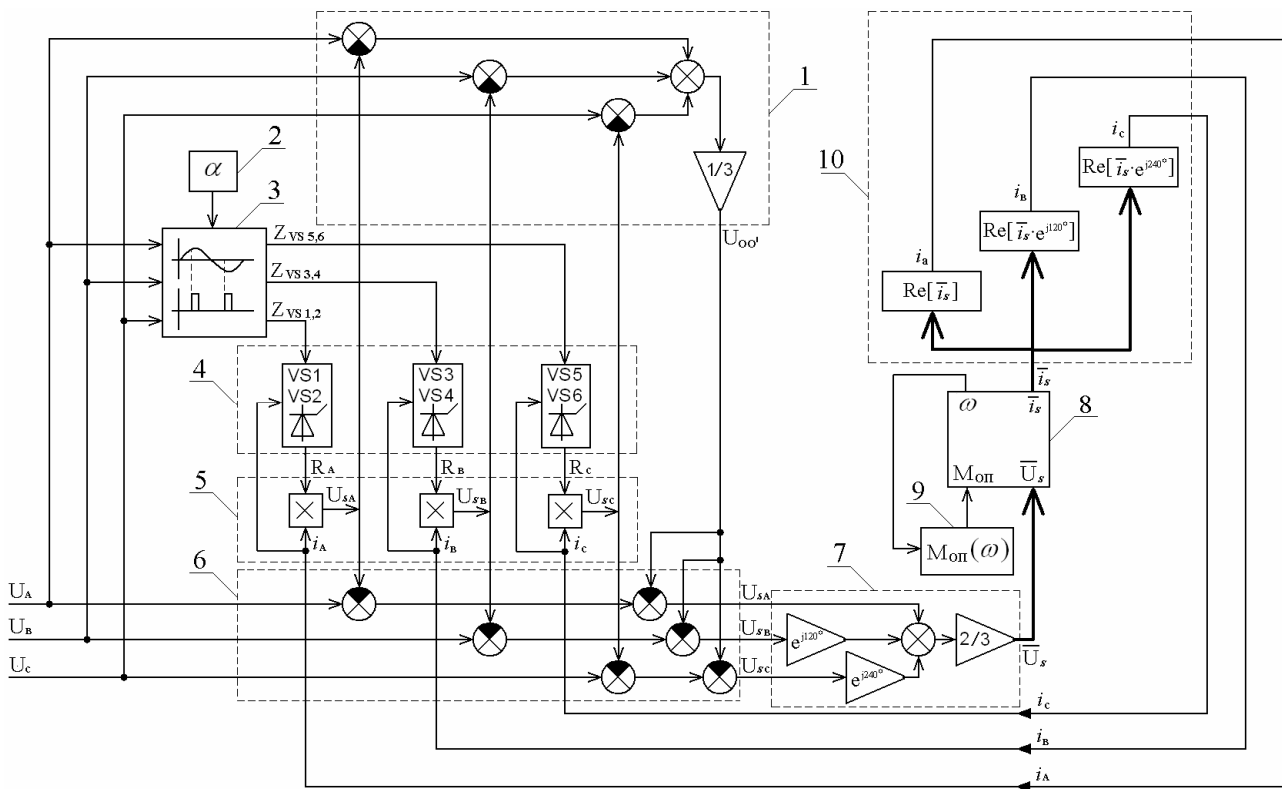


Рис. 4

Групи блоків позначені наступними позиціями:

- 1 – блоки для визначення напруги зміщення нейтралі $u_{OO'}$ згідно з (4);
- 2 – модель засобу завдання кута α відкриття тиристорів;
- 3 - модель СІФУ, що видає сигнали керування $Z_{VS1,2}$ на тиристири у фазі А (VS1 та VS2), $Z_{VS3,4}$ - у фазі В, $Z_{VS5,6}$ - у фазі С при умові синхронізації за напругою мережі;
- 4 – моделі пар тиристорів, ввімкнених у кожен фазу, що реалізують залежності (1) та (10);
- 5 – обрахунки згідно (2) падіння напруги на опорах, що моделюють пари тиристорів у кожній фазі;
- 6 – визначення фазних напруг на обмотках статора двигуна згідно (3);
- 7 – залежність (8) для обчислення просторового вектора \bar{u}_s ;
- 8 – модель АД згідно (6);
- 9 - модель визначення моменту АД в залежності від кутової швидкості ротора згідно (7);
- 10 – вирази (9) для обчислення миттєвих значень струмів i_A, i_B, i_C у фазах мережі.

В процесі досліджень запропонованої моделі прийнято наступні припущення: в якості асинхронного двигуна системи “ТРН-АД” прийнята машина типу ЭДКОФВ315LB4 потужністю 250 кВт з відповідними параметрами активних опорів, індуктивностей та моменту інерції (J_M); лінійна номінальна напруга джерела живлення 1140 В, частота напруги 50 Гц; номінальний електромагнітний момент двигуна $M_H = 1613 \text{ Н*м}$; номінальна кутова швидкість ротора $\omega_{ном} = 1480,5 \text{ об/хвил}$; момент опору ($M_{оп}$) задається при моделюванні в діапазоні $0,1M_H < M_{оп} < M_H$. Під час керованого пуску АД фазовий кут α відкриття тиристорів ТРН зменшується від 140 ел. град. до 0 ел. град. за лінійним законом на протязі заданого часового інтервалу ΔT .

Комп’ютерним моделюванням підтверджена наявність автоколивальних процесів в системі “ТРН-АД” при досягненні двигуном кутової швидкості, близької до номінальної, за умови, якщо заданий кут α відкриття тиристорів ТРН є набагато більшим, ніж 0 ел. град. ($85 \text{ ел. град.} < \alpha < 45 \text{ ел. град.}$). Ці автоколивання є джерелом впливу на електромеханічні

параметри АД, зокрема, спроможні привести до коливань кутової швидкості ротора (в часовому інтервалі ΔT зміни кута α , що задається) при незначних сукупних моментах інерції J_{Σ} електропривода ($J_{\Sigma} = 1,1 J_M$, рис. 5,а). Цей момент інерції є фактором найбільш суттєвого впливу на параметри перехідного процесу розгону електропривода (5) і здатен у залежності від своєї величини не допустити виникнення вищевказаних коливань швидкості ротора або суттєво зменшити їхню амплітуду ($J_{\Sigma} = 1,6 J_M$, рис. 5,б). Однак, сама наявність автоколивальних процесів в системі „ТРН-АД” (тобто, вихід цієї системи з під керуваності з боку пристрою завдання кута α) потребує відповідних коректуючих технічних рішень.

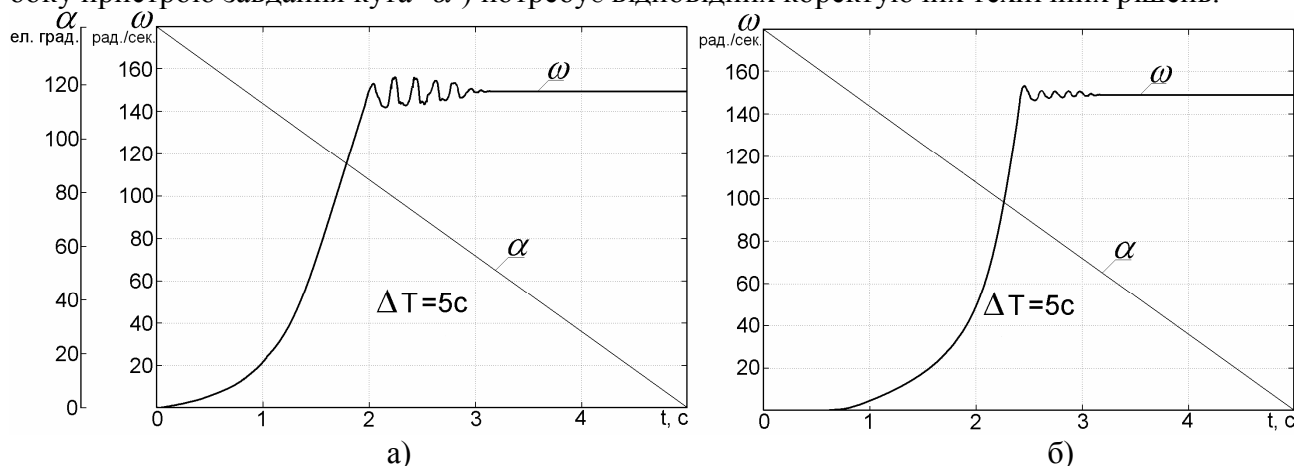


Рис. 5

Зазначені вище автоколивальні процеси виявлені і в результаті експериментальних досліджень. В ході експерименту до виходу ТРН (в системі „ТРН-АД”) підключалося трифазне навантаження – активні опори, з’єднані за схемою „зірка”. В системі „ТРН-АД” був задіяний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором ВАО-51-4-У2 потужністю 7,5 кВт. Лінійна напруга мережі – 380 В. Фазна напруга, що знімалася з опору однієї з фаз через дільник напруги, АЦП, передавалася на персональний комп’ютер, що дозволяло фіксувати і аналізувати параметри процесу. На рис. 6 наведені осцилограми фазної напруги на інтервалі періода автоколивань (заданий кут α був незмінним і становив 60 ел. град). Встановлено що діапазон заданих кутів α відкриття тиристорів ТРН, при якому відбуваються автоколивальні процеси, становить від 85 ел. град до 45 ел. град.

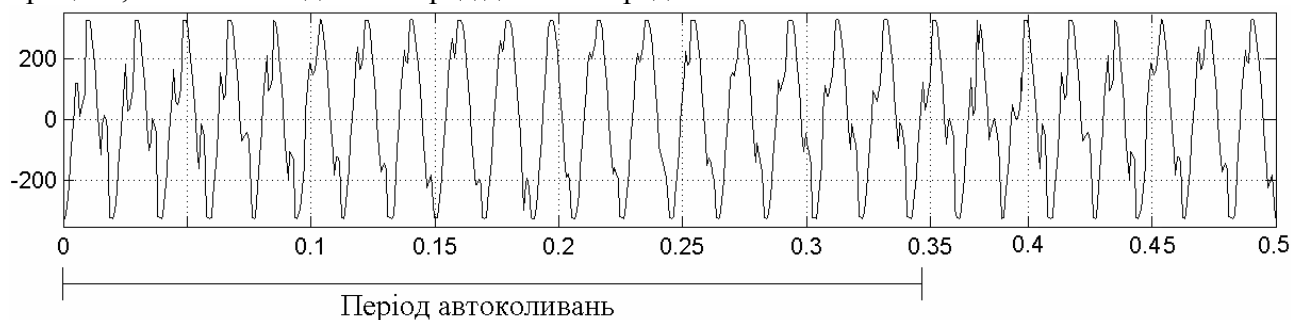


Рис. 6

Отже прийнятним способом уникнення цих автоколивань слід вважати двоетапний закон завдання інтенсивності Q зміни кута α . Зокрема, за умови $\omega \approx \omega_{ном}$; $\alpha_{зад} \approx 90$ ел. град. доцільним є підвищення параметру Q до 50 ел. град./с (рис. 7).

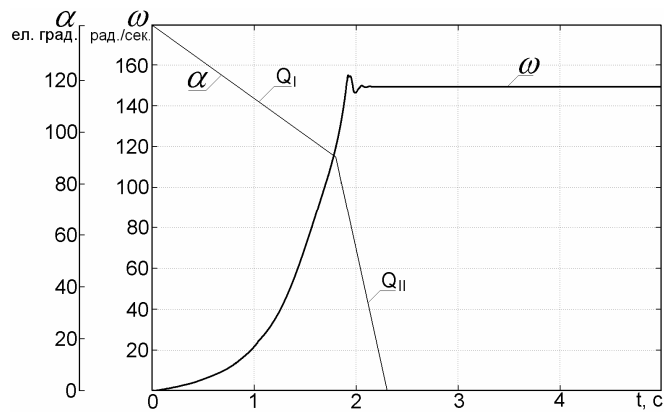


Рис. 7

Висновки та напрямки подальших досліджень. Обґрунтована математична модель дозволяє виявити автоколивальні процеси в системі “тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун” під час керування розгоном двигуна способом зміни заданого кута α відкриття тиристорів ТРН від максимальної (α_{\max}) до нульової величини. Встановлено, що усунення автоколивальних процесів може бути досягнуто в разі застосування двоетапного закону зміни кута α під час розгону АД, а саме, в разі досягнення кутовою швидкістю АД величини, близької до номінальної при $\alpha = 90$ ел. град. інтенсивність зміни кута α має бути підвищена не менш, ніж до 50 ел. град./с. В ході подальших досліджень є доцільним встановити характер впливу ТРН при запровадженні запропонованого закону керування інтенсивністю зміни кута α відкриття тиристорів на параметри чутливості апаратури захисту від витоків струму на землю в мережі з ізольованою нейтраллю, що є актуальним при експлуатації шахтних дільничних електротехнічних комплексів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Петров Л.П. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода./ Л. П. Петров / – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
2. Маренич К.Н. Процессы в системе “тиристорный коммутатор – асинхронный двигатель” при фазовом и квазичастотном регулировании напряжения/ К.Н. Маренич //Преобразование параметров электрической энергии в энергетических и технологических установках. Сб. научн. тр. Ин-т электродинамики АН УССР, Киев 1991, - С. 57-63.
3. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением./ И.Я. Браславский/ – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
4. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока./ К.П. Ковач, И. Рац // М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
5. Мартынов М.В. Автоматизированный электропривод в горной промышленности./ М.В. Мартынов, Н.Г. Переслегин / М.: Недра, 1977. – 376 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин./ И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.