

УДК 621.314

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ФОРМУВАЧІВ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ ЖИВЛЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Г.К. Кальянов, к.т.н., с.н.с., ХНАДУ

Анотація. Розглянуто апаратна реалізація формувачів синусоїдального фазного струму навантаження асинхронного двигуна, що базується на використанні широтно-імпульсної модуляції.

Ключові слова: асинхронний двигун, перетворювач частоти, широтно-імпульсна модуляція, синусоїдальний струм, силовий напівміст.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПИТАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Г.К. Кальянов, к.т.н., с.н.с., ХНАДУ

Аннотация. Рассмотрена аппаратная реализация формирователей синусоидального фазного тока нагрузки асинхронного двигателя, базирующаяся на использовании широтно-импульсной модуляции.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, синусоидальный ток, силовой полумост.

HARDWARE IMPLEMENTATION SHAPER SINUSOIDAL AC POWER ASYNCHRONOUS MOTORS USING PULSE WIDTH MODULATION

G. Kalyanov, assistant professor, cand. eng. sc., KhNADU

Abstract. We consider the hardware implementation generators phase sinusoidal load current asynchronous motor, which is based on the use of pulse width modulation.

Keywords: asynchronous motor, inverter, PWM, sinusoidal current, half bridge power

Вступ

Сучасні методи формування синусоїдальних струмів базуються на застосуванні так званих широтно-імпульсних перетворювачів, які виконують функцію дискретного підсилювача потужності, як з постійною, так і змінною частотою перетворення. При цьому безпосереднє формування синусоїдальних фазних струмів АД базується на використанні наступних, найбільш поширених методів формування зазначених струмів, а саме [1–3]:

- мінімаксного методу формування;
 - методу формування із заданим значенням пікового струму;
 - методу формування із заданим значенням середнього струму;
 - методу формування із заданим значенням струмового коридору.
- Кожен з перерахованих вище методів формування синусоїдального струму характеризується відповідним алгоритмом роботи імпульсного модулятора (ІМ) формувача.

На рис. 1 надана узагальнена структура формувача синусоїдального струму, що живить фазну обмотку W_Φ асинхронного двигуна, яка характерна для всіх методів формування цього струму.

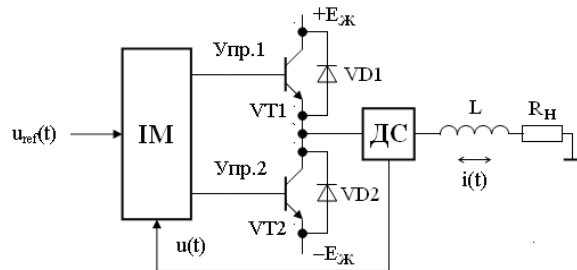


Рис. 1. Узагальнена структурна схема формувача синусоїдального фазного струму АД

Принцип дії формувача засновано:

- на властивості безрозривності струму, що тече через фазну обмотку W_Φ двигуна, яке має місце при високочастотній комутації цієї обмотки (підключенні і відключенні) до джерел напруги $+E_{ж}$ та $-E_{ж}$ за допомогою ключових транзисторів VT1 і VT2 відповідного силового напівмосту по командам імпульсного модулятора (ІМ);
- на реалізації комутації джерел живильної напруги на основі результату порівняння (з різними алгоритмічними особливостями) в ІМ поточного миттєвого значення напруги $u(t)$, яка формується за допомогою датчику струму (ДС) і значення якої пропорційна миттєвому значенню фазного струму $i(t)$, і поточного миттєвого значення синусоїдальної еталонної (опорної) напруги $u_{ref}(t)$, значення якої пропорційна миттєвому значенню струму $i_{ref}(t)$.

Модулятор для мінімаксного методу формування фазного струму АД

Метод реалізує управління формувачем синусоїдального фазного струму АД на кордоні між режимами безрозривних і розривних струмів. Структурна схема імпульсного модулятора при реалізації даного методу управління формувачем, представлена на рис. 2, до складу якої входять:

- детектор знака (ДЗ);
- формувачі модульного значення сигналу (ФМС1, ФМС2);
- аналогові компаратори (K1, K2);
- RS-тригер (Т);

- логічний блок (ЛБ).

Принцип дії імпульсного модулятора при реалізації мінімаксного методу формування фазного струму АД полягає в порівнянні поточного значення фазного струму $i(t)$ з еталонним синусоїдальним струмом $i_{ref}(t)$ і з током нульового значення. Результат цього порівняння визначає стан ключових транзисторів відповідного силового напівмоста (рис. 1). Причому, безпосередньому порівнянню піддаються не зазначені струми, а пропорційні значення відповідних напруг, а саме - $u(t)$, $u_{ref}(t)$ і нульова напруга.

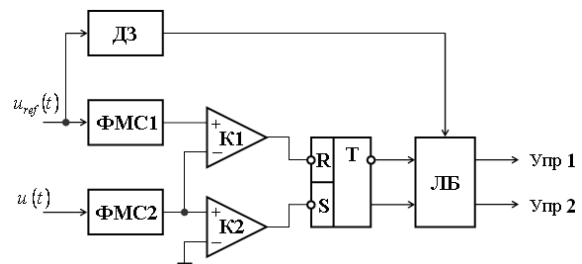


Рис. 2. Схема структурна ІМ при реалізації мінімаксного методу формування фазного струму АД

Як впливає з рис. 2, модульні значення напруг $u(t)$ і $u_{ref}(t)$, тобто напруги $|u(t)|$ і $|u_{ref}(t)|$, відповідно, які формуються на виходах відповідних ФМС, піддаються порівнянню за допомогою компаратора K1. Одночасно з цим, в компараторі K2 здійснюється порівняння значення модуля напруги $u(t)$ з нульовою напругою.

У процесі роботи модулятора можливе отримання трьох варіантів співвідношення величин порівнюваних напруг, що відображено в табл. 1. У цій же таблиці наведені логічні рівні вихідних напруг компараторів K1 і K2, а також відзначені режими роботи RS-тригера, відповідні зазначеним варіантам співвідношення величин порівнюваних напруг.

Робота імпульсного модулятора при реалізації мінімаксного методу формування фазного струму АД наочно представлена за допомогою тимчасової діаграми, яка наведена на рис. 3.

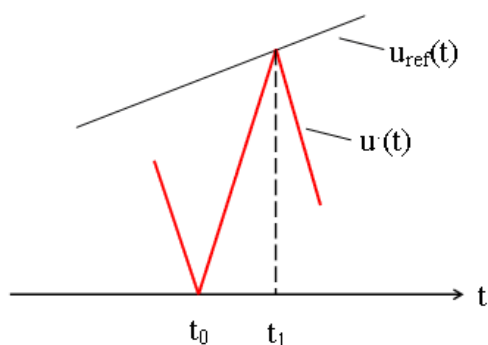


Рис. 3. Тимчасова діаграма для керуючих напруг ІМ при реалізації мінімаксного методу формування фазного струму АД

З цієї діаграми слід:

- у момент часу t_0 , коли виконується співвідношення $u(t) < 0$, вихідна напруга компаратора К2, яка відповідає рівню логічного "0", встановлює RS-тригер в одиничний стан;
- протягом тимчасового інтервалу $\tau = t_1 - t_0$ RS-тригер знаходиться в режимі зберігання (зберігання раніше встановленого одиничного стану);
- у момент часу t_1 , коли виконується співвідношення $u(t) > u_{ref}(t)$, вихідна напруга компаратора К1, яка відповідає рівню логічного "0", встановлює RS-тригер в нульовий стан, після чого тригер знову переходить в режим зберігання, але вже нульового стану і т. д.

Таблиця 1 - Відповідність між режимами роботи RS-тригера і варіантами співвідношення порівнюваних напруг

Варіант співвідношення напруг	Вих. К1	Вих. К2	Режим роботи тригера
$u(t) > u_{ref}(t)$	1	0	Уст. "1"
$0 < u(t) < u_{ref}(t)$	1	1	Збереж.
$u(t) < 0$	0	1	Уст. "0"

Таким чином, зміна стану RS-тригер відбувається циклічно при досягненні напругою $u(t)$ значень синусоїдальної напруги $u_{ref}(t)$ і напруги, яка відповідає нульовому рівню. Прямий і інверсний виходи RS-тригера (виходи Q і \bar{Q} , відповідно) спільно з вихідним сигналом детектора знака ДЗ, значення якого визначається знаком вхідної напівхвилі напруги $u_{ref}(t)$, використовуються для керування роботою логічного блоку ЛБ. На виході цього блоку формуються сигнали управління Упр 1 і Упр 2 ключовими транзисторами силового напівмоста (див. рис. 1). У табл.

2 представлена відповідність між логічними рівнями зазначених сигналів.

Таблиця 2 - Відповідність між вхідними та вихідними логічними рівнями напруг для логічного блоку

Виходи RS-тригера		Вихід ДЗ	Виходи ЛБ	
Q	\bar{Q}		Упр 1	Упр 2
0	1	0 ("+")	0	1
1	0		1	0
0	1	1 ("-")	1	0
1	0		0	1

Як випливає з табл. 2 і рис. 3, циклічна зміна рівнів напруги на виходах Упр 1 і Упр 2 логічного блоку призводить до зміни полярності напруги, що підключається до фазної обмотки АД. В результаті фазний струм $i(t)$ асинхронного двигуна являє собою послідовність імпульсів трикутної форми змінної тривалості, амплітуда і знак яких змінюється за синусоїдальним законом.

Модулятор для методу формування фазного струму АД із заданим значенням пікового струму

Структурна схема імпульсного модулятора при реалізації даного методу формування фазного струму АД представлена на рис. 4. До складу модулятора входять:

- детектор знака (ДЗ);
- формувачі модульного значення сигналу (ФМС1, ФМС2);
- аналоговий компаратор (К);
- D-тригер (Т);
- логічний блок (ЛБ);
- генератор послідовності прямокутних імпульсів (Г).

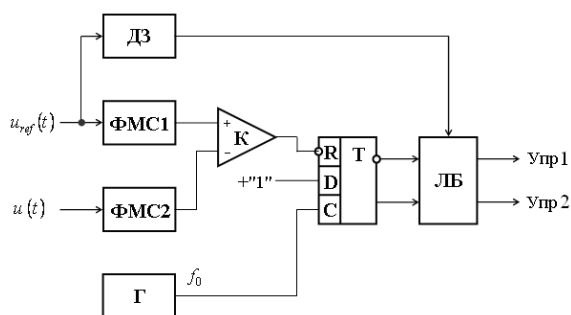


Рис. 4. Структурна схема ІМ при реалізації методу формування фазного струму АД із заданим значенням пікового струму

Принцип дії імпульсного модулятора за технічної реалізації даного методу формування фазного струму АД полягає в порівнянні поточного значення фазного струму $i(t)$ з еталонним синусоїдальним струмом $i_{ref}(t)$. Результат цього порівняння впливає на стан ключових транзисторів відповідного силового напівмоста (рис. 1). Крім того, стан цих транзисторів визначається також і імпульсами, які формуються на виході генератора Г тактової послідовності з частотою f_0 .

Особливість роботи ІМ при зазначеному методі формування фазного струму АД ілюструється тимчасовою діаграмою, яка представлена на рис 5.

Модульні значення напруг $u(t)$ і $u_{ref}(t)$, тобто значення напруг $|u(t)|$ і $|u_{ref}(t)|$, відповідно, (див. рис. 4), що формуються на виходах відповідних ФМС, піддаються порівнянню за допомогою аналогового компаратора К. Результат цього порівняння може мати два значення, а саме:

- він може відповідати рівню логічного нуля при виконанні співвідношення $|u(t)| > |u_{ref}(t)|$;
- він може відповідати рівню логічної одиниці при виконанні співвідношення $|u(t)| < |u_{ref}(t)|$.

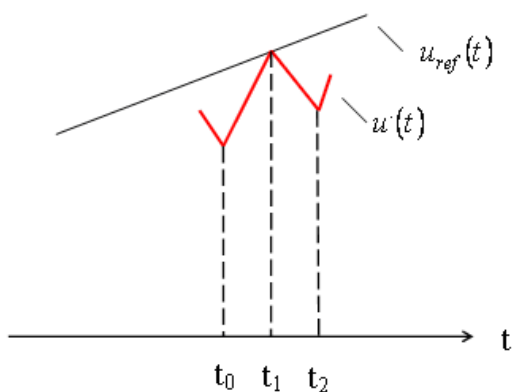


Рис. 5. Тимчасова діаграма для керуючих напруг ІМ при реалізації методу формування фазного струму АД із заданим значенням пікового струму

Наявність логічного нуля на виході компаратора К призводить до асинхронної установки D-тригера в нульовий стан (момент часу t_1 на рис. 5), а наявність логічної одиниці залишає

стан тригера без зміни.

Зворотний перехід D-тригера, тобто його установка в одиничний стан, відбувається в моменти часу надходження на вхід синхронізації останнього імпульсів тактової послідовності з виходу генератора Г моменти часу t_0 і t_2 на рис. 5).

Таким чином, циклічна зміна стану D-тригера при надходженні на вхід останнього зазначених імпульсів призводить до зміни стану ключових транзисторів силового напівмоста (див. рис. 1), в результаті чого струм навантаження $i(t)$, а отже і напруга $u(t)$, являє собою ділянки експонент, які чергуються один за одним і які носять зростаючий і спадаючий характер.

Візуально вказаний характер зміни струму сприймається у вигляді "пилкоподібного" струму, амплітуда якого, з одного боку, обмежена значеннями еталонного струму $i_{ref}(t)$, тобто значеннями еталонної напруги $u_{ref}(t)$, а з іншого боку - визначається моментами часу надходження на вхід синхронізації D-тригера імпульсів вихідної послідовності генератора Г. При цьому, амплітуда струмової "пилки" залежить від частоти f_0 імпульсної послідовності.

Алгоритм роботи логічного блоку ЛБ, що входить до складу структури, представлені на рис. 4, при формуванні сигналів управління Упр 1 і Упр 2 співпадає з роботою відповідного блоку, що входить до складу структури, яка наведена на рис. 2.

Модулятор для методу формування фазного струму АД із заданим значенням середнього струму

Структурна схема імпульсного модулятора при реалізації даного методу формування фазного струму АД представлена на рис. 6. До складу модулятора входять:

- детектор знака (ДЗ);
- формувачі модульного значення сигналу (ФМС1, ФМС2);
- аналоговий компаратор (К);
- D - тригер (Т);
- логічний блок (ЛБ);
- генератор послідовності прямокутних імпульсів (Г).

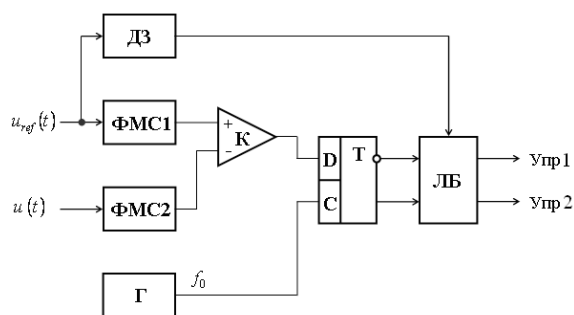


Рис. 6. Схема структурна ІМ при реалізації методу формування фазного струму АД із заданим значенням середнього струму

Принцип дії імпульсного модулятора при технічній реалізації даного методу формування фазного струму АД полягає в порівнянні поточного значення фазного струму $i(t)$ з еталонним синусоїдальним струмом $i_{ref}(t)$. Однак, на відміну від методу формування фазного струму АД, наданого в підрозділі 2, результат цього порівняння не має можливості безпосередньо впливати на стан D-тригера, а визначає лише значення поточного співвідношення між величинами $|u(t)|$ і $|u_{ref}(t)|$. При цьому, безпосередня зміна стану тригера відбувається в моменти часу, коли на вхід синхронізації тригера надходять імпульси тактової послідовності, що генерується з частотою f_0 генератором.

Результат порівняння величин напруг $|u(t)|$ і $|u_{ref}(t)|$, проведеного за допомогою аналогового компаратора К, може мати два значення, а саме:

- він може відповідати рівню логічного нуля при виконанні співвідношення $|u(t)| > |u_{ref}(t)|$;
- він може відповідати рівню логічної одиниці при виконанні співвідношення $|u(t)| < |u_{ref}(t)|$.

Наявність логічного нуля на виході компаратора К призводить до установки D-тригера в нульовий стан в момент часу надходження на вхід синхронізації С останнього тактового імпульсу (моменти часу t_0 і t_2 на рис. 7).

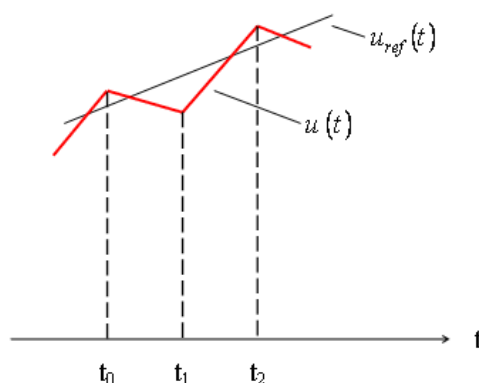


Рис. 7. Тимчасова діаграма для керуючих напруг а при реалізації методу формування фазного струму АД із заданим значенням середнього струму

Зворотний перехід D-тригера, тобто його установка в одиничний стан, відбувається за наявності на виході компаратора напруги, відповідної рівню логічної одиниці, в момент часу надходження на вхід синхронізації С зазначеного тригера тактового імпульсу (момент часу t_1 на рис. 7).

Як впливає з тимчасовою діаграмою, яка представлена на рис. 7, циклічна зміна вихідного стану D-тригера при роботі ІМ призводить до зміни стану ключових транзисторів силового напівмоста (див. рис. 1), в результаті чого струм навантаження $i(t)$, а отже і напруга $u(t)$, являє собою ділянки експонент, які чергуються один за одним і які носять зростаючий і спадаючий характер. Візуально ж вказаний характер зміни струму сприймається у вигляді "пилкоподібного" струму, амплітуда якого визначається частотою f_0 надходження тактових імпульсів на вхід синхронізації D-тригера (див. рис. 6).

Алгоритм роботи логічного блоку ЛБ, що входить до складу структури, представленої на рис. 6, при формуванні сигналів управління Упр 1 і Упр 2 станом ключових транзисторів силового напівмоста співпадає з роботою відповідного блоку, що входить до складу структури, яка наведена на рис. 2.

Модулятор для методу формування фазного струму АД із заданою шириною струмового коридору

Структурна схема імпульсного модулятора при реалізації даного методу формування фазного струму АД представлена на рис. 8.

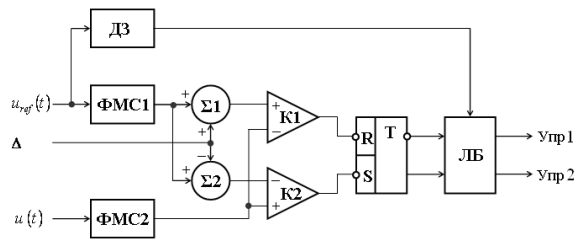


Рис. 8 - Схема структурна ІМ при реалізації методу формування фазного струму АД із заданим значенням струмового коридору

До складу модулятора входять:

- детектор знака (ДЗ);
- формувачі модульного значення сигналу (ФМС1, ФМС2);
- аналогові суматори ($\Sigma 1$ і $\Sigma 2$);
- аналогові компаратори (K1 і K2);
- RS - тригер (Т);
- логічний блок (ЛБ).

Принцип дії ІМ за технічної реалізації даного методу формування фазного струму АД полягає в порівнянні поточного значення фазного струму $i(t)$ з двома значеннями еталонного синусоїдального струму, величини яких визначаються співвідношеннями $i_{ref}(t) + \Delta$ і $i_{ref}(t) - \Delta$, в яких 2Δ являє собою значення токового гістерезису. Цей гістерезис і утворює так званий струмовий коридор, в межах якого змінюється поточний фазний струм $i(t)$ АД.

За допомогою аналогових компараторів K1 і K2 здійснюється попарне порівняння напруг $u(t)$ і $u_{ref}(t) + \Delta$, а також $u(t)$ і $u_{ref}(t) - \Delta$, відповідно, величини яких пропорційні величинам зазначених вище струмів. При цьому результат порівняння впливає на стан ключових транзисторів відповідного силового напівмоста (див. рис. 1).

Особливість роботи ІМ при зазначеному методі формування фазного струму АД ілюструється тимчасовою діаграмою, яка наведена на рис. 9.

Як впливає з тимчасових діаграм, представлених на рис. 9, циклічна зміна вихідного стану RS-тригера при роботі ІМ призводить до зміни стану ключових транзисторів силового напівмоста (див. рис. 1), в результаті чого струм навантаження $i(t)$, а отже і напруга $u(t)$, являє собою ділянки експонент, які чергуються один за одним і які носять зрос-

таючий і спадаючий характер. Візуально ж вказаний характер зміни струму сприймається у вигляді "пилкоподібного" струму, амплітуда якого визначається шириною струмового коридору 2Δ .

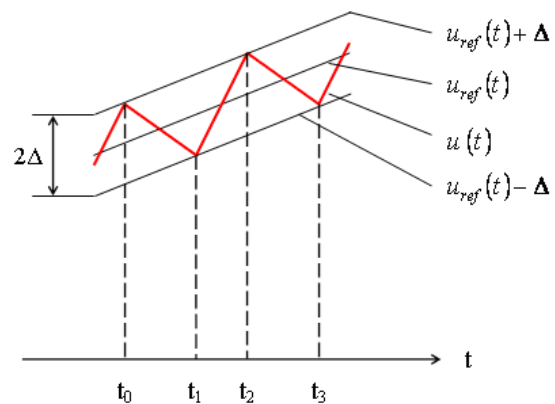


Рис. 9. Тимчасова діаграма для керуючих напруг ІМ при реалізації методу формування фазного струму АД із заданим значенням струмового коридору

Алгоритм роботи логічного блоку ЛБ, що входить до складу структури, представленої на рис. 8, при формуванні сигналів управління Упр 1 і Упр 2 станом ключових транзисторів силового напівмоста співпадає з роботою відповідного блоку в складі структури, яка представлена на рис. 2.

Розглянемо принцип дії модулятора більш детально. Модульне значення напруги $u_{ref}(t)$, що формується на виході формувача ФМС1, надходить на підсумовуючі входи аналогових суматорів $\Sigma 1$ і $\Sigma 2$, на виході яких (див. рис. 8) формуються напруги $u_{ref}(t) + \Delta$ і $u_{ref}(t) - \Delta$, відповідно. Напруга $u_{ref}(t) + \Delta$ надходить до підсумовуючого входу компаратора K1, а напруга $u_{ref}(t) - \Delta$ - на від'ємний вхід компаратора K2. Крім того, на від'ємний вхід компаратора K1 і підсумовуючий вхід компаратора K2 надходить вихідна напруга формувача ФМС2, яка дорівнює модульному значенню напруги $u(t)$. У підсумку, на виході компараторів K1 і K2 формуються логічні рівні напруги, які відповідні результатам порівняння:

- напруги $|u(t)|$ і $|u_{ref}(t) + \Delta|$ (на виході компаратора K1);
- напруги $|u(t)|$ і $|u_{ref}(t) - \Delta|$ (на виході компаратора K2).

Насамперед розглянемо результат порівнян-

ня, одержуваний на виході компаратора К1, який може мати два значення, а саме:

- він може відповідати рівню логічного нуля при виконанні співвідношення

$$|u(t)| > |u_{ref}(t) + \Delta|;$$

- він може відповідати рівню логічної одиниці при виконанні співвідношення

$$|u(t)| < |u_{ref}(t) - \Delta|.$$

Наявність логічного нуля на виході компаратора К1 призводить до установки RS-тригера в нульовий стан (моменти часу t_0 і t_2 на рис. 9).

Зворотний перехід RS-тригера, тобто його установка в одиничний стан, відбувається в моменти часу, коли результат порівняння, проведеного в компараторі К2, також відповідає рівню логічного нуля (моменти часу t_1 і t_3 на рис. 9). Однак, для цього випадку характерне наступне співвідношення для порівнюваних напруг - $|u(t)| < |u_{ref}(t) - \Delta|$.

Література

1. И.Е. Овчинников. Вентильные двигатели и привод на их основе / Курс лекций. – СПб.: Корона – Век, 2006. – 336 с.
2. А.А. Усольцев. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. – СПб.:СПбГУ ИНТО, 2006. – 94 с.
3. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.

Рецензент: О.Б. Богаєвський, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 14 травня 2016 р.