УКРАЇНА

(19) UA (11) 123742 (13) C2

(51) МПК (2021.01)
H02P 23/18 (2016.01)
H02P 27/00
H02P 103/10 (2016.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: **a 2019 01419**

(22) Дата подання заявки: **12.02.2019**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **27.05.2021**

(41) Публікація відомостей про заявку: **10.07.2019, Бюл.№ 13**

(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **26.05.2021, Бюл.№ 21**

(72) Винахідник(и):
Кулик Максим Володимирович (UA)

(73) Володілець (володільці):
Кулик Максим Володимирович,
вул. Гайдамацька, буд. 29, кв. 101, м. Кам'янське, Дніпропетровська обл., 51935 (UA)

(74) Представник:
Низова Інна Олександрівна, реєстр. №373

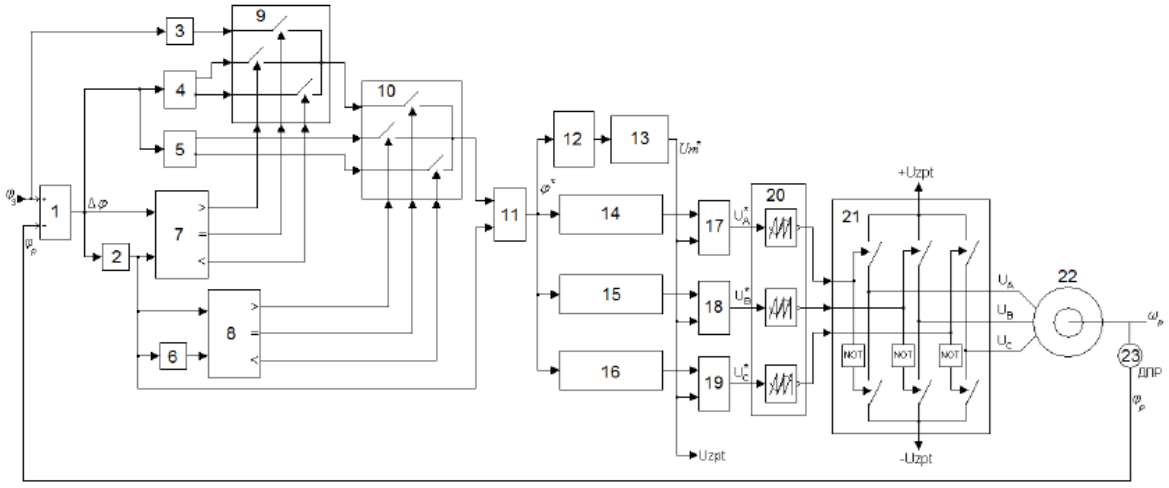
(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
RU 2132110 C1, 20.06.1999
RU 2294050 C2, 20.02.2007
RU 2398349 C1, 27.08.2010
RU 2402865 C1, 27.10.2010
UA 53315 U, 11.101.2010
UA 59878 A, 15.09.2003
UA 113687 U, 10.02.2017
US 4255695 A, 10.03.1981
US 4607203 A, 19.08.1986
US 2008/0136188 A, 12.06.2008

UA 123742 C2

(54) СПОСІБ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

(57) Реферат:

Винахід належить до способів фазового управління асинхронними двигунами і може бути використаний для управління асинхронним двигуном із короткозамкнутим ротором. Спосіб управління асинхронним двигуном полягає в тому, що в кожен момент часу вимірюють кут повороту ротора, визначають значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, визначають значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, формують за допомогою силового перетворювача фазу напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна. При цьому задають значення кута повороту ротора для кожного моменту часу, кожне з заданих значень кута повороту ротора порівнюють з поточним виміряним у відповідний момент часу значенням цього кута, і формують сигнал помилки відпрацювання кута повороту ротора. Технічним результатом винаходу є забезпечення підвищення відповідності кута повороту ротора асинхронного двигуна до заданого кута повороту ротора, усунення різких змін струму в обмотці статора при зміні зовнішнього навантаження, накопиченні помилки стеження, підвищення точності відпрацювання необхідного закону зміни кута повороту ротора асинхронного двигуна при одночасному зменшенні операцій вимірювання із виключенням необхідності вимірювання значень ряду величин із зменшенням кількості цих величин, спрощенні алгоритму обчислень, забезпечення плавного запуску та зупинки двигуна, підвищення ефективності способу управління із підвищенням надійності та ефективності двигуна та його роботи.


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
+Uzpt
-Uzpt
Uzpt
NOT
NOT
NOT
ДПР

Фіг. 1

Винахід належить до способів фазового управління асинхронними двигунами і може бути використаний для управління асинхронним двигуном із короткозамкнутим ротором.

З рівня техніки відомі способи частотного управління асинхронним двигуном, при яких частота, або амплітуда і частота напруги живлення асинхронного двигуна змінюються узгоджено або окремо для забезпечення необхідної частоти обертання ротора, наприклад спосіб оптимального частотного управління асинхронним двигуном (патент RU 2402865 C1, МПК H02P 23/08, H02P 27/04, H02P 27/06, опубліковано 27.10.2010 р., Бюл. № 30), при якому задають максимально допустиме значення струму на виході силового перетворювача, в кожен момент часу задають потрібне значення електромагнітного моменту, вимірюють кругову частоту обертання ротора асинхронного двигуна і напругу ланки постійного струму силового перетворювача, який живить двигун, визначають значення кругової частоти оптимального ковзання, кругової частоти критичного ковзання з максимально допустимої напруги на виході силового перетворювача, враховуючи максимальний електромагнітний момент, що розвивається асинхронним двигуном, задають значення реалізованого електромагнітного моменту або рівним значенню електромагнітного моменту, визначають необхідні значення амплітуди напруги живлення обмоток статора при значенні частоти ковзання, взятої зі знаком, відповідним знаком заданого електромагнітного моменту, а значення частоти напруги живлення обмоток статора визначають як суму величини виміряної частоти обертання ротора і певної величини частоти оптимального ковзання взятої зі знаком, який відповідає знаку заданого електромагнітного моменту; або визначають необхідне значення амплітуди напруги живлення обмоток статора як рівне максимально допустимому значення напруги силового перетворювача, а значення його частоти - як суму величини виміряної частоти обертання ротора і певної величини частоти оптимального ковзання, взятої зі знаком, відповідним знаком заданого електромагнітного моменту, і помноженої на коефіцієнт пропорційності, або визначають необхідні значення амплітуди напруги живлення обмоток статора визначають, як рівне максимально допустимого значення напруги силового перетворювача, а значення його частоти - як суму величини виміряної частоти обертання ротора і певної величини частоти оптимального ковзання, взятої зі знаком, відповідним знаком заданого електромагнітного моменту, і помноженої на коефіцієнт пропорційності.

Системи, що втілюють способи частотного управління, прості в реалізації і мають широке застосування в різних галузях промисловості. Такі системи можуть бути розімкнутими (наприклад системи із дотриманням u/f=Const) або замкнутими по частоті обертання, струму двигуна, електромагнітного моменту тощо. Недоліками існуючих розімкнутих систем частотного управління є обмежений діапазон регулювання частоти обертання, недостатня точність регулювання частоти обертання ротора, залежність регулювання частоти обертання ротора від навантаження та недостатня стійкість до перенавантаження. Недоліками існуючих замкнутих систем частотного регулювання є зменшена швидкодія і схильність до виникнення небажаних коливань частоти, особливо в нижній частині діапазону регулювання частоти обертання. Вказані системи часто не забезпечують необхідної ефективності та надійності регулювання частоти обертання роторів асинхронних двигунів, що містяться в існуючих промислових пристроях.

Відомі способи векторного управління асинхронними двигунами, в яких регулювання механічного руху ротора асинхронного двигуна (електромагнітного моменту) і електромагнітної складової (магнітного потоку) здійснюється окремо, за допомогою регулювання активної і магнітної компонент вектора струму та за рахунок відповідного формування напруги живлення, наприклад спосіб оптимального векторного управління асинхронним електродвигуном (патент RU 2132110 C1, МПК H02P 21/00, опубліковано 20.06.1999 р.), при якому живлять статорні обмотки змінним струмом, амплітуду і кут фазового зсуву якого відносно вектора потокозчеплення ротора регулюють, при цьому фазні струми рівні різниці синхронно змінюваних з частотою синхронізації синфазного і ортофазного струмів, заданий момент змінюють залежно від неузгодженості заданої і поточної швидкості, при цьому вимірюють струми в трьох фазах статора, додатково вимірюють напруги в трьох фазах статора, перетворюють виміряні в трьох фазах струми і напруги в двофазну систему синфазного і ортофазного струмів і напруг, потім визначають дійсну амплітуду синфазного і ортофазного струмів, а також обчислюють шляхом інтегрування різниці перетворених напруг і падіння напруг, пропорційних перетвореним струмам, амплітуду потокозчеплення ротора і величини синусної і косинусної функцій фази потокозчеплення ротора, при цьому в залежності від дійсної амплітуди ортофазного струму змінюють задану амплітуду синфазного струму з умови зміни кута фазового зсуву вектора струму статора щодо вектора потокозчеплення ротора в діапазоні більше 45°, а величину заданої амплітуди ортофазного струму змінюють пропорційно відношенню заданого моменту і обчисленої амплітуди потокозчеплення ротора, поточну швидкість обертання обчислюють

шляхом підсумовування частоти ковзання з частотою синхронізації, рівної нормованої синусної і косинусної функцій фази потокозчеплення ротора, пропорційно яким регулюють ортофазний і синфазний струми, амплітуда яких змінюється в залежності від неузгодженості заданої і дійсної амплітуд синфазних і ортофазних струмів.

Попри численні переваги способів векторного управління асинхронними двигунами, такі як досягнення максимальної швидкодії і високої точності регулювання, вказані способи, наприклад зазначений вище, потребують використання складних систем з множиною складних та дорогих елементів, які надають інформацію про направлення і значення магнітного поля в асинхронному двигуні, для чого, як правило, використовуються складні моделі електромагнітних процесів. Для задовільної роботи таких моделей потрібна точна та повна інформація про параметри асинхронного двигуна, які, крім того, не повинні непередбачуваним чином змінюватися в процесі роботи. Тому в системах векторного управління зазвичай використовуються режими роботи двигуна з постійним полем, при яких параметри моделі поля змінюються незначно при зміні величини магнітного поля в двигуні, що обмежує функціональність способів векторного управління обмеженим колом типів асинхронних двигунів.

Також відомий спосіб управління асинхронним двигуном, (патент RU 2294050 C2, МПК H02P 23/08, H02P 27/06, опубліковано 20.02.2007, Бюл. № 5), який полягає в тому, що вимірюють частоту обертання асинхронного двигуна, вводять в регулятор напруги різницю між заданою і поточної частотами обертання асинхронного двигуна, визначають частоту напруги асинхронного двигуна підсумовуванням частоти обертання ротора асинхронного двигуна і його оптимального ковзання, змінюють частоту і величину напруги на асинхронному двигуні відповідно до необхідними значеннями, при цьому оптимальне ковзання визначають, враховуючи значення сигналу з виходу регулятора напруги, відповідного заданому електромагнітному моменту асинхронного двигуна, номінального електромагнітного моменту асинхронного двигуна, номінальної синхронної частоти обертання асинхронного двигуна, номінальної частоти обертання асинхронного двигуна, а величину напруги асинхронного двигуна визначають, виходячи із заданого значення напруги асинхронного двигуна і номінального значення напруги асинхронного двигуна.

Використання відомого аналога дозволяє регулювати швидкість обертання ротора асинхронного двигуна в більш широкому діапазоні з коефіцієнтом потужності і перевантажувальної здатності, близькими до номінальних значень. Разом з тим, відомий аналог має суттєвий недолік, який полягає в тому, що внаслідок неминучих похибок у вимірюванні значення частоти обертання ротора, які, як правило, можна порівняти з величиною оптимальної частоти ковзання, частота напруги живлення асинхронного двигуна, і, отже, електромагнітний момент встановлюються з певною помилкою, яка, при відносно малій частоті ковзання, може призводити до протилежного знаку реалізованого електромагнітного моменту. Збільшення частоти ковзання в порівнянні з оптимальною дозволяє зберегти працездатність асинхронного двигуна з частотним управлінням, однак призводить до зниження ККД асинхронного двигуна.

Найближчим аналогом винаходу, що заявляється, є спосіб фазового управління асинхронним двигуном (патент RU 2398349 C1, МПК H02P 23/08, H02P 27/04, опубліковано 27.08.2010 р., Бюл. № 24), при якому в кожен момент часу вимірюють кут повороту ротора, визначають значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, визначають значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, формують за допомогою силового перетворювача фазу напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, при цьому визначають відповідний куту повороту ротора електричний кут на інтервалі 0÷2π, задають частоту обертання ротора, а також однакові по знаку електромагнітний момент і частоту ковзання, визначають значення фази ковзання, інтегруючи частоту ковзання на інтервалі 0÷2π, після чого визначають значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, необхідну для забезпечення заданого електромагнітного моменту при поточному значенні частоти обертання ротора, визначають величину фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна як суму значення фази ковзання і значення виміряного електричного кута повороту ротора та формують за допомогою силового перетворювача визначені амплітуду і фазу напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна.

Недоліками відомого аналога є недостатня відповідність кута повороту ротора асинхронного двигуна до заданого кута повороту ротора, наявність різких змін струму в обмотці статора при зміні зовнішнього навантаження, накопичення помилки стеження, складний алгоритм обчислень, відсутність забезпечення плавного запуску та зупинки двигуна, низька ефективність та надійність двигуна та його роботи, які обумовлені тим, що для функціонування найближчого аналога існує необхідність у врахуванні та використанні точних параметрів асинхронного

двигуна, які можуть бути невідомими або змінюватися під час його роботи, необхідність вимірювання поточної частоти обертання ротора асинхронного двигуна, що зумовлює необхідність у пропорційно-інтегральному регуляторі, який є складним та енергоємним пристроєм. Все це ускладнює алгоритм функціонування системи управління як на апаратному, так і на програмному рівні, призводить до великих витрат енергії, що негативно впливає на ККД асинхронного двигуна, швидкодію та коректність визначення необхідних значень величин та формування за допомогою силового перетворювача визначених амплітуди і фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна. Зокрема потреба у обчисленнях із використанням значень частоти, фази ковзання та електромагнітного моменту уповільнює та ускладнює роботу системи пристроїв, за допомогою яких здійснюють найближчий аналог, а визначення значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, необхідну для забезпечення заданого електромагнітного моменту при поточному значенні частоти обертання ротора потребує знання значень таких величин як індуктивність обмотки статора, обмотки ротора і взаємоіндуктивність обмоток статора і ротора, активні опори обмоток статора і ротора тощо.

Окрім того відсутність врахування поточного значення кута повороту ротора при визначенні значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, необхідної для забезпечення заданого електромагнітного моменту при поточному значенні частоти обертання ротора, може призвести до різкої зміни фази напруги в перехідних процесах та викликати небажані кидки струму, що робить найближчий аналог ненадійним.

Технічною задачею заявленого винаходу є створення нового способу управління асинхронним двигуном, який характеризується підвищеною відповідністю кута повороту ротора асинхронного двигуна до заданого кута повороту ротора, відсутністю різких змін струму в обмотці статора при зміні зовнішнього навантаження, відсутністю накопичення помилки стеження, підвищеною точністю відпрацювання необхідного закону зміни кута повороту ротора асинхронного двигуна, зменшеною кількістю операцій вимірювання величин та зменшеною кількістю величин, які потребують вимірювання, спрощеним алгоритмом обчислень, плавним запуском та зупинкою двигуна, підвищеною ефективністю із підвищенням надійності та ефективності двигуна та його роботи.

Рішення поставленої технічної задачі досягається тим, що за заявленим способом управління асинхронним двигуном, при якому в кожен момент часу вимірюють кут повороту ротора, визначають значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, визначають значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, формують за допомогою силового перетворювача фазу напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, згідно з винаходом, задають значення кута повороту ротора для кожного моменту часу, кожне з заданих значень кута повороту ротора порівнюють з поточним виміряним у відповідний момент часу значенням цього кута, і формують сигнал помилки відпрацювання кута повороту ротора, формують пропорційний, рівномірний та квадратичний закони зміни кута повороту ротора та визначають значення помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу та поточному інтервалі часу, визначають динаміку помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому та поточному інтервалах часу і вибирають один з сформованих законів зміни кута повороту ротора відповідно до необхідного режиму роботи асинхронного двигуна із врахуванням визначеної динаміки помилки, формують сигнал моментального значення кута повороту ротора, забезпечують безперервність функції вибраного закону зміни кута повороту ротора із складанням поточного значення кута повороту ротора з його значенням на попередньому інтервалі часу, після чого визначають значення частоти живлення асинхронного двигуна та значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна за формулою:

$$U_m = k \cdot f = k \frac{\Delta\varphi^*}{\Delta t} = k \frac{\left(\varphi_i^* - \varphi_{i-1}^*\right)}{t_i},$$

де k - константа навантаження асинхронного двигуна, f - частота живлення ротора, $\Delta\varphi^*$ - моментальне значення кута повороту ротора при вибраному законі зміни кута повороту ротора, а Δt - заданий інтервал часу,

а також визначають значення трьох гармонійних компонент напруги для кожної фази асинхронного двигуна, після чого визначають значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази із урахуванням отриманого значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та трьох отриманих гармонійних компонент напруги, після чого із урахуванням визначеного значення фази напруги живлення

обмоток статора асинхронного двигуна та кількості фаз формують широтно-імпульсно-модульовані сигнали та направляють їх на силовий перетворювач, за допомогою якого формують керуючі сигнали і направляють на асинхронний двигун.

Також, згідно з винаходом, керуючі сигнали формують, перетворюючи за допомогою силового перетворювача широтно-імпульсно-модульовані сигнали за формою та амплітудою.

Окрім цього, згідно з винаходом, у разі відсутності помилки відпрацювання кута повороту ротора рівномірний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \varphi_{i-1}^*,$$

у разі появи помилки відпрацювання кута повороту ротора пропорційний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \beta \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*,$$

у разі постійного значення помилки відпрацювання кута повороту ротора закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*,$$

у разі збільшення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора квадратичний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* \\ -\beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot d_1 \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* \end{cases},$$

де φ_i^* - значення кута повороту ротора за поточний інтервал часу, β - константа значення зворотного зв'язку, φ_{i-1}^* - значення кута повороту ротора за попередній інтервал часу, $\Delta\varphi_i$ - значення помилки відпрацювання кута повороту ротора за поточний інтервал часу, d_1 - динаміка помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу.

Разом з тим, згідно з винаходом, три гармонійні компоненти напруги визначають, розкладаючи моментальне значення кута повороту ротора у ряд Маклорена.

Крім цього, згідно з винаходом, значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази визначають за формулами:

$$U_A^* = Um \cdot U_A^{'},$$

$$U_B^* = Um \cdot U_B^{'},$$

$$U_C^* = Um \cdot U_C^{'},$$

де U_A^*, U_B^*, U_C^* - значення фази напруги кожної з трьох фаз асинхронного двигуна, Um - значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, а $U_A^{'}$, $U_B^{'}$, $U_C^{'}$ - гармонійні компоненти напруги.

Також, згідно з винаходом, при використанні асинхронного двигуна із рекуперацією енергії задають необхідну напругу U_{ZPT}^* в ланці постійного струму із врахуванням визначеного значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна Um.

Технічним результатом заявленого винаходу є забезпечення підвищення відповідності кута повороту ротора асинхронного двигуна до заданого кута повороту ротора, усунення різких змін струму в обмотці статора при зміні зовнішнього навантаження, накопичення помилки стеження, підвищення точності відпрацювання необхідного закону зміни кута повороту ротора асинхронного двигуна при одночасному зменшенні операцій вимірювання із виключенням необхідності вимірювання значень ряду величин із зменшенням кількості цих величин, спрощення алгоритму обчислень, забезпечення плавного запуску та зупинки двигуна, підвищення ефективності способу управління із підвищенням надійності та ефективності двигуна та його роботи.

Причинно-наслідковий зв'язок між суттєвими ознаками винаходу та очікуваним технічним результатом полягає у наступному.

У сукупності суттєвих ознак заявленого винаходу забезпечується вказаний вище технічний результат за рахунок здійснення управління асинхронним двигуном за допомогою вдосконаленого алгоритму, який включає кускову апроксимацію необхідного закону зміни кута положення ротора від часу, в основу якого поставлено використання готових фрагментів

поточної фазової характеристики лінійного і квадратичного законів формування фази, вибір кожного з яких або їх комбінації здійснюється відповідно до необхідного режиму роботи асинхронного двигуна, для чого формують моментальні сигнали фаз і форму сигналів управління силового модуля та розраховують діюче значення напруги живлення асинхронного двигуна, а також включає формування відповідні напруги живлення асинхронного двигуна і ланки постійного струму шляхом отримання наближення похідної від функції кута повороту ротора асинхронного двигуна за часом і поданні її у вигляді ряду.

Задавання значення кута повороту ротора для кожного моменту часу, порівняння кожного з заданих значень кута повороту ротора з поточним виміряним у відповідний момент часу значенням цього кута, формування сигналу помилки відпрацювання кута повороту ротора дозволяє уникнути накопичення помилки стеження, підвищити точність відпрацювання необхідного закону зміни кута повороту ротора асинхронного двигуна, підвищити відповідність кута повороту ротора асинхронного двигуна до заданого кута повороту ротора, оскільки подальше визначення значень величин, необхідних для ефективного та надійного управління асинхронним двигуном в даному випадку залежить саме від формування сигналу помилки відпрацювання кута повороту ротора на основі безперервного отримання даних про поточний кут повороту ротора та безперервного задавання необхідного значення кута повороту ротора. Таким чином, кут повороту ротора коригується в залежності від безперервно отримуваних даних з датчика кута повороту ротора, встановленого безпосередньо на асинхронному двигуні, що у подальшому дозволяє визначити та змінювати необхідне значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, формувати вказану фазу напруги живлення у кожний момент часу без затримок або помилок.

Крім цього для подальшого визначення значень вказаних вище величин вихідною величиною є виключно кут повороту ротора, що зменшує кількість величин, значення яких враховують при управлінні асинхронним двигуном, та спрощує алгоритм обчислень.

Формування пропорційного, рівномірного та квадратичного законів зміни кута повороту ротора, визначення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу та поточному інтервалі часу, визначення динаміки помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому та поточному інтервалах часу і вибір одного з сформованих законів зміни кута повороту ротора відповідно до необхідного режиму роботи асинхронного двигуна із врахуванням визначеної динаміки помилки дозволяє використовувати готові фрагменти поточної фазової характеристики лінійного і квадратичного законів формування фази та вибирати вказані закони або їх комбінацію відповідно до необхідного режиму роботи асинхронного двигуна, що зменшує кількість операцій вимірювання, виключає необхідність вимірювання значень ряду величин із зменшенням кількості цих величин, спрощує алгоритм обчислень, підвищує ефективність способу управління із підвищенням надійності та ефективності двигуна та його роботи.

Використання готових фрагментів поточної фазової характеристики заданого кута повороту ротора асинхронного двигуна дозволяє виключити розрахунки, пов'язані з координатними перетвореннями, а відпрацювання необхідного закону керування здійснювати на основі сформованих сигналів миттєвого значення, що підвищує швидкодію здійснення способу та точність регулювання кута повороту ротора, при цьому алгоритм даних операцій є простим і не потребує використання складного обладнання або тривалих та складних розрахунків. При цьому враховується динаміка помилки на встановлених інтервалах часу, що забезпечує безперервність задавання та регулювання кута повороту ротора, а також регулювання фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна.

Формування сигналу моментального значення кута повороту ротора, забезпечення безперервності функції вибраного закону зміни кута повороту ротора із складанням поточного значення кута повороту ротора з його значенням на попередньому інтервалі часу дозволяє визначати значення частоти живлення асинхронного двигуна та значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна з урахуванням визначеної частоти живлення безперервно у кожний момент часу, що усуває різкі зміни струму в обмотці статора при зміні зовнішнього навантаження, підвищує ефективність способу управління із підвищенням надійності та ефективності двигуна та його роботи та є необхідним для визначення значення трьох гармонійних компонент напруги для кожної фази асинхронного двигуна. Таким чином визначення значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази та формування широтно-імпульсно-модульованих сигналів, які направляють їх на силовий перетворювач, відбувається саме завдяки сформованому сигналу моментального значення кута повороту ротора, а безперервність функції вибраного закону зміни кута повороту

ротора забезпечує підвищену відповідність кута повороту ротора асинхронного двигуна до заданого кута повороту ротора, безперервність зміни фази напруги живлення, відсутність стрибків фази в динамічних режимах роботи.

Визначення значення частоти живлення асинхронного двигуна, значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, значення трьох гармонійних компонент напруги для кожної фази асинхронного двигуна за заявленим способом є необхідним для визначення значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази. При цьому значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази визначають внаслідок помноження значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та значення кожної з гармонійних компонент напруги для кожної фази асинхронного двигуна, що значно спрощує алгоритм обчислень та не потребує даних про точні параметри асинхронного двигуна та множину величин, які потрібно визначити або виміряти.

Формування широтно-імпульсно-модульованих сигналів із урахуванням визначеного значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та кількості фаз та їх направлення на силовий перетворювач, формування керуючих сигналів за допомогою силового перетворювача та їх направлення на силовий двигун на асинхронний двигун необхідне для безпосереднього управління асинхронним двигуном за допомогою відповідних сигналів, завдяки яким на асинхронний двигун подається визначена напруга, необхідна для зміни кута повороту ротора. При цьому забезпечується плавний пуск і зупинка асинхронного двигуна, оскільки керуючи сигнали формуються силовим перетворювачем у кожний момент часу, безперервно та без затримок на підставі отримання даних про поточне значення кута повороту ротора та визначення значень необхідних величин для його зміни.

Формування керуючих сигналів внаслідок перетворення широтно-імпульсно-модульованих сигналів за формою та амплітудою за допомогою силового перетворювача є переважним варіантом формування керуючих сигналів за заявленим способом.

Задавання необхідної напруги в ланці постійного струму із врахуванням визначеного значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна при використанні асинхронного двигуна із рекуперацією енергії дозволяє забезпечити рекуперацію енергії при роботі асинхронного двигуна, що підвищує його коефіцієнт корисної дії та зменшує його енергоємність.

Суть заявленого способу управління асинхронним двигуном пояснюється за допомогою наступного зображення:

Креслення - Загальна схема системи управління асинхронним двигуном, яку використовують для здійснення заявленого способу управління асинхронним двигуном.

На кресленні зображений один з можливих, але не виключний, варіант виконання системи управління асинхронним двигуном, яка призначена для здійснення заявленого способу управління асинхронним двигуном та включає асинхронний двигун 22 із встановленим на ньому датчиком кута повороту ротора 23, блок визначення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора 1, блок визначення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу 2, блок формування пропорційного закону зміни кута повороту ротора 3, блок формування рівномірного закону зміни кута повороту ротора 4, блок формування квадратичного закону зміни кута повороту ротора 5, блок визначення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора на поточному інтервалі часу 6, блок визначення динаміки помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу 7, блок визначення динаміки помилки відпрацювання кута повороту ротора на поточному інтервалі часу 8, блоки визначення моментального значення кута повороту ротора 9 та 10, блок формування сигналу моментального значення кута повороту ротора 11, блок визначення значення частоти живлення асинхронного двигуна 12, блок визначення значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна 13, блоки визначення значень трьох гармонійних компонент напруги для кожної фази асинхронного двигуна 14, 15 та 16, блоки визначення значень фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази асинхронного двигуна 17, 18 та 19, широтно-імпульсний модулятор 20 та силовий перетворювач 21.

Заявлений спосіб управління асинхронним двигуном здійснюють наступним чином.

Значення поточного кута повороту ротора φ_P отримують з датчика кута повороту ротора 23, який встановлений на асинхронному двигуні 22 та безперервно вимірює кут повороту ротора. Після цього до блока визначення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора 1 направляють виміряне значення поточного кута повороту ротора φ_P та задане значення кута

повороту ротора φ_3. У блоці 1 кожне з заданих значень кута повороту ротора φ_3 порівнюють з поточним виміряним у відповідний момент часу значенням цього кута φ_P, після чого формують сигнал помилки відпрацювання кута повороту ротора $\Delta\varphi$.

Після цього сигнал помилки відпрацювання кута повороту ротора $\Delta\varphi$ направляють до блоків 2 та 6, де визначають значення помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу $\Delta\varphi_{i-1}$ та кута повороту ротора на поточному інтервалі часу $\Delta\varphi_{i-2}$. Помилка відпрацювання кута положення ротора на відповідному відліку має вигляд:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_{3i} - \varphi_{Pi}.$$

Разом з цим, формують пропорційний, рівномірний та квадратичний закони зміни кута повороту ротора у блоках 3, 4 та 5 з урахуванням значення помилки відпрацювання кута повороту ротора $\Delta\varphi$.

Далі у блоках 7 та 8 визначають динаміку помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому та поточному інтервалах часу і вибирають один з сформованих законів зміни кута повороту ротора відповідно до необхідного режиму роботи асинхронного двигуна із врахуванням визначеної динаміки помилки. Визначення динаміки помилки на попередньому та поточному інтервалах часу має вигляд:

$$d_1 = \Delta\varphi_i - \Delta\varphi_{i-1},$$

$$d_2 = \Delta\varphi_{i-1} - \Delta\varphi_{i-2}.$$

У переважному варіанті здійснення заявленого способу у разі відсутності помилки відпрацювання кута повороту ротора рівномірний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \varphi_{i-1}^*,$$

у разі появи помилки відпрацювання кута повороту ротора пропорційний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \beta \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*,$$

у разі постійного значення помилки відпрацювання кута повороту ротора закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*,$$

у разі збільшення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора квадратичний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* \\ -\beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot d_1 \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* \end{cases},$$

де φ_i^* - значення кута повороту ротора за поточний інтервал часу, β - константа значення зворотного зв'язку, φ_{i-1}^* - значення кута повороту ротора за попередній інтервал часу, $\Delta\varphi_i$ - значення помилки відпрацювання кута повороту ротора за поточний інтервал часу, d_1 - динаміка помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу.

З урахуванням всіх можливих варіантів значення кута повороту ротора за поточний інтервал часу φ_i^* дорівнює:

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* & \Delta\varphi_i > 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 > d_2 \\ -\beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot d_1 \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* & \Delta\varphi_i < 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 > d_2 \\ \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* & \Delta\varphi_i \neq 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 \neq 0, d_2 \geq d_1 \\ \beta \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* & \Delta\varphi_i \neq 0, \Delta\varphi_{i-1} = 0, (d_1 = \Delta\varphi_i) \\ \varphi_{i-1}^* & \Delta\varphi_i = 0, d_1 = d_2 = 0 \end{cases}.$$

Із урахуванням сформованих та визначених законів зміни кута повороту ротора, визначеної динаміки помилки, у блоках 9 та 10 визначають моментальне значення кута повороту ротора

асинхронного двигуна $\Delta\varphi^*$, забезпечують безперервність функції вибраного закону зміни кута повороту ротора $\varphi^*(t)$ із складанням поточного значення кута повороту ротора з його значенням на попередньому інтервалі часу. Визначене моментальне значення кута повороту ротора асинхронного двигуна $\Delta\varphi^*$ направляють до блока 11, де формують сигнал моментального значення кута повороту ротора φ^*.

У блоці 12 визначають значення частоти живлення асинхронного двигуна за формулою $f = \frac{\Delta\varphi^*}{\Delta t}$. Таким чином частота живлення асинхронного двигуна може бути визначена зміною кута повороту ротора за визначений інтервал часу.

Надалі у блоці 13 визначають значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна за формулою:

$$U_m^* = k \cdot f = k\frac{\Delta\varphi^*}{\Delta t} = k\frac{\left(\varphi_i^* - \varphi_{i-1}^*\right)}{t_i},$$

де k - константа навантаження асинхронного двигуна, f - частота живлення ротора, $\Delta\varphi^*$ - моментальне значення кута повороту ротора при вибраному законі зміни кута повороту ротора, а Δt - заданий інтервал часу. Константа k визначається навантаженням асинхронного електроприводу, що в свою чергу залежить від критичного і пускового моментів і задається оператором.

При цьому у блоках 13, 14, та 15 визначають значення трьох гармонійних компонент напруги для кожної фази асинхронного двигуна. У переважному варіанті здійснення заявленого способу три гармонійні компоненти напруги визначають, розкладаючи моментальне значення кута повороту ротора у ряд Маклорена за наступними формулами:

Блок 14 - $U_A^{'} = \left(\Delta\varphi_i^* - \frac{\left(\varphi_i^*\right)^3}{3!} + \frac{\left(\varphi_i^*\right)^5}{5!} - \frac{\left(\varphi_i^*\right)^7}{7!} + \frac{\left(\varphi_i^*\right)^9}{9!}\right)$

Блок 15 - $U_B^{'} = \left(\varphi_i^* + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\left(\varphi_i^* + \frac{2\pi}{3}\right)^3}{3!} + \frac{\left(\varphi_i^* + \frac{2\pi}{3}\right)^5}{5!} - \frac{\left(\varphi_i^* + \frac{2\pi}{3}\right)^7}{7!} + \frac{\left(\varphi_i^* + \frac{2\pi}{3}\right)^9}{9!}$

Блок 16 - $U_C^{'} = \left(\varphi_i^* - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\left(\varphi_i^* - \frac{2\pi}{3}\right)^3}{3!} + \frac{\left(\varphi_i^* - \frac{2\pi}{3}\right)^5}{5!} - \frac{\left(\varphi_i^* - \frac{2\pi}{3}\right)^7}{7!} + \frac{\left(\varphi_i^* - \frac{2\pi}{3}\right)^9}{9!}$.

Далі у блоках 17, 18 та 19 визначають значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази із урахуванням отриманого значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та трьох отриманих гармонійних компонент напруги. У переважному варіанті здійснення заявленого способу значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази визначають за формулами:

$U_A^* = Um \cdot U_A^{'}$,

$U_B^* = Um \cdot U_B^{'}$,

$U_C^* = Um \cdot U_C^{'}$,

де U_A^*, U_B^*, U_C^* - значення фази напруги кожної з трьох фаз асинхронного двигуна, Um - значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, а $U_A^{'}$, $U_B^{'}$, $U_C^{'}$ - гармонійні компоненти напруги.

Після цього із урахуванням визначеного значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та кількості фаз у широтно-імпульсному модуляторі 20 формують широтно-імпульсно-модульовані сигнали, які направляють на силовий перетворювач 21.

Під силовим перетворювачем, у даному випадку, розуміють випрямляч або електричний ключ, зібраний на біполярних транзисторах з ізольованим затвором або МОП-транзисторах ("метал-оксид-напівпровідник"), який призначений для регулювання змінної електричної напруги, зазвичай синусоїдальної форми.

Надалі за допомогою силового перетворювача 21 формують керуючі сигнали і направляють їх на асинхронний двигун 22. У переважному варіанті здійснення заявленого способу керуючі сигнали формують, перетворюючи за допомогою силового перетворювача 21 широтно-імпульсно-модульовані сигнали за формою та амплітудою. У випадку використання асинхронного двигуна із рекуперацією енергії за допомогою силового перетворювача 21 задають необхідну напругу U_{ZPT} в ланці постійного струму із врахуванням визначеного значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна Um.

Таким чином, заявлений спосіб управління асинхронним двигуном дозволяє ефективно управляти асинхронним двигуном, коректно регулюючи фазу напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та кут повороту ротора, виходячи виключно з результатів операцій та розрахунків, які проводять з отриманими значеннями кута повороту ротора. При цьому безперервність виконання вказаних вище операцій забезпечує підвищену надійність та ефективність асинхронного двигуна, подовжений строк його роботи та уникнення його ушкодження, виходу з ладу або некоректної роботи, що позитивно впливає на пристрій, в якому встановлений вказаний асинхронний двигун.

В існуючих джерелах патентної та науково-технічної інформації не виявлений спосіб управління асинхронним двигуном, який має заявлену сукупність суттєвих ознак, тому представлене технічне рішення відповідає критерію "новизна".

Порівняльний аналіз вищевказаного технічного рішення з найбільш близьким аналогом, показав, що реалізація сукупності суттєвих ознак, які характеризують запропонований винахід, призводить до появи якісно нових вказаних вище технічних властивостей, сукупність яких не була встановлена раніше з існуючого рівня техніки, що дозволяє зробити висновок про відповідність запропонованого технічного рішення критерію "винахідницький рівень".

Запропоноване технічне рішення є промислово придатним, оскільки не містить у своєму складі жодних конструктивних елементів чи матеріалів, які неможливо відтворити на сучасному етапі розвитку техніки в умовах промислового виробництва.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Спосіб управління асинхронним двигуном, при якому в кожен момент часу вимірюють кут повороту ротора, визначають значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, визначають значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, формують за допомогою силового перетворювача фазу напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, який **відрізняється** тим, що задають значення кута повороту ротора для кожного моменту часу, кожне з заданих значень кута повороту ротора порівнюють з поточним виміряним у відповідний момент часу значенням цього кута, і формують сигнал помилки відпрацювання кута повороту ротора, формують пропорційний, рівномірний та квадратичний закони зміни кута повороту ротора та визначають значення помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу та поточному інтервалі часу, визначають динаміку помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому та поточному інтервалах часу і вибирають один з сформованих законів зміни кута повороту ротора відповідно до необхідного режиму роботи асинхронного двигуна із врахуванням визначеної динаміки помилки, формують сигнал моментального значення кута повороту ротора, забезпечують безперервність функції вибраного закону зміни кута повороту ротора із складанням поточного значення кута повороту ротора з його значенням на попередньому інтервалі часу, після чого визначають значення частоти живлення асинхронного двигуна та значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна за формулою:

$$U_m = k \cdot f = k \frac{\Delta\varphi^*}{\Delta t} = k \frac{\left(\varphi_i^* - \varphi_{i-1}^*\right)}{t_i},$$

де k - константа навантаження асинхронного двигуна, f - частота живлення ротора, $\Delta\varphi^*$ - моментальне значення кута повороту ротора при вибраному законі зміни кута повороту ротора, а Δt - заданий інтервал часу,

а також визначають значення трьох гармонійних компонент напруги для кожної фази асинхронного двигуна, після чого визначають значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази із урахуванням отриманого значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна та трьох отриманих гармонійних компонент напруги, після чого із урахуванням визначеного значення фази напруги живлення

обмоток статора асинхронного двигуна та кількості фаз формують широтно-імпульсно-модульовані сигнали та направляють їх на силовий перетворювач, за допомогою якого формують керуючі сигнали і направляють на асинхронний двигун.

2. Спосіб управління асинхронним двигуном за п. 1, який **відрізняється** тим, що керуючі сигнали формують, перетворюючи за допомогою силового перетворювача широтно-імпульсно-модульовані сигнали за формою та амплітудою.

3. Спосіб управління асинхронним двигуном за п. 1, який **відрізняється** тим, що у разі відсутності помилки відпрацювання кута повороту ротора рівномірний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \varphi_{i-1}^*,$$

у разі появи помилки відпрацювання кута повороту ротора пропорційний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \beta \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*,$$

у разі постійного значення помилки відпрацювання кута повороту ротора закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i^* = \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*,$$

у разі збільшення значення помилки відпрацювання кута повороту ротора квадратичний закон зміни кута повороту ротора визначають за формулою:

$$\varphi_i = \begin{cases} \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot d_1 \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* \\ -\beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot d_1 \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^* \end{cases},$$

де φ_i^* - значення кута повороту ротора за поточний інтервал часу, β - константа значення зворотного зв'язку, φ_{i-1}^* - значення кута повороту ротора за попередній інтервал часу, $\Delta\varphi_i$ - значення помилки відпрацювання кута повороту ротора за поточний інтервал часу, d_1 - динаміка помилки відпрацювання кута повороту ротора на попередньому інтервалі часу.

4. Спосіб управління асинхронним двигуном за п. 1, який **відрізняється** тим, що три гармонійні компоненти напруги визначають, розкладаючи моментальне значення кута повороту ротора у ряд Маклорена.

5. Спосіб управління асинхронним двигуном за п. 1, який **відрізняється** тим, що значення фази напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна для кожної фази визначають за формулами:

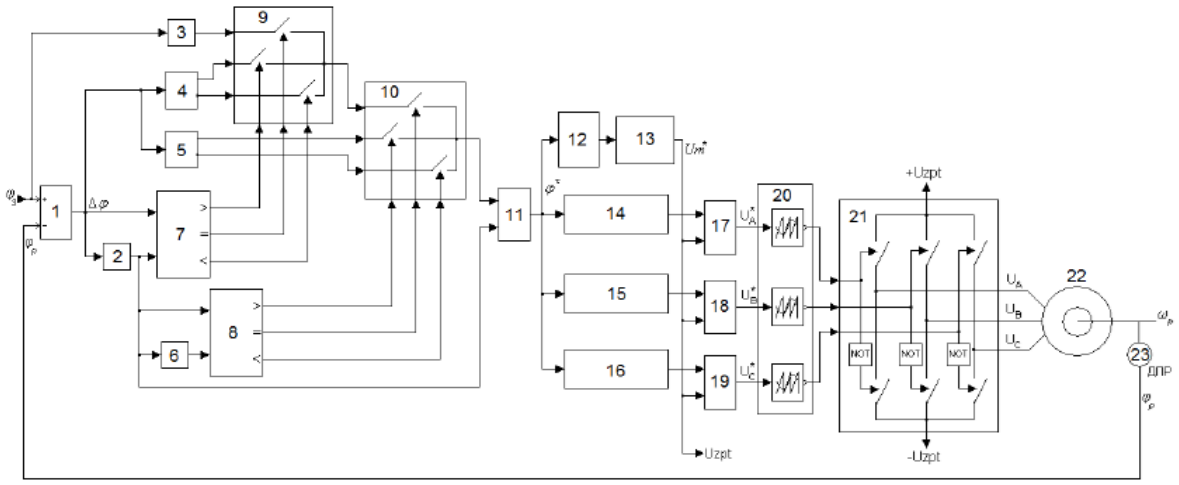
$$U_A^* = Um \cdot U_A^{'},$$

$$U_B^* = Um \cdot U_B^{'},$$

$$U_C^* = Um \cdot U_C^{'},$$

де U_A^*, U_B^*, U_C^* - значення фази напруги кожної з трьох фаз асинхронного двигуна, Um - значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна, а $U_A^{'}$, $U_B^{'}$, $U_C^{'}$ - гармонійні компоненти напруги.

6. Спосіб управління асинхронним двигуном за п. 1, який **відрізняється** тим, що при використанні асинхронного двигуна із рекуперацією енергії задають необхідну напругу U_{ZPT}^* в ланці постійного струму із врахуванням визначеного значення амплітуди напруги живлення обмоток статора асинхронного двигуна Um.



Фіг. 1

Комп'ютерна верстка І. Скворцова

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601