



УКРАЇНА

(19) UA (11) 57106 (13) U
(51) МПК
H02M 3/337 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЗОНАНСНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

1

2

(21) u201009051

(22) 19.07.2010

(24) 10.02.2011

(46) 10.02.2011, Бюл. № 3, 2011 р.

(72) ПАВЛОВ ГЕННАДІЙ ВІКТОРОВИЧ, ОБРУБОВ
АНДРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ, ПОКРОВСЬКИЙ МИХАЙ-
ЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ, НІКІТІНА ОЛЕНА ВОЛО-
ДИМИРІВНА, ЩЕРБІНІН ТИМОФІЙ ВОЛОДИМИ-
РОВИЧ

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕ-
БУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

(57) Система керування резонансним перетворю-
вачем постійної напруги на основі нечіткої логіки,

що містить блок оцінки похибки та її першої похід-
ної, нечіткий ПД-регулятор, ШІМ-контролер та су-
матор-накопичувач, з'єднані послідовно, яка **відрі-
зняється** тим, що до виходу ШІМ-контролера
послідовно підключено схему сполучення з сило-
вою частиною із двох ТТ-тригерів, до виходів яких
послідовно підключено схему з елементів логічної
інверсії та кон'юнкції, причому елемент інверсії
підключено послідовно до виходу другого ТТ-
тригера, перший елемент кон'юнкції підключено до
виходів першого та другого ТТ-тригерів, а другий
елемент кон'юнкції підключено до виходів першого
ТТ-тригера та елемента інверсії.

Корисна модель належить до перетворюваль-
ної техніки в галузі електрообладнання, зокрема
до систем керування резонансними перетворюва-
чами постійної напруги, та може бути застосована
для регулювання вихідних параметрів резонанс-
них перетворювачів у різноманітних перетворюва-
льних системах.

Відомо про систему керування резонансним
перетворювачем (РП) [Патент на корисну модель
UA №45315 H02M 3/22, бюл. №21, 10.11.2009].
Описана система містить мікроконтролер, пристрій
синхронізації керування з переходом резонансного
струму через нуль та піковий детектор для відслід-
ковування перевищень резонансним струмом при-
пустимої амплітуди. Регулювання вихідної вели-
чини здійснюється за релейним принципом
шляхом відключення контуру та навантаження від
джерела живлення при перевищенні вихідною на-
пругою значення уставки. Таке регулювання доці-
льне при використанні ємнісного вихідного фільт-
ра, оскільки в такому випадку перетворювач має
властивості аперіодичної ланки. Вихідна напруга
РП із ємнісним фільтром характеризується пуль-
саціями на частоті, рівній до резонансної частоти
контуру або комутаційної частоти перетворювача,
що усувається за допомогою індуктивно-ємнісного
фільтра. Однак регулювання РП із індуктивно-
ємнісним фільтром за пороговим принципом приз-

водить до суттєвої коливальності перехідного про-
цесу.

Найбільш близькою до запропонованого техні-
чного рішення є система керування імпульсним
перетворювачем постійної напруги із регулятором
на основі нечіткої логіки [Денисов, Ю.А. Импульс-
ные системы стабилизации постоянного напряже-
ния с нечеткими и адаптивными регуляторами /
Ю.А. Денисов, А. Иванец // Электричество, - 2007.
- №7. 35-39]. Описана система містить блок оцінки
величини похибки та її першої похідної, нечіткий
ПД-регулятор, суматор-накопичувач та широтно-
імпульсний модулятор. За рахунок використання
нечіткого регулятора досягаються нульові перере-
гулювання та статична похибка перетворювача.
Дана система може бути успішно модифікована
для керування резонансним перетворювачем пос-
тійної напруги із повно мостовим інвертором, а
тому вона була обрана як прототип.

В основу корисної моделі поставлено задачу
модифікації системи керування імпульсним перет-
ворювачем постійної напруги, яка шляхом підклю-
чення до виходу широтно-імпульсного модулятора
додаткової схеми з двох ТТ-тригерів та елементів
логічної інверсії та кон'юнкції може бути застосо-
вана для керування резонансним перетворювачем
постійної напруги з індуктивно-ємнісним фільтром,
що дозволить забезпечити нульові перерегулю-
вання, коливальність та статичну похибку перет-

UA (11) 57106 (13) U

ворювача, що дасть можливість застосовувати його у прецизійних системах.

Поставлена задача вирішується тим, що у системі керування імпульсним перетворювачем постійної напруги, яка містить блок оцінки величини похибки та її першої похідної, нечіткий ПД-регулятор, суматор-накопичувач та широтно-імпульсний модулятор, з'єднані послідовно, згідно з пропозицією, до виходу широтно-імпульсного модулятора послідовно підключено додаткову схему з двох ТТ-тригерів та елементів логічної інверсії й кон'юнкції, причому елемент інверсії підключено послідовно до виходу другого ТТ-тригера, перший елемент кон'юнкції підключений до виходів першого та другого ТТ-тригерів, другий елемент кон'юнкції підключений до виходів першого ТТ-тригера та елемента інверсії.

Введення додаткової схеми дозволяє застосувати модифіковану систему для керування РП постійної напруги. Синхронізація ТТ-тригерів при цьому має відбуватись в моменти переходу резонансного струму через нуль, що забезпечить оптимальні умови комутації силових ключів (перемикання в нулі струму). Сигнал від нечіткого регулятора в даному випадку буде інтерпретуватись як відношення кількості півхвиль резонансного струму під час фази перетворення F_r до максимальної фіксованої кількості півхвиль за період перетворення. Сигнал високого рівня на виході

широтно-імпульсного модулятора буде означати дозвіл фази прямої передачі енергії F_r , сигнал низького рівня - дозвіл фази розсіювання енергії D_s . При реалізації нечіткого ПД-регулятора зручно використовувати алгоритм нечіткого виведення Сугено нульового порядку [Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control // IEEE Trans, on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 15, №1. - 1985. - P.116-132]. При цьому входні терми та їх функції належності визначаються, виходячи з даних про зміну похибки та її похідної під час перехідного процесу розімкненої системи (без зворотного зв'язку за напругою) при відпрацюванні максимальної уставки, функції належності вихідних термів, згідно алгоритму Сугено нульового порядку, імпульсні. Для усунення блока суматора-накопичувача, а також з метою збереження високих показників якості керування в усьому діапазоні регулювання за умов змін напруги живлення, значення функцій належності вихідних термів встановлюються як функції від напруги живлення та уставки:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = \frac{u_{yc}}{2u_{\Pi}}; \quad C_3 = \frac{u_{yc}}{u_{\Pi}}; \quad C_4 = \frac{1}{2} + \frac{u_{yc}}{2u_{\Pi}};$$

$$C_5 = 1.$$

База правил нечіткого регулятора подана у таблиці 1:

Таблиця 1

		$\Delta \epsilon$				
		NB	N	Z	P	PB
ϵ	NB	C_1	C_1	C_1	C_1	C_2
	N	C_1	C_2	C_3	C_3	C_4
	Z	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
	P	C_2	C_3	C_3	C_4	C_5
	PB	C_4	C_5	C_5	C_5	C_5

де ϵ - нечіткі терми похибки, $\Delta \epsilon$ - нечіткі терми першої похідної похибки, NB - велике від'ємне значення, N - від'ємне значення, Z - близьке до нуля значення; P - додатне значення, PB - велике додатне значення. Вигляд функцій належності нечітких термів похибки та її першої похідної наведено на Фіг.3. Застосування нечіткого регулятора в системі керування РП забезпечує нульові перерегулювання, коливальність та статичну похибку, що дає можливість використовувати перетворювач у прецизійних системах.

На Фіг.1 подано блок-схему перетворювальної системи на основі послідовно-резонансного перетворювача (ПРП) постійної напруги із системою керування на основі нечіткої логіки, на Фіг.2 - принципову електричну схему системи керування, на Фіг.3 подано функції належності входних термів нечіткого регулятора, на Фіг.4 - осцилограми резонансного струму та керуючої напруги для тринадцяти застосувань першого елементарного алгоритму комутації (n_{Fr}) за період перетворення (режим неперервних струмів), на Фіг.5 - осцилограми резонансного струму та керуючої напруги для дев'яти застосувань першого елементарного алгоритму комутації (n_{Fr}) за період перетворення

(режим уривчастих струмів), на Фіг.6 - перехідний процес для напруги на навантаженні РП з нечітким регулятором.

ПРП із релейним способом регулювання вихідних параметрів у загальному вигляді (Фіг.1) може бути поданий як сукупність силової частини (СЧ) 1 та системи керування (СУ) 2. Силова частина ПРП містить джерело ЕРС 3, підключене до керованого транзисторного моста інвертора 4, резонансного контуру, сформованого послідовним з'єднанням резонансної індуктивності 5 та резонансної ємності 6 з включеним послідовно датчиком резонансного струму (ДС) 7, підключеного послідовно до транзисторного моста 4 та діодного моста випрямляча 8, фільтруючої ємності 9, фільтруючої індуктивності 10 та навантаження 11, з'єднаних послідовно-паралельно, датчика напруги на навантаженні (ДН) 12. СУ 2 містить блок оцінки похибки та її першої похідної 13, нечіткий регулятор 14, ШИМ-контролер 15, пристрій сполучення з СЧ (ПС) із ТТ-тригерами та додатковою логічною схемою 16, блок, що містить піковий детектор (ПД) та детектор переходу резонансного струму через нуль (НД) 17. Принципова електрична схема блоків 14, 15 та 16 подана на Фіг.2. Вона містить мікроконт-

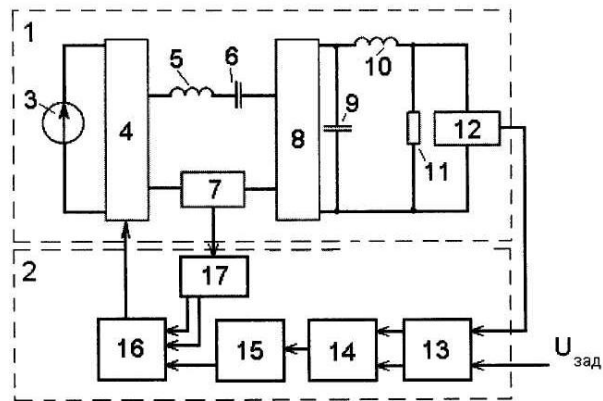
ролер 18, ТТ-тригер 19, підключений входом даних D послідовно до виходу PC0 мікроконтролера 18, другий ТТ-тригер 20, стартовий одинівбратор 21, підключений входом дозволу роботи В до виходу PC2 мікроконтролера 19, логічний елемент інверсії 22, підключений послідовно до виходу ТТ-тригера 20, двовходовий логічний елемент «ТА» 23, підключений послідовно до виходів ТТ-тригерів 19 та 20, двовходовий логічний елемент «ТА» 24, підключений послідовно до виходів ТТ-тригера 19 та елемента інверсії 22, двовходовий логічний елемент «виключне АБО» 25, підключений послідовно до виходів НД (блок 17 на Фіг.1) та стартового одинівбратора 21, спеціалізовані драйвери силових ключів мосту інвертора 26 та 27 підключені входами синхронізації IN до виходів логічних елементів «ТА» 23 та 24 відповідно.

Для експериментального пристрою обрано мікроконтролер AT32UC3A1128 сімейства AVR32 фірми Atmel, який поєднує функції нечіткого регулятора та ШИМ-контролера, в пристрої синхронізації використано 2 ТТ-тригери типу SN74L126 та логічні елементи типу ACH1G фірми Texas Instruments, ПД та НД виконані на компараторах LM 361 фірми National Semiconductor, блок оцінки похибки та її першої похідної виконаний на операційних підсилювачах OPA454 фірми Texas Instruments, в мостах застосовані силові IGBT-транзистори типу IRG4BC30UD фірми International Rectifier із зворотними діодами та драйверами в інтегральному виконанні, силові діоди КД29981 (Росія), резонансна ємність набрана з силових конденсаторів КВИ-3 (ООО "ЗВЭК "Прогресс").

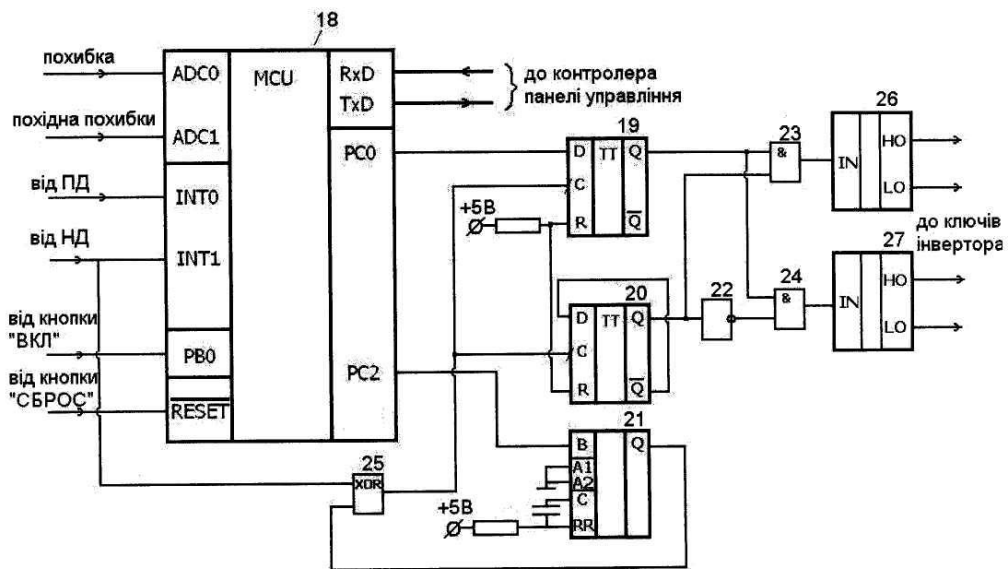
Під час роботи силової частини 1 перетворювача постійну напругу, яка подається від джерела 3, інвертують на транзисторному мості 4 із підключеним резонансним контуром, утвореним послідовним з'єднанням резонансної індуктивності 5 та резонансної ємності 6, потім випрямляють на діодному мості 8 та згладжують на фільтруючій ємності 9 та фільтруючій індуктивності 10. Згладжену напругу подають на навантаження 11. Сигнал, пропорційний до напруги на навантаженні 11, знімається з датчика 12 та подається в систему керування 2. Блок оцінки похибки, який містить аналоговий суматор та диференціатор, обчислює різницю між сигналом уставки $U_{зад}$ та сигналом від датчика напруги на навантаженні 12 та першу похідну даної різниці. Сигнали похибки та її першої різниці поступають на нечіткий ПД-регулятор 14, який випрацьовує керуючий сигнал для ШИМ-контролера 15 за алгоритмом Сугено нульового порядку згідно бази правил (табл.1) та функцій належності (Фіг.3), після чого ШИМ-контролер 15 подає сигнал дозволу прямої фази на пристрій синхронізації 16, який випрацьовує керуючі імпульси для силових ключів мосту інвертора 4 узго-джено з сигналами синхронізації та перевищення

амплітуди струму від блока 17. При реалізації функцій нечіткого регулятора 14 та ШИМ-контролера 15 на базі мікроконтролера 18, сигнали похибки та її першої похідної від блока 13 потрапляють на входи АЦП ADC0 та ADC1. За алгоритмом Сугено нульового порядку визначається шпаруватість вбудованого ШИМ, вихідний сигнал якого зберігається та подається на керуючий вивід PC0. При зовнішньому перериванні по входу INT0 (сигнал від ПД, перевищення амплітудою резонансного струму максимально припустимого значення) на виході PC0 встановлюється логічний нуль. Керуючий вивід PC2 відповідає за запуск стартового одинівбратора 21 на початку роботи перетворювача та у випадку тривалої відсутності сигналів від НД 17. Логічна одиниця на виході PC0 дозволяє перекидання ТТ-тригера 19 за кожним фронтом синхронізуючого імпульсу на вході тригера С. ТТ-тригер 20 перекидається незалежно від керуючих сигналів за фронтом синхронізуючих імпульсів. Синхронізуючі імпульси формуються за допомогою елемента «виключне АБО» 25 із вихідних сигналів стартового одинівбратора 21 та НД 17. За допомогою логічних елементів 22, 23, 24 у прямій фазі формуються протифазні меандри, які поступають на драйвери силових ключів 26 та 27. За фронтами даних меандрів здійснюється зміна стану пар транзисторів в мості інвертора 4, яка у фазах прямої передачі енергії та розсіювання призводить до роботи мосту інвертора 4 в режимі інвертування або замикання резонансного контуру відповідно. Експериментальний зразок системи керування, побудований на основі мікроконтролера AT32UC3A1128 сімейства AVR32, дозволив виконувати комутацію ключів з частотою до 100 кГц. На Фіг.4 та Фіг.5 подано експериментальні осцилограми, отримані при наступних параметрах: часова шкала - 20 мкс/поділ., резонансний струм - 5 А/поділ., керуюча напруга - 2,5 В/поділ., загальна кількість півперіодів резонансних коливань за період перетворення - $n=18$. На Фіг.6 подано графік перехідного процесу для РП з нечітким регулятором, який показує нульове перерегулювання, коливальність та статичну похибку перетворювача. Дослідження проводилось для значень уставки 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.95 від напруги живлення за змін напруги живлення в діапазоні 25...175 В.

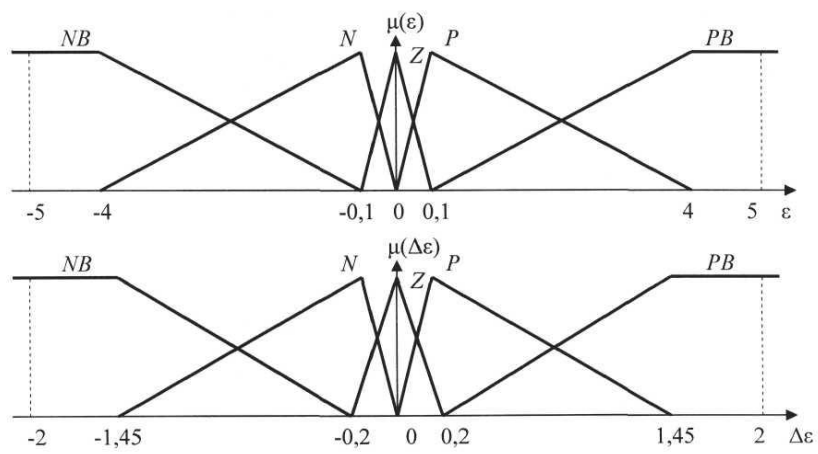
Таким чином, застосування модифікованої за допомогою додаткових логічних елементів системи керування імпульсним перетворювачем постійної напруги на основі нечіткої логіки для регулювання вихідних параметрів РП постійної напруги, реалізованої на базі мікроконтролера, дозволяє забезпечити нульові перерегулювання, коливальність та статичну похибку перетворювача в усьому діапазоні регулювання, що дозволяє використовувати РП в прецизійних системах таких, як сервоприводи маніпуляційних робіт.



Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3

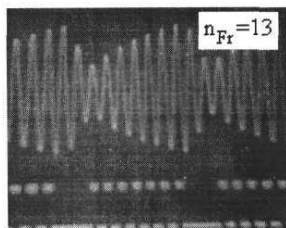


Fig.4

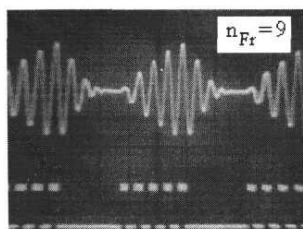


Fig.5

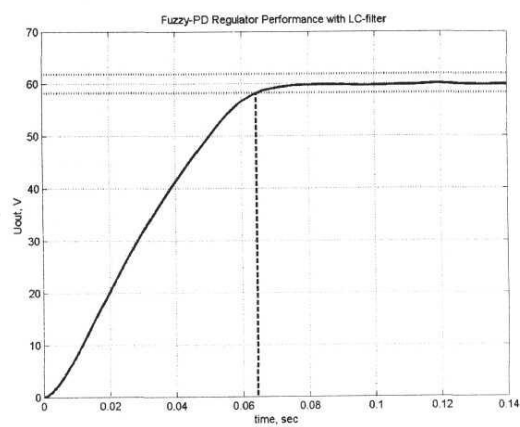


Fig.6