

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій та інформаційно-комунікаційних систем

## **АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**

### **Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ГЮІК.ХХХХХХ.005ПЗ

Аналіз характеристик джерел електроживлення з цифровим керуванням  
(тема)

Виконала:

Студентка ІІ курсу, групи РПСКМ-18-1

Запісочна Валентина Ігорівна.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність

172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси

(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Зарудний О. А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

Цопа О.І.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2019 р.

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування.

Студент

В.І. Запісочна

Керівник

О. А. Зарудний

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Записочній Валентині Ігорівні \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз характеристик джерел електроживлення з цифровим керуванням

---

---

затверджена наказом по університету від 21 листопада 2019 р. № 1729 СТ

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

3. Вихідні дані до роботи Література за темою атестаційної магістерської роботи

---

---

---

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Огляд літературних джерел за темою дослідження, особливості побудови цифрових джерел електроживлення, структура та елементна база джерел живлення з цифровим керуванням

---

---

---

---

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п. 5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)  
Слайди презентації

---



---



---



---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	Зарудний О. А.		

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	21.11-23.11	Виконано
2	Огляд літературних джерел за темою дослідження	31.11-2.12	Виконано
3	Особливості побудови цифрових джерел електроживлення	3.12-4.12	Виконано
4	Структура та елементна база джерел живлення з цифровим керуванням	5.12-6.12	Виконано
5	Висновки	7.12	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки та виготовлення слайдів презентації	12.12.2019	Виконано

Дата видачі завдання 05 жовтня 2019р.

Студент \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
 (підпис) \_\_\_\_\_  
 (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської атестаційної роботи: 86 с., 16 рис., 1 табл., 37 джерел.

ІМПУЛЬСНІ ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, ЦИФРОВІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ

У роботі розглянуті характеристики цифрових джерел живлення. Проведено порівнювальний аналіз аналогового керування та цифрового. Розглянуті причини масового впровадження джерел живлення в енергоємних додатках. Описані структура та елементна база джерел живлення.

## **ABSTRACT**

Explanatory note of the master's appraisal work: 86 village, 16 fig., 1 table., 37 Sources.

**PULSE SECONDARY POWER SUPPLIES, DIGITAL POWER SUPPLIES, PULSE WIDTH MODULATION, DIGITAL DEVICES**

The characteristics of digital power supplies are considered in the paper. Comparative analysis of analog control and digital is performed. The reasons of mass introduction of power sources in energy intensive applications are considered. The structure and element base of the power sources are described.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	7
ВСТУП	8
1 Огляд літературних джерел за темою дослідження	12
1.1 Загальні принципи побудови цифрових джерел живлення	12
1.2 Історія розвитку цифрових джерел живлення	17
1.3 Виправдання сподівань джерел живлення з цифровим керуванням	22
1.3.1 Оптимізація ефективності	26
1.3.2 Управління живленням	27
1.3.3 М'який старт і управління послідовністю	29
1.3.4 Бланкування переднього фронту	30
1.3.5 Адаптивне і нелінійне управління	31
1.4 Особливості побудови та застосування цифрових ДЕЖ	32
1.4.1 Особливості побудови ланцюга зворотного зв'язку	32
1.4.2 Застосування цифрових способів обробки сигналу в контурі управління	33
1.4.3 Надійність цифрових ДЕЖ	33
1.4.4 Вартість цифрових ДЕЖ	34
1.4.5 Енергоефективність цифрових ДЕЖ	35
1.4.6 Вплив затримки цифрових контролерів на перехідну характеристику	36
1.4.7 Проблема відсутності навантажувального струму	36
1.4.8 Складність проектування цифрових ДЕЖ	37
1.4.9 Область застосування цифрових ДЕЖ	38
1.4.10 Застосування програмно-керованих функцій в ДЕЖ	39
2 Особливості побудови цифрових джерел електроживлення	40
2.1 Джерела живлення AC / DC серії NV Power з цифровим керуванням	42
2.2 Серія EFE джерел живлення AC / DC з цифровим контуром керування	46
3 Структура та елементна база джерел живлення з цифровим керуванням	54
3.1 Сімейство мікроконтролерів C2000	58
3.1.1 32-розрядні мікроконтролери Piccolo	58
3.1.2 Мікроконтролери Concerto	59
3.2 Основні топології побудови AC/DC та DC/DC перетворювачів	60
3.3 Вибір контролера для цифрового керування ІДВЕЖ	61

3.4 Периферійні модулі мікроконтролерів C2000, використовувани для створення ІП з ЦУ	62
3.4.1 Аналого-цифровий перетворювач (ADC) контролерів Piccolo	62
3.4.2 Широтно імпульсні модулятори ePWM і HRPWM	64
3.4.3 Програма оптимізації масштабних коефіцієнтів (SFO) для MER	67
3.4.4 Технологія Trip-Zone	69
3.4.5 Акселератор законів управління (CLA)	70
3.4.6 Модуль VCU	70
3.5 TI controlSUITE	71
ВИСНОВКИ	73
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	74
ДОДАТОК А	78
ДОДАТОК Б	85

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ККД – коефіцієнт корисної дії

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ДБЖ – двополярний блок живлення

ЧІМ – частотно-імпульсна модуляція

ДЕЖ – джерело живлення

ПЗ – програмне забезпечення

ККП – коректор коефіцієнта потужності

ІДВЕЖ – імпульсні джерела вторинного електроживлення

ЦП – цифрові пристрої

## ВСТУП

Останнім часом дуже активно рекламуються методи цифрового управління живленням (Digital Power) – напряду, який дуже повільно розвивався протягом останніх десятиліть. І тепер, коли деякі з цих розробок фактично вимирають, настав час визначитися, де цифрові методи можуть застосовуватися, як вони працюють, які їхні недоліки і переваги.

Виробники дають різні визначення цифрових методів управління живленням. Деякі пропонують розглядати їх як аналогові замкнуті ШІМ–регулятори, оточені цифровими ланцюгами. Інші вважають, що це кінцеві автомати з вбудованим чіпом цифрового ШІМ-регулятора. Є ще одне твердження: цифрові методи включають цифровий сигнальний процесор (DSP) загального призначення, що працює за алгоритмом, близькому до роботи регуляторів з петлею зворотного зв'язку.

Цифрове управління живленням, за термінологією, прийнятою в останньому десятилітті, складається з цифрового замкнутого ШІМ–регулятора або з кінцевим автоматом, або з DSP. Одна лише наявність послідовної цифрової шини в аналоговому ШІМ-регуляторі не дає можливості називати цей пристрій цифровим.

Цифрові контролери утримують вихідну напругу в допустимому діапазоні, що забезпечує коректне функціонування системи протягом усього терміну служби. Для цього в тестовому режимі проводиться зміна вихідної напруги блоку живлення в усьому робочому діапазоні значень. Наприклад, Infineon's Primarion group розробила чіп PX7510, що виконує операцію відстеження вихідного сигналу (margining) та інші функції за допомогою шини PMBus.

Просування цифрових методів управління живленням почалося з появою нечіткої логіки (fuzzy logic). Тоді думали, що вона дозволить відмовитися від застосування аналогових регуляторів. Але виявилось, що це вірно лише в

декількох додатках, і навіть в них практично всі завдання можна вирішити за допомогою аналогового ПД–регулятора.

Розробники цифрових контролерів заявляють про незвичайні можливості нелінійних контурів регулювання, стверджуючи, що такі контури дозволяють відмовитися від необхідності включення аналізатора ланцюгів. Однак нелінійні цифрові контури не забезпечують отримання необхідних АЧХ і ФЧХ. Тому виробники пропонують розробникам оцінювати стабільність схеми в тимчасовій області, для чого їм доводиться включати параметри перехідних процесів в розрахунки контуру регулювання, домагаючись при цьому того, щоб паразитні коливання згасали в прийнятному тимчасовому інтервалі. Однак досвідчені розробники регуляторів уникають застосовувати нелінійний регулювання, вважаючи за краще використовувати звичні ланцюги.

Виробники заявляють, що цифрові контролери більш ефективні в порівнянні з аналоговими варіантами, але і це твердження не витримало перевірки. Тільки в багато фазному режимі здатність цифрових контролерів до відключення фаз призводить до збільшення ефективності. Такий підхід забезпечує отримання хорошої ефективності при малих навантаженнях, однак цифровий ШІМ–контур регулювання не бере ніякої участі в цьому процесі. Будь-який аналоговий чіп здатний виконувати цю функцію. Основні джерела втрат в імпульсних блоках живлення: магнітні втрати, комутаційні втрати і втрати в мідних провідниках. Застосування цифрових контролерів ніяк не може їх знизити.

Існує ще одне твердження, що цифрові чіпи забезпечують краще управління часом запізнювання регулятора. Іншими словами, вони можуть виконувати синхронне перемикавання силових транзисторів, що призводить до відсутності наскрізних струмів. Однак Linear Technology має патент на аналоговий метод, що забезпечує відсутність наскрізних струмів.

В реальності не має значення, який контур регулювання у чіпа: аналоговий або цифровий. Користувачам варто турбуватися тільки про те, яка ціна компромісу при виборі цифрового регулювання. Наприклад, цифрові контролери споживають більший струм в стані спокою. Хоча DSP Texas Instruments відрізняються високим ККД та хорошою швидкодією, вони споживають більше енергії, ніж чіпи кінцевих автоматів, і набагато більше, ніж аналогові чіпи. ШІМ-контролер, який працює в дискретному режимі, завжди в стані спокою споживає більше струму, ніж малопотужний аналоговий побратим. З цієї причини Summit Microelectronics і інші компанії стали випускати аналогові блоки з цифровим управлінням. Такий підхід застосовується в портативній електроніці, де аналогові ШІМ-регулятори оточуються цифровими ланцюгами управління і комунікацій. Цей метод використовують в пристроях, що працюють від акумуляторів, оскільки в таких пристроях можна застосувати швидкодіючі АЦП / ЦАП і DSP, які споживають міліампер в стані спокою.

Цифрові методи підходять для додатків, що вимагають покрокової компенсації, а й тут багато хто воліє застосовувати прості і надійні аналогові схеми, що забезпечують адекватну компенсацію в більшості випадків.

Таким чином, цифрові методи управління живленням актуальні тільки для деяких додатків, а в інших їх застосування безглуздо. Це не має нікого значення для схемотехніки, яким все одно, як виробники напівпровідникових чіпів будуть вирішувати свої проблеми. Розробників систем хвилює тільки працездатність чіпа і виконання ним заданих функцій. Для схемотехніки важливі: ціна, надійність і перелік технічних характеристик. Нехай професори і розробники мікросхем сперечаються про переваги і недоліки аналогових і цифрових контролерів. Користувачам потрібні чіпи, здатні виконувати функції, необхідні для вирішення реальних завдань. Якщо цього немає, то немає сенсу переплачувати за цифрові контролери, навіть якщо сказано, що вони нові і вдосконалені.

Метою магістерської роботи є проведення аналізу особливостей застосування і перспектив розвитку джерел електроживлення з цифровим керуванням.

У зв'язку з цим вирішувались наступні завдання:

- огляд характеристик та загальних принципів побудови цифрових джерел електроживлення;

- аналіз структури та елементної бази сучасних джерел електроживлення з імпульсним керуванням.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Загальні принципи побудови цифрових джерел живлення

Джерело живлення або перетворювач забезпечує стабільну вихідну напругу незалежно від змін в навантаженні або у вхідній напрузі. Для цього необхідна система управління з замкнутим контуром зворотного зв'язку, яка буде вимірювати поточну вхідну напругу та порівнювати його з опорною напругою тим самим формуючи коригувальні сигнали у відповідності з отриманою неузгодженістю для досягнення необхідної стабільної вихідної напруги.

Причинами масового впровадження цифрових джерел живлення в енергоємних додатках є:

- висока ефективність, яка дозволяє знизити експлуатаційні витрати, зменшити кількість тепла, що розсіюється, полегшити виконання нормативних вимог, пов'язаних з охороною навколишнього середовища;
- здатність відповідати самим складним технічним вимогам, що пред'являються сучасними процесорами і ПЛІС;
- гнучкість, що дозволяє виконувати динамічні зміни в процесі роботи;
- можливість відпрацювання складних алгоритмів включення живлення, що особливо важливо при одночасному перебуванні на загальній шині безлічі пристроїв, наприклад, в PoL-системах.

Описаний вище підхід використовують у всіх традиційних імпульсних джерелах живлення (рис. 1.1). Альтернативою для імпульсних перетворювачів можуть бути лінійні стабілізатори, але вони використовуються тільки при відносно малих значеннях вхідної потужності. Також є безліч різноманітних топологій імпульсних регуляторів які мають довгий список додаткових поліпшень і функцій, що в свою чергу дозволяє підвищити ефективність роботи у всьому

діапазоні навантажень, забезпечити необхідну стабільність і збільшити продуктивність.

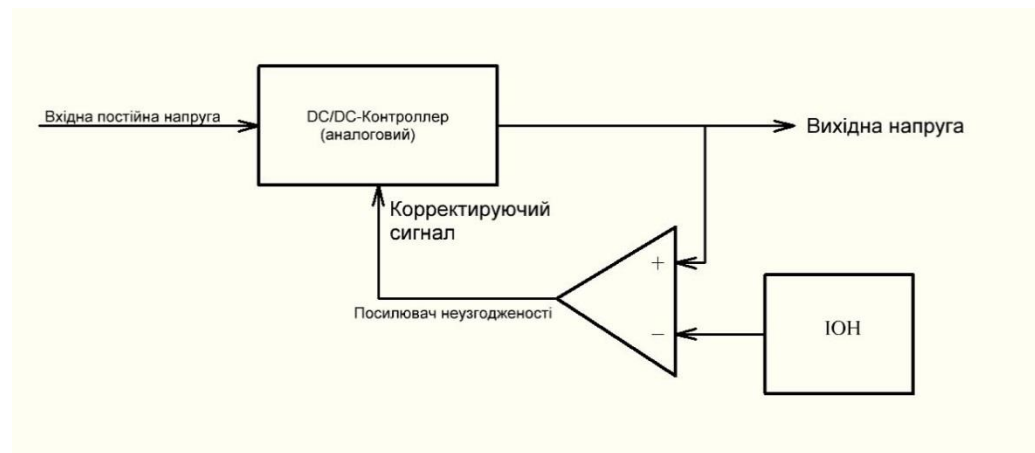


Рисунок 1.1 –Типовий аналоговий перетворювач напруги, що використовує замкнутий ланцюг зворотного зв'язку для стабілізації вихідної напруги при зміні вхідної напруги або навантаження

У всіх схожих покращень є один недолік – їм не вистачає гнучкості для налаштування робочих параметрів в реальному часі. Як приклад, стандарт Intel / Xilinx VR13 він вимагає динамічного підстроювання вихідної напруги в діапазоні 1,2 ... 0,9 В, яке виконується в реальному часі. Традиційні перетворювачі з аналоговим управлінням на це не здатні.

Таке адаптивне масштабування (adaptive voltage scaling, AVS) дозволяє вибирати напругу живлення процесора, виходячи з значень його тактової частоти і робочого навантаження, а також автоматично компенсувати температурні похибки. Для цього потрібен повністю програмований перетворювач з цифровим управлінням.

Значну частину програмованих функцій можна реалізувати за допомогою додаткового контролера, який буде виконувати конфігурування аналогової схеми відповідно до команд, які отримуються за зовнішнім комунікаційним інтерфейсом. Таке джерело живлення є гібридним і об'єднує традиційну аналогову

систему управління і цифрову надбудову у вигляді додаткового контролера (рис. 1.2).

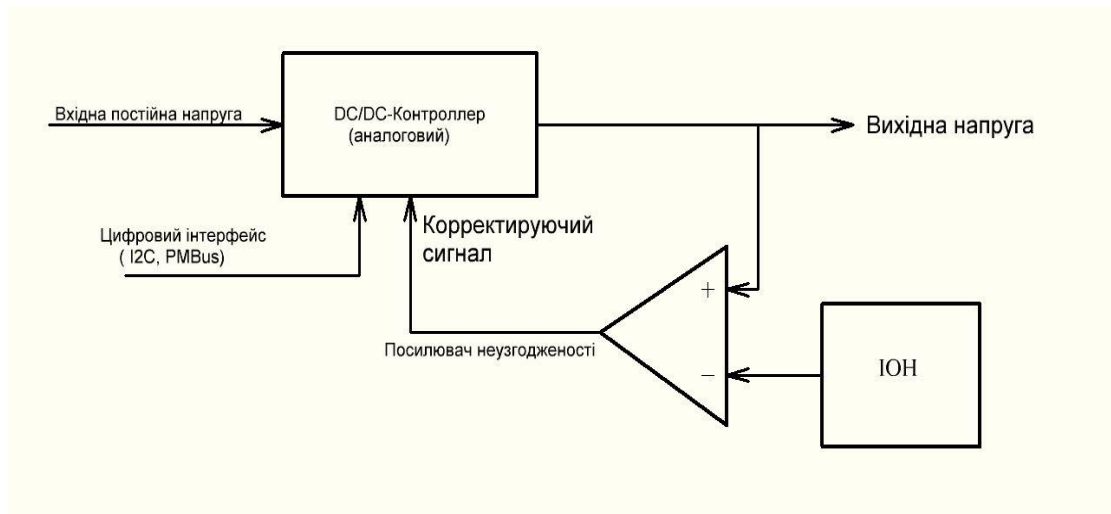


Рисунок 1.2 – Аналоговий перетворювач напруги з поліпшеною структурою використовує звичайний аналоговий ланцюг зворотного зв'язку, але дозволяє здійснювати дистанційне налаштування деяких параметрів за допомогою цифрових інтерфейсів PMBus, I<sup>2</sup>C, SPI та інших.

Повністю цифрове і програмоване джерело живлення має зовсім іншу структуру. Замість аналогового ланцюга зворотного зв'язку тут застосовується цифровий. В її основі лежить АЦП, який виконує оцифровку основних параметрів зворотного зв'язку - струмів, напруг і іншого. Отримувані цифрові дані використовуються спеціальним вбудованим процесором (DSP, FPGA), який здійснює формування сигналів управління відповідно до програмних алгоритмами. Далі цифрові сигнали перетворюються назад в аналогову форму за допомогою ЦАП і надходять в аналогову частину схеми, де використовуються для коригування струмів і напруг (рис. 1.3).

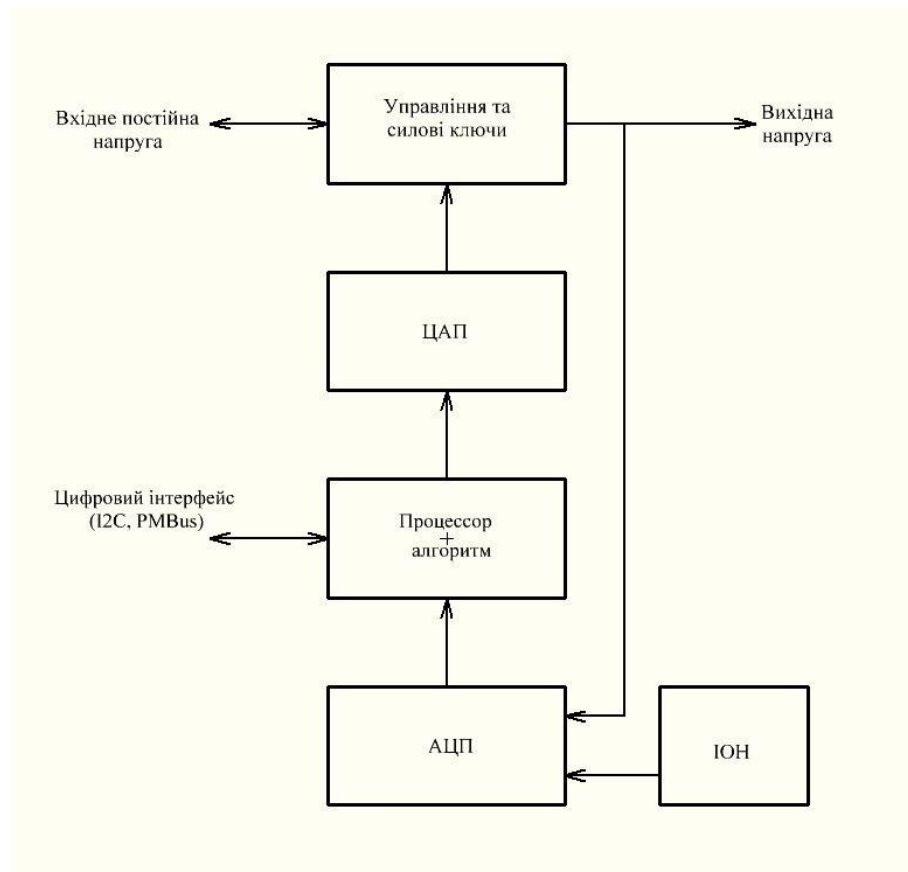


Рисунок 1.3 – Програмований перетворювач напруги з повністю цифровим керуванням виконує оцифровку ключових параметрів, а одержувані значення використовуються процесором для управління і реалізації складних алгоритмів і динамічного коригування параметрів схеми в процесі роботи

Таким чином, в повністю цифровому джерелі живлення алгоритм управління реалізований у вигляді програми, а не аналогової схеми. В результаті сам алгоритм може бути надзвичайно гнучким і складним. Крім того, один процесор, якщо він досить потужний, здатний управляти двома або більш незалежними каналами з різними рівнями струмів і напруг, а також координувати роботу цих каналів, наприклад, задаючи взаємний фазовий зсув і параметри плавного пуску. Процесор також може надавати докладні звіти та фіксувати дані в журнал подій, що в певних випадках дозволяє запобігти виникненню аварій.

Розглянемо приклад, який показує, що цифрові джерела живлення тепер можуть застосовуватися не тільки в дата-центрах, але і в менш потужних додатках. Модуль живлення NDM2Z–50 виробництва компанії CUI (рис. 1.4) являє

собою повністю цифрове джерело живлення з діапазоном вхідних напруг 4,5 ... 14 В, програмованим вихідним напругою 0,6 ... 3,3 В і струмовим навантаженням до 50 А (пікова вихідна потужність - 165 Вт).

Для управління NDM2Z-50 використовується інтерфейс SMBus, сумісний з PMBus. Незважаючи на компактні габарити модуля (30,85 x 20,0 x 8,2 мм для версії з горизонтальним монтажем), він виконує широкий набір функцій: контроль напруги, підстроювання напруги в рамках допуску, поділ струму між модулями, моніторинг струму і температури, програмований плавний запуск / вимикання та інші.

Навіть самі передові і досконалі аналогові джерела живлення не завжди здатні відповідати вимогам деяких сучасних додатків. Водночас повністю цифрові джерела живлення забезпечують цілий ряд важливих переваг завдяки своїй гнучкості, продуктивності і адаптивності. Структура цифрових перетворювачів принципово відрізняється від рішень, що застосовуються в традиційних аналогових регуляторах напруги. При цьому на ринку вже присутні досить досконалі цифрові модулі живлення, спектр додатків для яких постійно розширюється.

В таблиці 1 наведенні порівнювальні характеристики цифрових та аналогових джерел живлення.

Таблиця 1 – Порівнювальні характеристики цифрових та аналогових джерел живлення

Властивості	Аналогове керування	Цифрове керування
+	<p>Безперервна робота (нескінченна частота дискретизації).</p> <p>Простіше розуміння / використання.</p> <p>Низька споживана потужність.</p> <p>Доступні однокристальних рішення (інтегрований драйвер).</p> <p>Історично більш низька вартість.</p>	<p>Стійкий до впливу зовнішнього середовища (температура, дрейф, перешкоди і т. Д.).</p> <p>Графічний користувальницький інтерфейс (GUI), можливість змінити і зберегти параметри управління / більш</p> <p>гнучке рішення, можливість виконати Автокалібровка.</p> <p>Висока точність / передбачувана поведінка.</p> <p>Можливість більш просунутого управління (нелінійність, багатоканальність).</p> <p>Може відпрацьовувати безліч зворотних зв'язків і додаткових функцій.</p>
–	<p>Температурні дрейф компонентів / нестабільність.</p> <p>Технологічний розкид значень компонентів.</p> <p>«Защитий» функціонал / відсутність гнучкості.</p> <p>Обмеження класичною теорією управління.</p> <p>Велика кількість компонентів в складних системах.</p>	<p>Обмеження пропускнує спроможності (пов'язані зі швидкістю вимірювання).</p> <p>Дискретність ШІМ.</p> <p>Проблеми з уявленнями чисел (квантування, округлення і т. Д.).</p> <p>Складнощі вибору сигнального контролера (DSC) – АЦП, ШІМ (розрядність, швидкість, ціна).</p> <p>Обмеження швидкодії ЦПУ.</p> <p>Необхідність додаткового джерела живлення і інтерфейсів управління.</p>

## 1.2 Історія розвитку цифрових джерел живлення

Протягом останніх кількох років інтерес до цифрових джерел живлення зростає, і на ринку вже пропонуються серійні вироби, в основі яких лежить цифрова технологія. але якщо в окремих областях застосування, таких як ДБЖ, комп'ютери або мобільні пристрої, цифрові джерела живлення не є чимось новим, то

в інших сферах (наприклад, компоненти, монтовані на платі) впровадження даної технології ще тільки починається. в зв'язку з цим розглянемо історію цифрових джерел живлення, а конкретно - фактори, які могли б сьогодні забезпечити їм величезні переваги в масштабах електронної галузі та за її межами.

Перш ніж звертатися до сучасності, важливо згадати, з чого починалася історія створення цифрових джерел живлення і як, починаючи з ранніх досліджень, які виконали в середині 1970-х років Трей Бернс, Н. Р. Міллер та інші, цей тип джерел живлення поступово зайняв свою нішу в галузі і досяг того рівня, при якому для конструктора має сенс використовувати дану технологію.

У 1970-х роках, коли галузь переходила з лінійних джерел живлення на імпульсні, Трей Бернс вивчав застосування закону управління станами в перетворювачах і порівняв два методи реалізації - за допомогою цифрового процесора і аналогових обчислювальних мереж. Результати його роботи викладалися на різних конференціях, але точкою відліку досліджень, присвячених цифровим методам контролю і управління підвищувальними перетворювачами постійного струму, прийнято вважати конференцію PESC 1977. Серед інших на ній виступили інженери Bell Labs: Норман Річардс Міллер представив новаторський підхід до цифрового управління імпульсним стабілізатором, а Віктор Б. Борос - оригінальну послідовну цифрову реалізацію ланцюгів регулювання зі зворотним зв'язком для апаратури управління параметрами електроживлення.

Цікава історична деталь: експериментальний пристрій, побудований тоді Бернсом, представляло собою підвищувальний перетворювач, що працює на частоті перемикання 100 Гц. На перший погляд, це, звичайно, повільно, але така повільність була вимушеною, оскільки виконання цифрової програми займало до 450 мкс на одну вибірку.

У ролі цифрового контролера виступав міні-комп'ютер PDP-11/45, а підвищує перетворювач був побудований на основі котушки з розрізним П-образним

сердечником (дуже громіздким і важким) індуктивністю 10 мГн і конденсатора ємністю  $\approx 13\ 000$  мкФ.

Дослідницька група доставила пристрій до комп'ютера на візку. Що стосується PESC 1977, цікаво згадати вступну частину статті, яку представив на цій конференції Віктор Борос: «Сьогодні застосування цифрових контролерів економічно і технічно обгрунтовано. Функціонально розглянута схема управління не складніше тих, що зустрічаються в кишенькових калькуляторах, і її можна порівняти з ними за вартістю реалізації у вигляді БІС ».

Зараз цифрові технології поширені повсюдно, але не потрібно забувати, що Трей Бернс для реалізації і управління своєю моделлю використовував ЕОМ PDP-11/45, а самі передові на той момент мікропроцесори були 8-розрядними - як, наприклад, мікропроцесор 8080, створений корпорацією Intel, де тоді головним конструктором був Федеріко Феггін (рис. 1.1).

Починаючи з PESC 1977, рік за роком матеріали, які презентувалися на різних конференціях, підтверджували зростаючий інтерес наукової спільноти до застосування цифрових технологій в системах живлення.

Прогрес в дослідженнях був стрімким, хоча тільки в середині 1980-х років за підсумками величезної дослідницької роботи, яка зайняла майже десять років, стала очевидною перспектива комерційного застосування цих технологій.

Якщо прийняти PESC +1977 за точку відліку епохи досліджень в області цифрових джерел живлення, то другою віхою в історії цієї технології слід вважати 1984 та 1985 роки. В якості одного з прикладів можна привести роботу Кріса Хенце над кандидатською дисертацією для Міннесотського університету під керівництвом Неда Моуена. Кріс опублікував деякі цікаві фрагменти своєї роботи на конференції PESC, що проходила в 1985 році в Тулузі. У цій роботі Кріс використав мікропроцесор і схему з частотою перемикання, прийнятною для неізолюваного перетворювача постійного струму того часу. У своїй статті він позначив ряд проблем, в тому числі проблеми квантування і необхідність згладжування для отримання адекватного дозволу ШІМ.

Алгоритм цифрового управління, описаний в поданій на PESC 1985 статті, був реалізований апаратно на TTL – мікросхемах серії 7400 F. Збірка проводилася вручну з монтажем накруткою, а розміри контролера становили 20x20 см. Всі компоненти (здебільшого мікросхеми в 14 – або 16-контактних DIP-корпусах) встановлювалися на монтажні панелі. Тактові імпульси надходили від кварцового генератора частотою 20 МГц.

Кріс Хенце виготовив напівпромисловий варіант цифрового контролера, в якому вся логіка була реалізована на одній вентилярній матриці, а пізніше сконструював джерело живлення з вхідною напругою 270 В постійного струму, основним вихідним напругою 5 В і допоміжним вихідним напругою  $\pm 12$  В - для застосування в авіоніці.

Робота Кріса Хенце по трансформації результатів попередніх досліджень в потенційно комерційних додатках - один з численних прикладів кінця 1980-х – початку 1990-х років, коли конструктори стали всерйоз розглядати можливість використання мікропроцесора в джерелах живлення.

Це був перший з довгої серії експериментів, націлених на оптимізацію цифрового управління в джерелах живлення і розширюючи горизонт можливостей для застосування цифрової обробки сигналів.

Одночасно виробники джерел живлення для телекомунікаційної апаратури (зокрема, Ericsson Energy Systems) реалізували комунікаційні функції на базі послідовного каналу зв'язку (наприклад, шини I2C, розробленої компанією Philips), які дозволили операторам контролювати енергопостачання і керувати ним на рівні окремих майданчиків.

Починаючи з 2001 р число представлених на різних конференціях статей з демонстрацією переваг цифрового управління живленням різко зростає. А в 2006 році компанія Ericsson Power Modules почала публікувати результати своїх перспективних лабораторних досліджень, націлених на розробку майбутніх рішень для управління живленням, які дозволять знизити енергоспоживання.

Виробники напівпровідникових компонентів оголошували про створення нових продуктів, які повинні були спростити розробку цифрових схем живлення до рівня аналогових схем, і деякі з таких готових до застосування продуктів почали з'являтися на ринку. На жаль, відсутність стандартизації та поява безлічі різних комунікаційних протоколів створювало додаткові труднощі для конструкторів, які замислювалися про використання даної технології.

З 2004 р одночасно з розробкою стандарту PMBus компанії почали поступово виводити на ринок нові продукти і рішення, що полегшують перехід від аналогових технологій до цифрових.

Виробники обладнання не дуже схильні ділитися детальною інформацією про його «начинку», але відомо, що в ряді виробів які масово випускаються вже використовуються цифрові технології управління живленням. Для користувачів цієї технології її переваги очевидні: крім можливості управляти розподілом енергії в складних системах в процесі експлуатації, це також можливість профілювати вбудовану систему живлення за допомогою графічного призначеного для користувача інтерфейсу на стадії розробки, яка, на думку розробників, значно скорочує час виведення виробу на ринок.

Цифрові джерела живлення могли б стати в нагоді в багатьох сучасних інформаційно-комунікаційних системах. Прикладом системи, в якій цифрові методи управління живленням гратимуть надалі важливу роль, може служити базова станція мобільного радіозв'язку.

Енергоспоживання в системах мобільного радіозв'язку залежить головним чином від трафіку, і, поєднуючи управління трафіком і інтелектуальне управління живленням, можна буде жити тільки ту частину системи, яка необхідна в даний момент, а неактивні частини тримати в режимі очікування. Крім того, зі збільшенням трафіку контролер управління ним може включати додаткові функції.

Така підсистема може управляти кількістю працюючих підсилювачів потужності і включати або відключати їх в міру збільшення або зменшення

трафіку, а також налаштувати напругу поляризації для отримання найбільш ефективного профілю на даний момент.

На рівні апаратної шафи можна буде відключати певні плати, що виконують змішані функції, які необхідні тільки в конкретні моменти, а також налаштувати найважливіші параметри цих плат і з високою точністю контролювати їх роботу, щоб контролер управління трафіком в реальному часі повідомляв менеджера різні параметри системи.

Також важливо управляти живленням з деталізацією до декількох життєво важливих елементів, щоб скоротити фіксовану споживану потужність в робочому режимі, особливо енергоспоживання підсистем кондиціонування і вентиляції.

При реалізації цифрового управління живленням окремих плат з використанням PMBus стане простіше управляти охолодженням і вентиляцією, оптимізувати умови експлуатації в розрахунку на певні параметри трафіку і статистично профілювати необхідну потужність для передачі його наступної хвилі.

Якщо розглядати можливість застосування цієї технології з самого початку реалізації проекту, топологію того ж типу можна поширити і на інші інформаційно-комунікаційні системи (наприклад, центри обробки даних), зменшивши тим самим їх енергоспоживання і емісію парникових газів.

У світлі зростаючої в усьому світі і в інформаційно-телекомунікаційній індустрії значущості питань економії енергії та скорочення викидів парникових газів виробники джерел живлення все більше ініціюють проекти, покликані знизити несприятливий вплив на навколишнє середовище.

### 1.3 Виправдання сподівань джерел живлення з цифровим керуванням

Розглянемо на прикладі двухаскадного джерела живлення порівнючі особливості застосування аналогового і цифрового управління для імпульсних

джерел живлення. Показані переваги цифрового управління за допомогою цифрових сигнальних контролерів, які дозволяють знизити вартість системи і гнучко реалізувати широкий набір функцій управління.

Управління імпульсними джерелами живлення традиційно здійснювалося чисто аналоговими схемами. Поява недорогих високо якісних цифрових сигнальних контролерів забезпечила оптимальний спосіб реалізації переваг цифрових джерел живлення в наступних областях:

- зменшення вартості використовуваних компонентів у порівнянні з аналоговими джерелами живлення;
- гнучкість управління, в тому числі можливість управління вдосконаленими топологіями;
- реалізація додаткових функцій без підвищення вартості.

Зниження собівартості цифрових блоків живлення

На рис. 1.4 наведена блок-діаграма типового двухкаскадного аналогового АС / DC-джерела живлення. Найважливішими функціональними блоками цього джерела живлення є:

- силовий ланцюг: напівпровідникові ключі, котушки індуктивності, конденсатори і силові трансформатори;
- схеми управління силовим ключем: драйвери затвора і схеми підтримки;
- ланцюг зворотного зв'язку: датчики, підсилювачі і ланцюг резисторів;
- блок управління: спеціальні контролери для кожного силового каскаду;
- допоміжні ланцюги: спеціальний мікроконтролер і схеми підтримки для управління послідовністю підключення виходів, моніторингу та забезпечення комунікації.

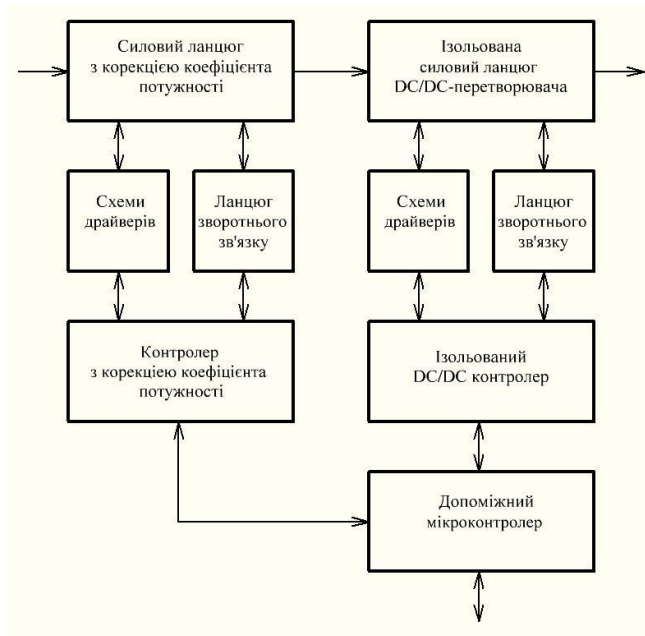


Рисунок 1.4 – Основні функціональні блоки імпульсного джерела живлення з аналоговим управлінням

З метою порівняння в даній роботі розглядається двохкаскадне джерело живлення. Вхідний перетворювач являє собою підвищувальну схему з корекцією коефіцієнта потужності, а другий каскад - це повномостовий DC / DC-перетворювач із зсувом фази.

Деякі з функціональних блоків, таких, як силовий ланцюг, драйвер і ланцюг зворотного зв'язку, по суті, ідентичні в аналоговому і цифровому джерелах живлення. На рис. 1.5 показана блок-схема відповідного цифрового джерела живлення. У цифровій версії джерела живлення функції обох спеціалізованих аналогових контролерів і допоміжного мікроконтролера можуть бути суміщені в одному цифровому сигнальному контролері dsPIC.

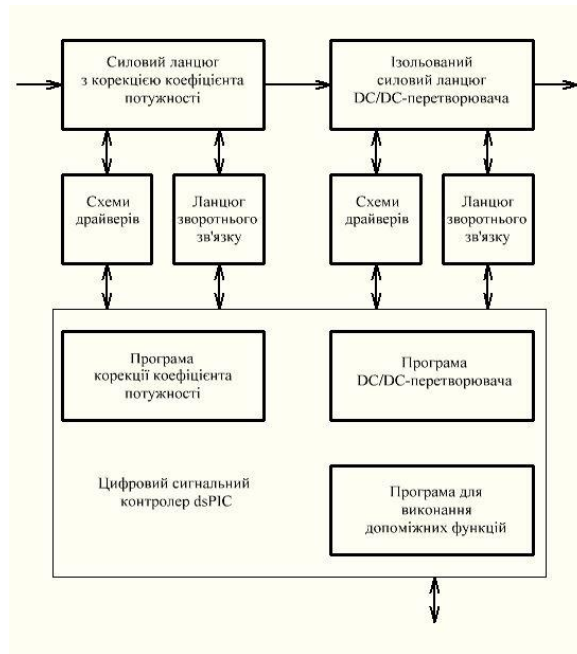


Рисунок 1.5 – У джерелі живлення з цифровим керуванням програмні засоби замінюють апаратні блоки ряду ключових функцій

Рис. 1.4 і 1.5 відображають головні відмінності даних джерел живлення на високому рівні топології, однак, слід також розглянути всі допоміжні схеми підтримки. Для кожного каскаду аналогового джерела живлення зазвичай потрібна допоміжна схема живлення, схема бланкування переднього фронту (leading-edge blanking), генератор, схема управління послідовністю, схема м'якого старту, а також схеми компенсації, з'єднані з центральним контролером. У цифровому варіанті джерела живлення все ж потрібно апаратна реалізація схеми допоміжного джерела живлення, але кожна з перерахованих вище функцій виконується програмно на центральному контролері.

В такому випадку не тільки зменшується кількість необхідних компонентів, але також істотно скорочується число провідників на друкованій платі. При виборі використовуваних компонентів слід враховувати вартість елементів цієї схеми, складність топології та розміри плати. Для деяких схем можуть (при аналоговій реалізації) знадобитися всього кілька пасивних компонентів, в той час як інші компоненти можуть мати більш високу вартість (наприклад, окремий мікроконтролер для виконання допоміжних функцій).

Існує думка, що цифрове рішення вимагає використання спеціальних драйверів затворів польових транзисторів, в той час як аналогове рішення може використовувати драйвери затвора на кристалі. Незважаючи на те, що це вірно для малопотужних схем, більшість аналогових схем великої потужності все ж вимагають використання зовнішніх драйверів затвора.

Детальне порівняння вартості використовуваних елементів показує, що загальна сума витрат на компоненти для цифрового джерела живлення буде значно нижче в порівнянні з аналогічною за параметрами аналоговою схемою. Просте підсумовування вартості компонентів — це лише частина питання: існує багато супутніх чинників економії, які визначаються тим, що цифрове джерело живлення передбачає більш просту топологію і менший розмір друкованої плати, знижену вартість виготовлення і збірки, а також поліпшену якість і надійність.

### 1.3.1 Оптимізація ефективності

Постійне вдосконалення характеристик силових транзисторів і використання нових топологій дозволили суттєво покращити ефективність джерел живлення. Однак досягнуті максимальні значення ККД найчастіше відносяться тільки до певних обумовлених заздалегідь умов експлуатації (пікова ефективність може бути визначена при половинному навантаженні або для максимальної напруги в мережі). Цифрові джерела живлення забезпечують додаткову гнучкість для оптимізації ефективності в багатьох робочих місцях.

Для підвищувального перетворювача з корекцією коефіцієнта потужності втрати на перемикання можуть бути знижені при більш високому навантаженні завдяки зниженню частоти перемикання перетворювача. При більш низькому навантаженні магнітні елементи будуть мати задовільні характеристики при більш низькій частоті перемикання. При реалізації схеми перетворювача з корекцією коефіцієнта потужності з чергуванням фаз при малому навантаженні одна фаза може бути відключена.

Аналогічно і для повномостового перетворювача із зсувом фази надмірні втрати на перемикання при малому навантаженні можна зменшити з допомогою відключення синхронних MOSFET і використовуючи замість цього внутрішнього (паразитного) діода польовий транзистор.

Інший варіант можна зустріти в додатку з понижуючим перетворювачем. Зазвичай для високих вихідних струмів кращі синхронні понижуючі перетворювачі. Однак використання синхронних MOSFET призводить до появи блукаючих струмів при низькому навантаженні, що, в свою чергу, викликає більш високі втрати. Отже, синхронний MOSFET з антипаралельним діодом в знижувальному перетворювачі можна заблокувати, коли перетворювач працює в режимі пульсуючого струму.

Такі методи дозволяють збільшити ефективність шляхом використання вдосконалених топологій, таких як резонансні і квазирезонансні перетворювачі. Цифрове управління повністю підтримує такі топології, включаючи схеми повномостового перетворювача із зсувом фази і резонансного перетворювача, і дозволяє досягти дуже високої ефективності і щільності потужності. В результаті, цифрове управління забезпечує широкі можливості для оптимізації ефективності джерел живлення в повному діапазоні умов експлуатації.

### 1.3.2 Управління живленням

У типовому аналоговому джерелі живлення функція економії енергії здійснюються за допомогою допоміжного мікроконтролера. Цей мікроконтролер передає локальні системні параметри на головний контролер або реєстратор даних: він використовує допоміжні схеми зчитування для збору необхідних даних і потім ретранслює їх. У деяких випадках віддалена система може також пересилати команди для управління роботою локальних перетворювачів жив-

лення. Ця конфігурація вимагає додаткових апаратних інтерфейсів між допоміжним мікроконтролером і ланцюгами перетворення живлення, що збільшує вартість і складність системи.



Рисунок 1.6 – Управління силовим ланцюгом і допоміжними функціями в цифровому джерелі живлення виконується на одному контролері.

Цифрове джерело живлення усуває необхідність додаткових ланцюгів, тому що всі системні параметри вже виміряні цифровим сигнальним контролером. Ці параметри можуть зберігатися в пам'яті цифрового сигнального контролера і передаватися в віддалену систему, використовуючи вбудовану комунікаційну периферію, наприклад, за допомогою інтерфейсів SPI, I2C, UART або CAN. Будь-яка модифікація режимів роботи системи може також бути виконана за допомогою простою програмної процедури без додаткових апаратних засобів.

Цифрове джерело живлення також знижує загальну вартість системи завдяки виключенню зайвим ланцюгам. На прикладі двокаскадного AC / DC-джерела живлення перший каскад вимірює вихідну напругу, необхідне для роботи керуючого ланцюга. Оскільки це напруга є вхідною для другого каскаду, ті ж дані використовуються другим каскадом або для здійснення управління з прямим зв'язком, або для схеми захисту від зниження / підвищення напруги живлення.

Один цифровий сигнальний контролер дозволяє виключити зайві вимірювання і надає всі засоби для виконання різних функцій управління і захисту. Цифровий сигнальний контролер також допомагає системі реагувати на відмову набагато швидше і більш ефективно, ніж з використанням дискретних аналогових контролерів. Тобто, якщо відбувається відмова в вихідному перетворювачі двокаскадного аналогового АС / DC-джерела живлення, то вхідний підвищувальний перетворювач з корекцією коефіцієнта потужності не знатиме про цю відмову, якщо це не пов'язано з самим цим перетворювачем. Цифровий контролер здатний детектувати умови відмови в цілій системі і може, отже, майже негайно реагувати на несправність, незалежно від того, де вона сталася.

### 1.3.3 М'який старт і управління послідовністю

Коли джерело живлення запускається в перший раз, різні елементи, такі як конденсатори і котушки індуктивності, можуть містити накопичену енергію. Щоб уникнути сильних перехідних процесів по струму і напрузі та відповідного навантаження на компоненти системи, у всіх каскадах джерела живлення реалізовані ланцюга м'якого старту. Багато хто (але не всі) аналогові контролери забезпечують вбудовані функції м'якого старту. Аналогові контролери мають обмежені можливості у виборі тривалості м'якого старту і затримки включення з допомогою додаткових схем.

В багато каскадних джерелах живлення є також необхідність завдання заздалегідь визначеної послідовності включення виходів, оскільки стан деяких виходів може залежати від інших виходів. Це можна здійснити з допомогою окремого чіпа завдання послідовності або за допомогою допоміжного мікроконтролера з додатковою схемою.

Цифрове джерело живлення усуває необхідність у додаткових апаратних засобах, оскільки всі процедури, пов'язані із завданням послідовності і м'яким стартом, використовують різні алгоритми, що можуть бути реалізовані як

частина програмного забезпечення для управління джерелом живлення. Для кожного каскаду джерела живлення може бути реалізована програма м'якого старту з можливістю конфігурування тривалості і затримки.

Наприклад, для цифрового сигнального контролера dsPIC процедура м'якого старту в програмі управління викликається негайно після ініціалізації контролера. Спочатку викликається затримка включення, а потім опорна напруга на виході встановлюється рівною виміряному значенню вихідної напруги. Опорна величина напруги потім збільшується на фіксоване значення до тих пір, поки остаточно не досягне бажаного рівня. В цій точці процедура м'якого старту закінчується і починається цикл нормальної роботи системи. Цифровий контролер допускає досить гнучке використання цієї процедури м'якого старту. Ця ж процедура може бути викликана в будь-який момент з різними параметрами. Наприклад, якщо система намагається здійснити повторний запуск після того, як стався збій, затримка включення та тривалість м'якого старту може бути скоригована.

### 1.3.4 Бланкування переднього фронту

Сигнали зворотного зв'язку по струму для більшості силових перетворювачів повинні бути відфільтровані для виключення впливу перешкод на вимірювання і помилкове відключення схем обмеження струму і захисту від збоїв. Більш швидкодіючі ключі, як правило, генерують високий рівень шумів, і цей шум присутній в сигналах зворотного зв'язку. У деяких ситуаціях імпульсна перешкода в момент перемикання MOSFET може навіть викликати перевищення максимальної граничної величини струму.

З допомогою аналогового методу цей рівень шуму важко відфільтрувати від струмового сигналу зворотного зв'язку без спотворення форми сигналу. Для точної роботи керуючого ланцюга і схеми захисту від перевищення струму бажано зберегти форму сигналу. З цієї причини часто використовують метод,

який називається бланкування переднього фронту сигналу (Leading-edge blanking — LEB), при якому контролер «не помічає» імпульсних перешкод на сигнал зворотного зв'язку, пов'язаних з фронтом перемикання сигналу ШІМ.

Для аналогового контролера цей метод вимагає використання схеми апаратного бланкування, яка блокує реакцію сигналу (або «гасить» сигнал) зворотного зв'язку протягом фіксованого часу. Зазвичай цей час визначається транзисторним ключем, який управляється драйвером затвора потужного MOSFET з допомогою RC-лінії затримки. Затримка гарантує, що вимірювальний ланцюг не «бачить» перші миті кожного циклу провідності. У контролерах dsPIC33F серії GS бланкування переднього фронту є стандартною функцією, а затримка бланкування встановлюється програмно. Функція бланкування переднього фронту може бути включена або відключена в будь-який час, і користувач може вибрати, який фронт ШІМ слід бланкувати.

### 1.3.5 Адаптивне і нелінійне управління

Цифрові контролери дозволяють змінювати режим роботи джерел живлення під час їх функціонування. Ця особливість відкриває широкі можливості для нових рішень і забезпечує конкурентні переваги перед іншими продуктами.

Однією з можливостей для адаптивного управління є використання декількох наборів коефіцієнтів ланцюга управління. Оскільки характеристики системи змінюються при різних умовах в мережі або в навантаженні, такі коефіцієнти можуть бути модифіковані в процесі роботи для того, щоб досягти найкращих параметрів в кожній робочій точці.

Припустимо, що система розрахована на роботу при температурі до 50°C, однак, за деякої причини температура навколишнього середовища вийшла за ці межі. В цьому випадку можна скорегувати програмне забезпечення, щоб змен-

шити встановлені граничні значення струму. Таке рішення може допомогти безпечно розширити робочий діапазон системи, хоча і з деякими додатковими застереженнями.

Поява цифрового сигнального контролера dsPIC33F серії GS дозволила реалізувати всі переваги цифрового управління джерелами живлення, що відкрило нові перспективи для нових рішень в області джерел живлення.

#### 1.4 Загальні особливості побудови та застосування цифрових ДЕЖ

Протягом багатьох десятиріч основу силової електроніки становили аналогові перетворювачі, і багато розробників мали нечітке уявлення про цифрові джерела живлення, вважаючи їх, швидше за все, «екзотикою». Однак до теперішнього часу завдяки цій технології з'явилося багато нових функцій і переваг.

##### 1.4.1 Особливості побудови ланцюга зворотного зв'язку

По суті, імпульсні перетворювачі являють собою аналого-цифрові системи. ШІМ-сигнали є цифровими, сигнал зворотного зв'язку - аналоговим. Між цими двома вузлами здійснюється аналого-цифрове перетворення відповідно до дуже точного розрахованим тимчасовим режимом. Це перетворення відбувається після того, як керуючий ланцюг на базі підсилувача прийме рішення про переключення, або після спрацьовування цифрового алгоритму при надходженні сигналу зворотного зв'язку. Частіше, ніж раніше, керуючі аналогові кристали оснащуються цифровими інтерфейсами для зовнішнього контролю, а цифрові мікроконтролери - аналоговими компонентами з управлінням джерелами живлення. В джерело живлення завжди можна було інтегрувати мікроконтролер, але сучасні мікроконтролери роблять набагато більший вплив на роботу системи, ніж раніше. в якості альтернативи можна в цифровий сигнальний контролер встановити весь керуючий контур. В будь-якому випадку, сучасні схеми

джерел живлення можна зробити більш функціонально гнучкими, регульованими і «розумними». Що реагують на умови навколишнього середовища або зовнішні впливи. Ці функції додаються незалежно від того, як реалізований керуючий контур - в цифровому або аналоговому вигляді. В даний час імпульсні джерела живлення задовольняють будь-які потреби додатків в цифровій логіці.

#### 1.4.2 Застосування цифрових способів обробки сигналу в контурі управління

Метод управління - ще одна можливість, яку має система силового перетворення. Встановлений в будь-яку аналогову систему мікроконтролер забезпечує додаткове управління, включаючи контроль над джерелами живлення. Склалося так, що можливість мікроконтролера впливати на аналоговий керуючий контур дуже обмежена через те, що окремі аналогові керуючі елементи мають дуже обмежену здатність до динамічної зміни конфігурації. Проте нові аналогові вузли знаходяться частіше оснащуванні цифровими інтерфейсами і в більшій мірі конфігуруються або програмуються, ніж пристрої попереднього покоління. Інтегральні силові перетворювачі з вбудованими в кристал мікроконтролерами володіють набагато більшими можливостями динамічного конфігурування. В аналогові або цифрові керуючі контури джерел живлення можна інтегрувати цифрові комунікаційні інтерфейси, додати режими сну, функції зсуву частоти, синхронізації, плавного пуску, інтелектуальний захист від відмов, інформацію про зміну вихідного струму або напруги.

#### 1.4.3 Надійність цифрових ДЕЖ

Відомо чимало способів підвищити надійність аналогових або цифрових джерел живлення. в залежності від програми можна зменшити час реакції

обладнання на відмови за допомогою швидкодіючих компараторів, які реєструють провали напруги або перенапруги, а також обмеження не за середнім току, а по струму в кожному циклі робочої частоти. Однак ті ж функції можна реалізувати в джерелі живлення з цифровим керуванням, в т. ч. за допомогою аналогових пристроїв, інтегрованих в сучасні кристали для цифрового управління. До складу цифрових контролерів можуть входити аналогові струмообмежуючі компаратори. Крім того, джерела живлення з цифровими функціями володіють декількома явними перевагами над чисто аналоговими рішеннями. Програмний код дозволяє реалізувати необхідні характеристики захисту від ураження електричним струмом чи провалів напруги в мережі, в т. ч. задані значення плавного пуску і вимикання, безперервної підзарядки, часу очікування або повторів, які важко реалізувати за допомогою аналогових контролерів. Цифрові керуючі контури або інтегровані в кристал ланцюга зворотного зв'язку зменшують залежність від зовнішніх пасивних компонентів, параметри яких змінюються або деградують з часом. Нарешті, цифрові інтерфейси представляють інформацію про результати діагностики і звіти, які використовуються для виявлення можливих проблем, щоб уникнути виходу системи з ладу.

Всі ці функції підвищують надійність системи в порівнянні з простими вузькоспеціалізованими рішеннями. Незалежно від способу реалізації всі джерела живлення тестуються, щоб забезпечити експлуатацію протягом розрахункового терміну служби, однак цифрові системи живлення практично не мають обмежень по надійності, які погіршили б їх функціонування в порівнянні з аналоговими додатками.

#### 1.4.4 Вартість цифрових ДЕЖ

Ціна цифрових джерел живлення може бути нижче аналогових за рахунок використання менш точних і, отже, менш дорогих компонентів. Крім того, в цифрових джерелах живлення може застосовуватися менша кількість компонентів,

що дозволяє скоротити вартість і розмір рішення. Цифрові джерела живлення дозволяють зменшити витрати на загальну вартість володіння. В додатках зі змінним навантаженням реалізуються нелінійні і адаптивні алгоритми, що забезпечують найбільшу ефективність при заданому наборі умов експлуатації. Крім того, вартість експлуатації цифрових джерел живлення буває нижче в тих випадках, коли вони контролюють погіршення якості компонентів протягом усього терміну служби джерела і сповіщають користувачів про необхідність проведення профілактичного обслуговування щоб уникнути катастрофічних відмов.

#### 1.4.5 Енергоефективність цифрових ДЕЖ

Джерела живлення з цифровим керуванням мають більшу енергоефективність в широкому діапазоні змінного навантаження. Ці прилади можуть використовувати адаптивні алгоритми і навіть змінювати топологію системи в залежності від мінливих умов шляхом зміни фази робочої частоти. В джерелах живлення з цифровим керуванням можуть застосовуватися нелінійні і прогностичні алгоритми, щоб поліпшити динамічні характеристики в перехідних процесах. Енергоефективність аналогових джерел живлення не поступається цифровим в певному розрахунковому режимі, але аналоговим джерелам доводиться в максимальній мірі підвищувати свою ефективність, якщо величина навантажувального струму відхиляється від оптимальної робочої точки.

З іншого боку, енергія, необхідна для управління цифровим контролером, може перевищити енергоспоживання аналогового контролера; цифрові контролери, як правило, краще підходять для додатків з порівняно великою потужністю, де надмірне енергоспоживання легко компенсується додатковою економією завдяки використанню більш досконалих керуючих алгоритмів, які мають цифрові технології.

#### 1.4.6 Вплив затримки цифрових контролерів на перехідну характеристику

Двома основними причинами затримки в системах з цифровою компенсацією є ефекти вибірки і час обчислення. В перетворювачі будь-якого типу вибір між частотою зрізу (перехідної характеристики) і запасом стійкості по фазі завжди є компромісним. Цифрові системи, в основному, схожі один з одним, але системи цифрового управління мають справу не з аналоговим сигналом, а з вибіркою, що виходить після аналого-цифрового перетворення. періодична вибірка (одна на цикл) додає фазовий зсув в передавальну функцію. Цей зсув не просто компенсувати; цифровій системі потрібна менша частота зрізу, щоб забезпечити той же запас по фазі. Крім того, процесору необхідно обробляти результати оцифровки АЦП і обчислювати різницю за один комутаційний цикл, інакше виникне затримка - відхилення від розрахункового часу. Однак ці негативні ефекти долаються за допомогою вдосконалених нелінійних і попереджувальних методів - алгоритмів, які важко (або неможливо) реалізувати в аналоговій керуючій системі. Недолік цих методів полягає в необхідності знайти компроміс між швидкістю обробки даних, комутаційною частотою, складністю алгоритму і перехідною характеристикою.

#### 1.4.7 Проблема відсутності навантажувального струму

Імпульсні джерела живлення, як правило, працюють в одному або двох режимах - переривчастого і безперервного провідності. В першому з них струм індуктивності зменшується до нуля в кінці кожного ШІМ-циклу. У другому режимі через індуктивність протікає безперервний струм. Перевага режиму переривчастої провідності в тому, що струму індуктивності немає необхідності збільшуватися з нульового значення при кожному ШІМ -імпульсі, завдяки чому в кожному ШІМ - циклі протікає більший струм.

Недоліком є те, що у підсилювача помилок або контурного фільтра повинна бути правильна комбінація полюсів і нулів для підтримки стабільного функціонування. На жаль, якщо струм в схемі з безперервною провідністю зменшується до нуля, керуючий контур стає нестабільним. Щоб уникнути цього негативного ефекту раніше часто вказувався мінімальний струм, або мінімальний струм забезпечувався шляхом використання вихідного резистора (режим примусової безперервної провідності). На щастя, сучасні контролери джерел живлення ефективно працюють в режимах безперервної і переривчастої провідності (ШІМ і ЧІМ), а моніторингова схема визначає моменти часу для перемикання з одного режиму в інший. Таким чином, обмеження, пов'язане зі схемотехнічним рішенням раніше застосовуваних контролерів джерел живлення, нові контролери подолали завдяки автоматичній комутації режимів.

#### 1.4.8 Складність проектування цифрових ДЕЖ

Джерела живлення з цифровим управлінням не у всіх випадках бувають більш складним, ніж аналогові джерела - просто у кожного з них є своя специфіка. Схеми силового ланцюга дуже схожі в двох цих випадках. Керуючий контур або ланцюг компенсації джерела живлення з цифровим керуванням реалізований в мікропрограмному ПЗ цифрового контролера, а не в аналоговому ланцюзі. Параметри компенсатора визначаються по розташуванню полюсів і нулів, як і в аналоговому приладі, але у випадку з цифровим компенсатором часто застосовуються програмні засоби, за допомогою яких конфігурується оптимальна характеристика керуючого контуру. Наприклад, використовуються добре оптимізовані програмні бібліотеки, безкоштовно розповсюджуються на сайті компанії Microchip для сімейства цифрових сигнальних контролерів dsPIC. Розробникам не доведеться самостійно писати програмне забезпечення для реалізації

цих функцій. Крім того, згадані алгоритми налаштовуються в залежності від конкретного силового ланцюга за допомогою коефіцієнтів, значення яких розраховуються засобами проектування.

Те, що цифрові джерела живлення використовують програмне забезпечення для керуючих алгоритмів, зовсім не означає, що проектування цих приладів простіше. Інженери повинні дуже добре розбиратися в керуючих системах і визначати частотну характеристику силового ланцюга, щоб коректно налаштувати програмний компенсатор. З іншого боку, регулювання функцій джерела живлення за допомогою програмного забезпечення простіше, ніж апаратним способом.

#### 1.4.9 Область застосування цифрових ДЕЖ

Цифрові джерела живлення необхідні не для всіх додатків. Наприклад, не має сенсу оснащувати MP3-плеєр, який працює від літій-іонної батареї, великої обчислювальної потужності, щоб підвищити напругу живлення.

З іншого боку, джерелам живлення платинового рівня для серверів потрібні можливості цифрового силового перетворювача для ефективної генерації заданої потужності і швидкої реакції на зміни навантаження. Наприклад, обладнання веж стільникового зв'язку має забезпечити високий струм при працюючому передавачі і набагато менший струм, коли передавач вимкнений. Контролер, керуючий передавачем, включає силовий перетворювач і координує рівень середнього струму, щоб уникнути просідання живлення, яке може виникнути через інерційності фільтра в ланцюзі зворотного зв'язку. Така ефективна функція цифрового джерела живлення виправдовує ті додаткові складності, які виникають при його проектуванні. З іншого боку, в системі з відносно постійними вимогами по живленню можна використовувати аналогову схему, яка проектується набагато простіше і менше коштує. В будь-якому випадку, розробникам доводиться вибирати розумний компроміс між вартістю і простотою використання програми з регулятором на базі ASIC.

#### 1.4.10 Застосування програмно-керованих функцій в ДЕЖ

Кілька років тому вважалося, що програмно визначається радіо (SDR) отримує саме широке поширення у всіх радіоприймачах. І хоча у SDR-рішень є кілька переваг, у таких радіосистемах - один головний недолік: для обробки сигналів їм потрібен процесор з швидкодією 10-100 MIPS. Навіть системам з аналоговими змішувачами для перетворення РЧ-сигналу в сигнал з меншою проміжною частотою необхідно швидкодію 10-100 MIPS, але такий процесор здатний тільки демодулювати сигнал.

Зрозуміло, що ціна цих систем досить велика. За аналогією, можна те ж саме стверджувати стосовно джерел живлення з програмно обумовленими функціями (software defined power, SDP): не слід вважати, що вони з'являться буквально у всіх додатках. Немає нічого простіше і дешевше лінійного регулятора. Навіть якби процесор з швидкодією 10-100 MIPS мав ту ж ціну, що і лінійний регулятор, для завантаження процесора потрібен був би 5-в лінійний регулятор. Таким чином, джерела живлення з програмно обумовленими функціями ніколи не стануть універсальним рішенням для систем перетворення живлення.

Висновки за розділом:

- представлені основні технічні та експлуатаційні особливості застосування цифрових джерел електроживлення живлення;
- цифрові контролери дозволяють змінювати режим роботи джерел живлення безпосередньо під час їх функціонування. Ця особливість відкриває широкі можливості для нових рішень і забезпечує конкурентні переваги перед іншими продуктами;
- основними причинами масового впровадження ЦДЖ є їх висока ефективність, гнучкість, можливість відпрацювання складних алгоритмів включення живлення, здатність відповідати складним технічним вимогам.

## 2 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Розробники імпульсних джерел живлення приділяють велику увагу впровадженню цифрових технологій для управління перетворенням напруги, що дозволяє ще більше збільшити ККД і продуктивність, знизити кількість компонентів, підвищити технологічність виробництва і надійність. Побудова силових перетворювачів, які використовують частково або повністю цифрові методи управління, обумовлена розвитком сучасних мікроконтролерів і процесорів, розширенням їх функціональних можливостей при постійному зниженні вартості.

Інтегральні мікросхеми для реалізації цифрового управління перетворенням напруги випускають багато компаній: Atmel (мікроконтролери серії ATmega і AVR), Microchip (контролери цифрових сигналів серії dsPIC і серій PIC16-PIC18), Silicon Laboratories (цифрові силові контролери Si825x), Texas Instruments (ІМС UCD9501), Primarion (ІМС серій PX35xx, PX75xx), Maxim (MAX8688), Zilker Labs і деякі інші.

Відповідно до нещодавнього дослідження аналітичної компанії Darnell Group, сегмент ринку джерел живлення, в яких буде використана будь-яка форма цифрового контуру управління, як очікується, буде рости із середньорічним темпом близько 45%, по крайній мірі, протягом п'яти років. Зростання сегменту ринку джерел живлення з цифровим контуром управління відбуватиметься майже в п'ять разів швидше, ніж всього ринку джерел живлення в цілому.

Безперервне швидке зростання застосування різних цифрових технологій в каскадах джерел електроживлення стало найважливішим чинником, що визначив успіх форуму по використанню цифрових технологій в силових перетворювачах, організованого компанією Darnell Group. Як завжди, цей форум зібрав міжнародну аудиторію, яка отримала можливість ознайомитися з напрямленням

цифрового управління перетворенням напруги в індустрії джерел живлення, продемонстрував відповідну продукцію, а також різноманітність та обширну географію рішень на її основі. Багато європейських компаній представили на форумі інформацію, пов'язану з перетворенням потужності, а також обладнання для вирішення принципово важливих завдань і сучасні компоненти.

На конференції пролунала низка спеціалізованих доповідей, сфокусованих на цифровому управлінні енергією і перетворенні напруги в таких важливих для багатьох підприємств додатках, як центри обробки та збереження даних, телекомунікаційне і цифрове обладнання для зв'язку. Дві розширені технічні секції, присвячені реалізації цифрового управління на системному рівні, були організовані у співпраці з PMBus Organization.

У форумі взяли участь багато профільні компанії, які проявляють великий інтерес до цифрових технологій управління перетворюванням енергії. Це Analog Devices, Coldwatt, Embedded Microprocessor Benchmarking Consortium, Emerson Network Power, Energy Star, Ericsson Power Modules, Fairchild Semiconductor, IBM, Infineon Technologies, Intel, International Rectifier, Lineage Power, Maxim, Microchip, National Semiconductor, NXP, Power-One, Primarion, STMicroelectronics, Texas Instruments і Zilker Labs.

Необхідно зауважити, що перший форум (Digital Power Forum), присвячений застосуванню цифрових технологій в силових перетворювачах, організований компанією Darnell Group, відбувся в 2004 році. Шоста конференція DPF відбулася в 2009 році і була присвячена практично всім основним аспектам перетворення напруги у вбудованих системах, включаючи: оптимізацію ефективності використання енергії; планарні магнітні компоненти; методи розрахунку теплового режиму; дискретні напівпровідникові пристрої; управління перетворенням енергії; архітектури управління перетворенням напруги на рівні плат; архітектури управління перетворенням напруги на системному рівні; інструментальні засоби і технології для проектування; розробку

програмного забезпечення і апаратну реалізацію та інші найважливіші аспекти перетворення напруги для вбудованих систем.

Таким чином, на конференції пройшло обговорення всіх проблем, з якими зіткнулися проектувальники при впровадженні цифрових технологій для управління перетворенням напруги в електронних системах при організації управління і моніторингу для цифрових силових перетворювачів.

Далі в якості прикладів будуть представлені кілька конкретних моделей джерел живлення компанії TDK-Lambda, створених із застосуванням мікроконтролерів для реалізації цифрового контуру управління та інших технічних рішень, що сприяють значному підвищенню їх якості.

## 2.1 Джерела живлення AC / DC серії NV Power з цифровим керуванням

Перші моделі джерел живлення з цифровим управлінням TDKLambda - це конфігуруючі джерела живлення AC / DC серії NVPower з вихідною піковою потужністю 1450 Вт.

Нові модулі електроживлення дозволили компанії задовольнити зростаючий попит на конфігуруючі джерела живлення висотою 1U з вихідними потужностями понад 1000 Вт для радіомовного, вимірювального та медичного обладнання, а також для ряду інших застосувань, таких як автоматичне випробувальне обладнання, промислова автоматизація, маршрутизатори і сервери, системи безпеки обчислювальних мереж.

Нові блоки живлення з цифровим керуванням увібрали в себе багато інноваційних рішень, наприклад, новий інтегрований трансформатор, який забезпечує невеликі габарити і підвищену ефективність. Цифрове управління забезпечує можливість виготовлення модулів за технічними вимогами замовників відповідно до конкретних умов застосування (можлива зміна значення

рівня обмеження струму навантаження і параметрів запуску). Посилена електрична ізоляція між первинним і вторинним ланцюгами витримує 4000 В, що дозволяє застосовувати ці джерела живлення в медичному електрообладнанні.

Для здійснення управління стандартними процедурами перетворення напруги в джерелах живлення серії NV-Power використовується 8-розрядний мікроконтролер серії AVR AT90PWM2B фірми Atmel, який замінює комплект спеціалізованих контролерів, компараторів, операційних підсилювачів, таймерів, а також цифрові схеми та інші дискретні компоненти, що використовуються в менш інтегрованих конструкціях. Це призводить до 50% скорочення кількості компонентів, що, в свою чергу, забезпечує додаткові 40% площі друкованої плати для розміщення силових компонентів. При досить високій піковій потужності мікроконтролера проектувальники систем можуть реалізувати значення питомої потужності до 19 Вт / дюйм<sup>3</sup> в блоці висотою 1U з розмірами підстави 125 x 250 мм.

Джерела живлення серії NV-350 забезпечують в навантаженні до 600 Вт при тривалому режимі роботи (750 Вт пікової потужності на протязі 10 секунд): типовий фірмовий каркас може бути встановлено до шести сконфігурованих модулів. Багато резонансний метод перемикавання силових транзисторів, патентована конструкція силового трансформатора та інші конструкторські рішення дозволяють значно поліпшити показники електромагнітної сумісності та отримати струм витоку на «землю» менше 300 мкА при вхідній напрузі 264 В і частоті живильної мережі 63 Гц, що відповідає вимогам стандартів IEC / EN / UL 60601-1 до електроустаткування для медичної техніки.

Ряд джерел живлення NV-750 забезпечує в навантаженні до 1150 Вт при тривалому режимі роботи (1450 Вт пікової потужності на протязі 10 секунд), в типовий фірмовий каркас можна встановити до восьми сконфігурованих модулів цієї серії. Особливо необхідно відзначити, що новий одноканальний модуль «С» з цифровим керуванням має ширину трьох слотів і доступні з номінальними напругами 12, 15 або 24 В, забезпечуючи 450 Вт при тривалому режимі роботи і

600 Вт пікової потужності на протязі 10 секунд. Кожен окремий модуль формує сигнали стану вихідної напруги, має вхід для дистанційного включення / вимикання, характеризується низьким значенням струму витоку і низьким рівнем кондуктивних і випромінюваних перешкод.

Наявний широкий набір вихідних модулів і можливість їх комбінування дають велику різноманітність комбінацій вихідних напруг і струмів. Використовуючи on-line конфігуратор NV-Power, замовники можуть створити свої власні схеми. Ця сервісна програма перевіряє конфігурацію і пропонує оптимальне рішення. Всі вихідні канали повністю ізольовані і підтримують режим холостого ходу. Крім того, серія NV-350 доступна з зворотнім охолоджуючим повітряним потоком. Низько профільні вихідні з'єднувачі дозволяють використовувати максимальний повітряний потік для забезпечення ефективного охолодження.

У серії NV-Power доступні моделі з номіналами вихідної напруги від 3,2 до 64 В, а також виходи 5 В (2 А) і 12 В (1 А) для забезпечення чергового режиму. У серії NV-Power використовується комплексна технологія підвищення ефективності, що забезпечує високе значення ККД: до 90% в залежності від конфігурації. Підвищення ефективності кожного з каскадів джерела живлення в результаті дозволяє значно підвищити якість джерел живлення серії NV-Power.

Перелічимо основні технічні рішення, що сприяють значному підвищенню показників якості джерел живлення:

1. М'яке перемикання силових транзисторів при нулі напруги в вихідному перетворювачі дозволяє застосувати в перешкодоподавляючих фільтрах малогабаритні індуктивні компоненти, які мають невеликі значення опорів і, отже, менші втрати.
2. Використання в схемі активного коректора коефіцієнта потужності (ККП) карбідкремнієвих діодів (SiC) значно знижує комутаційні втрати завдяки відсутності втрат потужності через зворотній струм відновлення діода. Тільки одне це забезпечує підвищення ККД на 1%.

3. Застосування в структурі напів мостового перетворювача багато резонансних ефектів для забезпечення режиму перемикання силових транзисторів при нулі напруги підвищує ККД при зміні навантаження від 30 до 100% і забезпечує низький взаємний вплив між каналами.

Використання синхронного випрямлення у вихідному каскаді, при якому демпферний діод понижуючого регулятора замінюється комутованими MOSFET-транзисторами (рис. 2.1). В джерелах живлення застосовується цифровий контур управління.

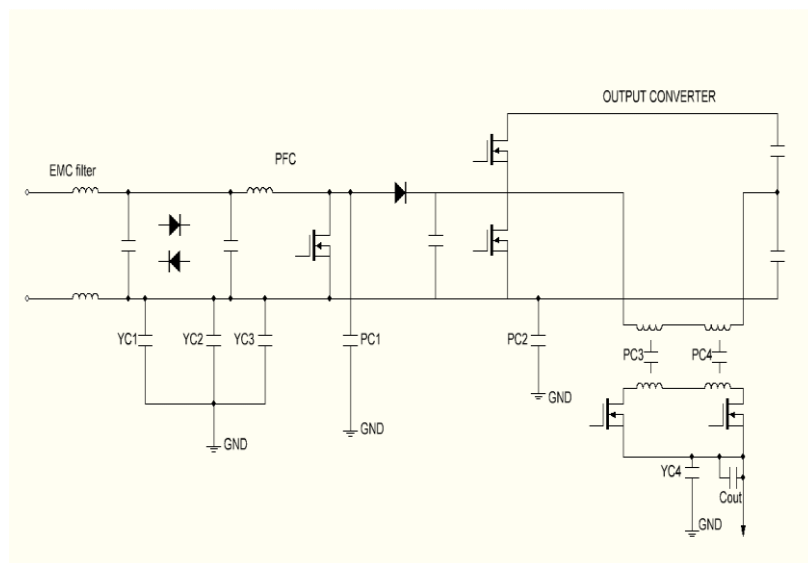


Рисунок 2.1 – Спрощена принципова схема джерела живлення AC / DC серії NV\_Power (показані вхідний каскад, частково - ланцюги ККП, силові транзистори і транзистори схеми синхронного випрямляча, а також ємності, що впливають на значення струму витoku на «землю»).

Мікроконтролер AT90PWM2B забезпечує: цифрову обробку сигналів для реалізації частотно-імпульсного управління і створення необхідних зворотних зв'язків в контурах управління; формування сигналу управління аналогової схеми ККП і пусковим струмом; захист від перегріву, перенапруги, перевантаження по струму.

## 2.2 Серія EFE джерел живлення AC / DC з цифровим контуром керування

Створені з застосуванням цифрового управління перетворенням напруги джерела живлення AC / DC серії EFE компанії TDK Lambda відрізняються високою для виробів промислового призначення питомою потужністю і ефективністю, а також підвищеною надійністю. Першими моделями даної серії, стали 300-Вт EFE-300 і 400-Вт EFE-400 одноканальні джерела живлення, здатні забезпечити в навантаженні пікову потужність 133% від номінального значення потужності протягом 10 с і характеризуються високим для свого класу значенням ККД – до 90% .

Цифрове управління перетворенням напруги і допоміжні функції здійснюються 8-бітових мікро контролером AT90PWM2 серії AVR (компанія Atmel), що дозволило на 25% скоротити кількість компонентів, зменшити площу конструкції на 45%, а вага - на 56% в порівнянні з нещодавно анонсованими конкуруючими виробами. Значення питомої потужності (до 1350 Вт / дм<sup>3</sup>) досягається при піковому навантаженні, а значення питомої потужності 1018 Вт / дм<sup>3</sup> - при номінальному навантаженні. Блок-схема джерела живлення AC / DC серії EFE-300 приведена на рис. 2.2

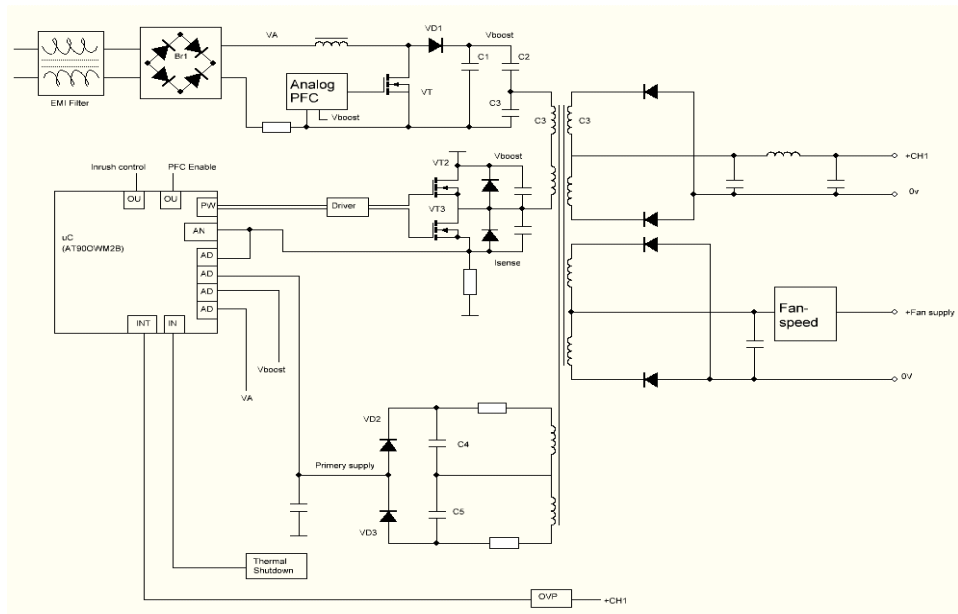


Рисунок 2.2 – Блок схема джерела живлення серії EFE 300 з реалізацією системи управління на 8 розрядному мікроконтролері AT90PWM2B серії AVR (Atmel).

Джерела живлення серії EFE-300/400 виконані на двотактній напівмостовій схемі з резонансним перемиканням. Схема містить силові транзисторні ключі VT2 і VT3. Конденсатори C2 і C3 утворюють ділянку напруги первинного джерела E. Транзисторні ключі VT2 і VT3 по черзі відкриваються і закриваються сигналами управління, які надходять через драйвер (забезпечує зарядку вхідної ємності силових транзисторів MOSFET) від мікроконтролера AT90PWM2B. Для забезпечення режиму резонансного перемикання застосовуються антипаралельні діоди і вихідні ємності силових транзисторів, а індуктивність розсіювання і індуктивність намагнічування силового трансформатора використовуються як резонансна індуктивність послідовного резонансного контуру. При цьому через транзисторні ключі протікають резонансні струми, що дозволяє формувати практично ідеальні траєкторії перемикання транзисторів. Перемикання транзисторів здійснюється практично при нулі напруги з плавною зміною струму, відсутністю викидів напруг і паразитних СВЧ-коливань, що дає можливість знизити комутаційні втрати, підвищити якість і надійність.

8-розрядний мікроконтролер серії AVR, який використовується в схемі для реалізації управління, має передову RISC-архітектуру, яка забезпечує у багато разів більше високу швидкодію, ніж традиційна CISC-архітектура, а також флеш-пам'ять об'ємом 8 кбайт, генератори, 11-канальний 10-розрядний АЦП з двома диференціальними входними каскадами з програмованим коефіцієнтом посилення, ШІМ-контролер, два таймера-лічильника, аналогові компаратори з матрицею резисторів для підстроювання напруги, 4 входи зовнішніх переривань, різні інтерфейси (послідовний порт SPI, програмований послідовний USART). Швидкодію мікроконтролера - до 1 MIPS. Об'єднуючи 8-розрядний RISC-процесор з вбудованою програмованою флеш-пам'яттю на монолітному кристалі, AT90PWM2B / 3B є потужним мікроконтролером, що дозволяє будувати гнучкі та рентабельні рішення для багатьох вбудованих застосувань. Мікроконтролери AT90PWM2B / 3B серії AVR підтримуються повним комплектом програм і системними засобами розробки, включаючи компілятори мови C, макроасемблер, відладчик / імітатор програм, внутрішньо схемні емулятори та оціночні комплекти.

Гарвардська архітектура AVR реалізує повний логічний і фізичний поділ не тільки адресного простору, а й інформаційних шин для звернення до ROM і SRAM. Така побудова вже ближче до структури DSP і дозволяє значно підвищити швидкодію. Використання однорівневого конвеєра також помітно скорочує цикл «вибірка / виконання команди».

Наявність великого набору аналогових компонентів і цифрових периферійних пристроїв, а також вбудованого програмованого ЕПЗУ і флеш-пам'яті значно підвищує гнучкість, тому мікроконтролери серії AVR можна використовувати для реалізації цифрового контуру управління в перетворювачах напруги.

З вторинної обмотки перетворювача через трансформатор и випрямні діоди VD2, VD3 на один із каналів АЦП мікроконтролера надходить сигнал про вихідну напругу, а на інший канал АЦП і вхід вбудованого компаратора - сигнал

з струмовимірювального резистору, тобто реалізується метод регулювання з додатковим зворотнім зв'язком по струму дроселя (ДОСТД). Застосування режиму регулювання з ДОСТД забезпечує параметричну компенсацію відхилень вхідної напруги, обмеження струму в кожному робочому циклі, а також власну стійкість системи. Спрощується частотна корекція всього контуру зворотнього зв'язку і зменшується година реакції контуру, як при малих, так і при великих змінах струму навантаження.

Сигнал від температурного датчика надходить на один із входів зовнішнього переривання, сигнал про перенапруження - на вхід переривання INT2 (6-й канал АЦП) і на драйвери транзисторів MOSFET. Для включення ШІМ модулятора ККП, що є компонентом схеми аналогового ККП, призначений один із виходів мікроконтролера PSCOUT. Мікроконтролер також здійснює управління плавним запуском джерела живлення. На один із каналів АЦП подається сигнал про напругу мережі (VAC).

Мікроконтролер дозволяє значно спростити схему управління ланцюгами джерела живлення на первинній стороні трансформатора, що призводить до зменшення кількості застосовуваних компонентів і підвищенню ефективності без зниження показників стабілізації.

Конструкція джерел живлення серії EFE-300/400 побудована на безлічі інноваційних рішень. Зокрема, це оригінальна конструкція трансформатора: загальний феритовий сердечник з чергуванням шарів первинної і вторинної обмоток. Це призводить до утворення сильного магнітного зв'язку і, як наслідок, до зростання ККД трансформатора, що, в свою чергу, підвищує загальний ККД джерела приблизно на 1%. Застосування карбід-кремнієвих діодів в коректорі КМ збільшує значення ККД ще на 1% завдяки відсутності втрат потужності через зворотній струм відновлення діода. Цифрове управління дозволяє оптимізувати такі технічні характеристики джерела живлення, як обмеження струму навантаження і параметри запуску.

Багато з особливостей конструкції джерела живлення серії EFE з цифровим управлінням безпосередньо підвищують надійність. Наприклад, наявність точного управління при аварійних ситуаціях запобігає перенапруженню пристроїв завдяки оригінальним алгоритмам. Крім того, досягається найкраща стійкість до впливу перешкод в порівнянні з конструкціями з аналоговим зворотним зв'язком, а істотне зменшення числа компонентів дозволяє оптимізувати їх розміщення для поліпшення теплового режиму джерела живлення.

Доступні моделі серії EFE-300 з вихідними напруженнями 12 В (25 А) або 24 В (12,5 А), що забезпечують в навантаженні номінальну потужність 300 Вт (пікова потужність 400 Вт протягом 10 с), і моделі серії EFE-400 з вихідними напруженнями 12В (33,3 А) або 24 в (16,7 А), що забезпечують в навантаженні номінальну потужність 400 Вт (пікова потужність 530 Вт протягом 10 с). Всі модулі можуть бути запрограмовані при виробництві для застосування в додатках з нестандартною напругою живлення. Модулі працюють від мережі змінного струму в діапазоні напруги від 90 до 264 В (зміна частоти мережі 45-63 Гц, можлива робота при частоті 440 Гц з зменшеним КМ) або від мережі постійного струму в діапазоні напруги від 120 до 350 В; пристрої забезпечені двома запобіжниками у вхідному ланцюзі, а також мають додатковий канал 12 В (0,25 А) для живлення вентилятора. Активний коректор коефіцієнта потужності забезпечує відповідність вимогам стандарту EN 61000-3-2 до гармонійних складових вхідного струму. Інші конструктивні рішення, які покращують показники ЕМС, такі, наприклад, як застосування карбід-кремнієвих діодів, дозволяють гарантувати зі значним запасом електромагнітну сумісність за нормами класу В.

Джерела живлення серії EFE відповідають високим екологічним вимогам завдяки невеликому споживанню енергії при виробництві та експлуатації, застосування меншої кількості компонентів, зниженої ваги. Ці джерела живлення мають збільшений термін служби.

Модулі EFE доступні в корпусі і в відкритому виконанні. Застосування компактних з'єднувачів дозволяє максимально збільшити повітряний потік для

підвищення ефективності охолодження. У моделях з встановленими вентиляторами здійснюється зміна швидкості обертання вентилятора в залежності від струму навантаження: здійснюється лінійне управління, принципова перевага якого в порівнянні з іншими методами - це відсутність перешкод.

Невелика площа і висота 1U (EFE-300 має габаритні розміри 127 x 76 x 34 мм, а EFE-400 - 152 x 76 x 34 мм) дозволяють застосовувати джерела живлення серії EFE в конструкціях з обмеженими обсягами, що забезпечує незначне виділення тепла і розширює їх функціональні можливості. Дана серія рекомендована до застосування в радіомовному, вимірювальному, промисловому обладнанні, системах автоматизації, маршрутизаторах, серверах і системах безпеки.

Всі моделі серії EFE компанії TDK Lambda відповідають стандартам електробезпеки IEC / EN / UL / CSA 60950-1, вимогам Європейських Директив і стандартам IEC / EN 61010-1 для лабораторного і технологічного устаткування. Основними причинами появи коливань напруги є ненульовий внутрішній опір самої електричної мережі і зміни споживаного струму навантажень, підключених до неї. Основою для оцінки емісії флікера вважається форма кривої зміни напруги на затискачах випробуваного технічного засобу за умови живлення його від джерела напруги з нормованими параметрами, зокрема стабільності вихідної напруги і певного значення вихідного опору.

Модулі серії EFE-300M призначені для застосувань в медичному електрообладнанні і відповідають вимогам міжнародних стандартів UL 60601-1, EN 60601-1 до виробів медичної техніки. Вони мають посилену ізоляцію між первинним і вторинним ланцюгом, який витримує випробувальну напругу 4000 В (діюче значення), струм витoku на «землю» - менше 300 мкА. Модулі серії EFE-300M можна застосовувати в медичних виробах типу В (вироби без робочої частини, наприклад, лазерні лікувальні системи, комп'ютерні системи) і ВF (вироби з ізолюваною робочою частиною типу F-floating, що знаходяться в

навмисному фізичному контакті з пацієнтом, наприклад, ультразвукові установки, електрокардіографи та операційні столи).

З'єднання транзисторів FET за схемою «АБО» забезпечує паралельне з'єднання модулів для  $(N + 1)$  -резервування без включення додаткового діода. Сумарна нестабільність вихідної напруги - менше 4%. Так як мікроконтролер використовується для прогнозування вихідної напруги цифровим способом, значення нестабільності по струму і напрузі можуть бути змінені або точно налаштовані, що особливо корисно при паралельному з'єднанні.

Застосування цифрових технологій для побудови силових перетворювачів дозволяє значно збільшити ефективність перетворення напруги, скоротити кількість компонентів, підвищити надійність джерел живлення, підвищити гнучкість їх використання і легко адаптувати до конкретних умов. Поява на ринку різноманітних програмованих мікроконтролерів з інтегрованими функціями обробки сигналів і спеціалізованими пристроями введення / виводу, а також постійне зниження вартості цих контролерів дають можливість проектувальникам систем електроживлення вибрати оптимальне рішення для створення силового перетворювача з цифровим контуром управління або організувати взаємодію між контролером і DC / DC перетворювачами з цифровим управлінням по цифровій шині стандарту PMBus (Power Management Bus).

Але треба пам'ятати, що створити надійний і ефективний перетворювач напруги можна тільки на основі великих теоретичних знань і практичного досвіду, накопиченого за багато років в процесі розробки високочастотних перетворювачів напруги вітчизняними і зарубіжними фахівцями, приділяючи особливу увагу конструюванню джерел електроживлення. Поява сучасних імпульсних джерел живлення з мікропроцесорним управлінням зарубіжної та вітчизняної розробки демонструє, що цифрові технології в силових перетворювачах напруги стали об'єктивною реальністю.

### Висновки по розділу:

- впровадження цифрових технологій керування перспективним напрямом розвитку джерел електроживлення, зокрема зростання сегменту ринку джерел живлення з цифровим контуром управління відбувається майже в п'ять разів швидше, ніж всього ринку джерел живлення в цілому;
- застосування мікроконтролерів дозволяє значно спростити схему управління ланцюгами джерела живлення на первинній стороні трансформатора, що призводить до зменшення кількості застосовуваних компонентів і підвищенню ефективності без зниження показників стабілізації;
- створені різними виробниками ДЕЖ з застосуванням цифрового управління перетворенням напруги джерела живлення АС / DC відрізняються високою для виробів промислового призначення питомою потужністю і ефективністю, а також підвищеною надійністю;
- наявність вбудованого програмованого ЕППЗУ і флеш-пам'яті значно підвищує гнучкість керування;
- мікроконтролери забезпечують цифрову обробку сигналів для реалізації частотно-імпульсного та широтно-імпульсного управління і створення необхідних зворотних зв'язків в контурах керування; формування сигналу управління пусковим струмом; захист від перегріву, перенапруги, перевантаження за струму тощо.

### **3 СТРУКТУРНІ ЕЛЕМЕНТИ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ**

До недавнього часу стандартним для імпульсних джерел живлення (SMPS) було аналогове управління. В даний час з появою швидкодіючих недорогих цифрових ІС зростає інтерес до систем цифрового управління імпульсними джерелами вторинного електроживлення. Цифрове управління дозволяє оптимізувати операцію управління, підвищити ККД, забезпечити лінійність регулювання струму навантаження. Простота управління ланцюгом зворотного зв'язку джерела живлення робить цифрове управління особливо привабливим як для неізованих понижуючих багатоканальних перетворювачів, так і для ізованих джерел живлення в складі багатоюнітних систем з цифровим поділом струмів. Перетворювачі з петлею зворотного зв'язку з цифровим керуванням можуть функціонувати як системи аналізу роботи власної схеми. Грунтуючись на вимірі параметрів системи, пристрій може оптимізувати власний петлевий відгук. Це буде особливо відчутно в разі необхідності компенсувати більшу ємність навантаження і призведе до збільшення терміну служби компонентів.

Типовий імпульсний блок живлення складається з діодного мосту, що випрямляє вхідна напруга, ключового каскаду, вихідного фільтра, що згладжує і ланцюга зворотного зв'язку, що регулює вихідну напругу і забезпечує захист від перевантажень по напрузі і струму. Зворотній зв'язок надходить на блок контролер, вихідний сигнал якого, як правило, має, широтно-імпульсну (ШІМ) або частотно-імпульсну (ЧІМ) модуляцію. Узагальнена блок-схема стандартного імпульсного джерела живлення показана на рис. 3.1.

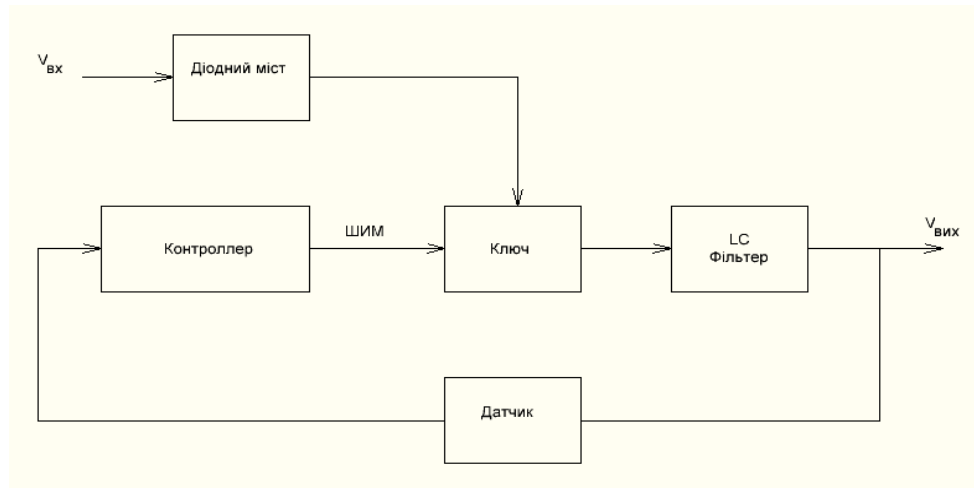


Рисунок 3.1 – Узагальнена блок схема імпульсного джерела живлення

При регулюванні, в залежності від схеми побудови ключового каскаду і типу перетворення (вгору, вниз або в обидві сторони), може змінюватися як ширина імпульсів управління, так і їх частота. По суті, відмінності ДЕЖ з аналоговим і з цифровим керуванням, якщо розглядати спрощену схему на рис. 3.1, криються в реалізації блоку «Контролер». Блок-схема джерела живлення з аналоговим управлінням показана на рис. 3.2.

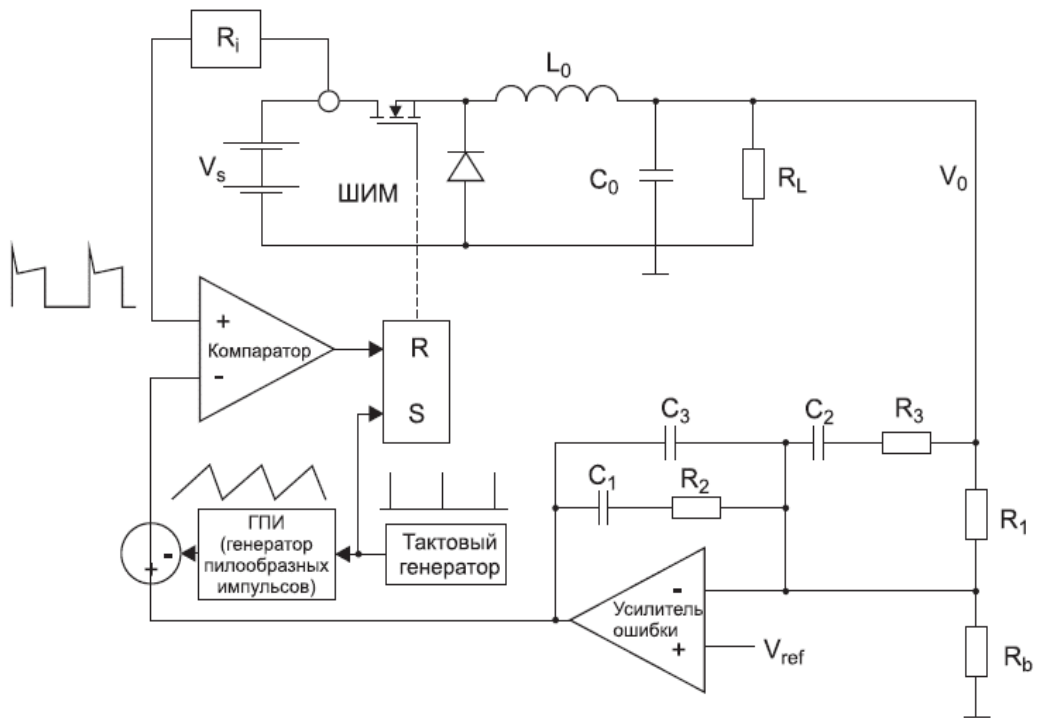


Рисунок 3.2 – Функціональна схема імпульсного джерела живлення з аналоговим управлінням

Петля зворотного зв'язку для стабілізації напруги містить: датчик напруги; підсилювач помилки зі складним ланцюгом зворотного зв'язку; синхрогенератор; генератор пилкоподібних імпульсів, суматора / віднімача, датчика струму, компаратор і RS-тригера, які утворюють ШІМ. Для порівняння на рис. 3.3 показана блок схема джерела живлення з цифровим керуванням.

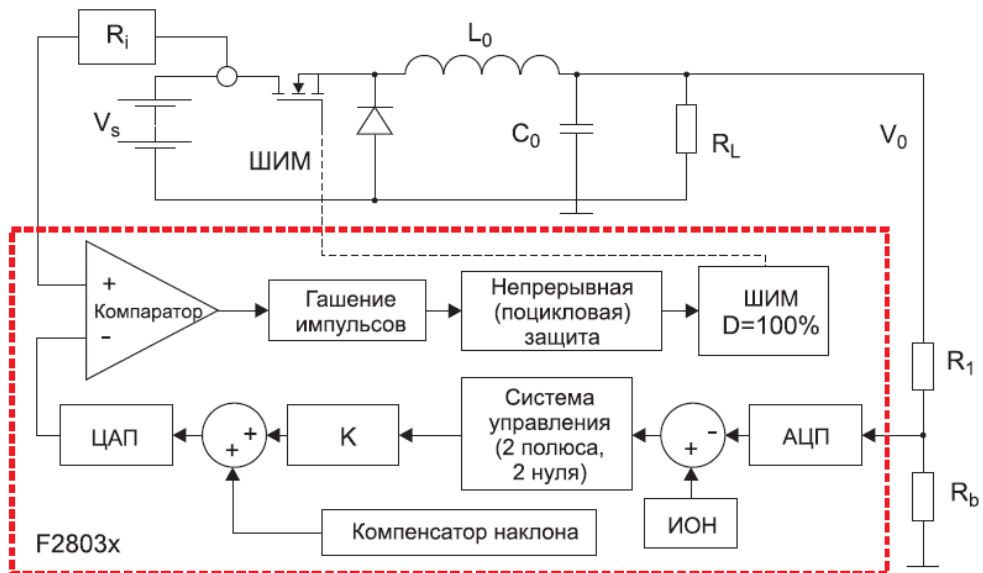


Рисунок 3.3 – Функціональна схема імпульсного блоку живлення з цифровим керуванням

Тут петля зворотного зв'язку складається з датчика напруги, АЦП, цифрового компаратора, 2z2p-контролера, блоку масштабування і компенсатора нахилу, ЦАП, датчика струму, компаратора, схеми бланкування, схеми обмеження струму і керуючого ШІМ. Тому до появи недорогих швидкодіючих мікроконтролерів для обробки змішаних сигналів ДЖ з цифровим управлінням були мало поширені.

Кожен тип управління має свої переваги і недоліки, їх перелік наведено в таблиці 1. Зазначені в таблиці 1 особливості дозволяють різко скоротити кількість деталей в джерелах живлення з цифровим керуванням, а постійне вдосконалення мікроконтролерів нівелює зазначені недоліки. На сьогодні вартість цифрової системи управління практично збігається з вартістю аналогової навіть для простих одноканальних джерел живлення.

### 3.1 Сімейство мікроконтролерів C2000

До появи мікроконтролерів реального часу сімейства C2000 від TI було досить складно вибрати компоненти для джерела живлення з цифровим керуванням. Мікроконтролери C2000 мають 32-розрядний ядро, TMS320C28x™ має однотоковий 32x32-розрядний апаратний помножувач і однотокове виконання атомарних інструкцій. Унікальні, націлені на майбутнє периферійні модулі включають розпаралельні АЦП з продуктивністю до 12,5 MSPS (Delfino), ШІМ з високою роздільною здатністю, розширені блоки захоплення і багато іншого. Крім того, для мікроконтролерів C2000 є унікальні засоби розробки, засновані на керуючих модулях controlCARD і потужному пакеті підтримки розробок controlSUITE. За допомогою цього набору інструментів можна досліджувати широкий діапазон готових рішень і конфігурацій, щоб знайти найбільш досконале рішення для власних розробок.

Розглянемо розвиток сімейства мікроконтролерів C2000. В даний час воно складається з трьох підродин: мікроконтролерів Piccolo початкового рівня для додатків, чутливих до вартості; потужних сигнальних процесорів Delfino для управління складними багатоканальними системами і приводами; двоядерних мікроконтролерів Concerto, що забезпечують незалежний обмін даними і реалізацію алгоритмів управління.

#### 3.1.1 32-розрядні мікроконтролери Piccolo

Сімейство Piccolo мікроконтролерів TMS320F2802x / 2803x / 2806x забезпечує недороге, високо інтегроване процесорне рішення, що дозволяє реалізувати управління в реальному часі з високою інтенсивністю обчислень. Процесори Piccolo можуть працювати на частотах до 80 МГц і мають до 256 кбайт вбудованої flash-пам'яті, спеціалізовані ШІМ з високою роздільною здатністю,

продуктивні АЦП, аналогові компаратори і інтерфейси обміну даними. Інтегрована підтримка операцій з плаваючою крапкою призводить до легкості реалізації складних алгоритмів. Додатковий прискорювач законів управління (Control Law Accelerator, CLA) забезпечує реалізацію ланцюгів зворотного зв'язку, незалежних від центрального процесора, і має прямий доступ до результатів перетворення АЦП і модулю ШІМ. Додатковий модуль обчислення поліномів Вітербо і виконання операцій з комплексними числами (Verterbi Complex Math Unit, VCU) дозволяє створювати PLC-додатки і значно прискорює виконання операцій з комплексними числами. Для збільшення продуктивності, і простоти використання в MCU F2806x є співпроцесор арифметики з плаваючою точкою (FPU). Наявність мікросхем в корпусах з різною кількістю висновків і з різним набором периферійних модулів забезпечує процесори сімейства Piccolo чудовою комбінацією продуктивності, інтеграції, розміру корпусів і низької вартості.

### 3.1.2 Мікроконтролери Concerto

Мікроконтролери F28M35x сімейства Concerto володіють чудовим поєднанням можливостей обміну даними і управління за рахунок комбінації ядер ARM Cortex-M3 і C2000 C28x в одній мікросхемі. MCU Concerto дозволяють таким програмам, як інвертори сонячних електростанцій і системи промислового управління, зберігати переваги незалежного обміну даними і управління за рахунок наявності двох незалежних ядер в одному кристалі. Тактова частота в MCU Concerto може досягати 150 МГц для орієнтованого на управління ядра C28x і 100 МГц для комунікаційного ядра ARM Cortex-M3. До 1 Мбайт flash-пам'яті і до 132 кбайт RAM, широкий набір інтерфейсів обміну даними, включаючи Ethernet, USB, CAN, I2C, SPI, SCI і McBSP, забезпечують низьку вартість систем, можливість сертифікації за вимогами безпеки.

### 3.2 Основні топології побудови AC / DC та DC / DC перетворювачів

Залежно від типу вхідного напруги, потужності блоку живлення, частоти перетворення і характеру навантаження використовуються різні топології побудови блоків живлення.

Технології не стоять на місці, топології вдосконалюються для збільшення ККД і поліпшення співвідношення потужність / обсяг. Такі рішення не завжди бувають вигідними за ціною і часто є більш складними в реалізації, але дають ті самі 1-5% приросту ККД, які дозволяють мати переваги на ринку. Прикладами з таких рішень є резонансний LLC-перетворювач і безмістовий ККП. На рис. 3.4 показана типова блок-схема резонансного LLC-перетворювача.

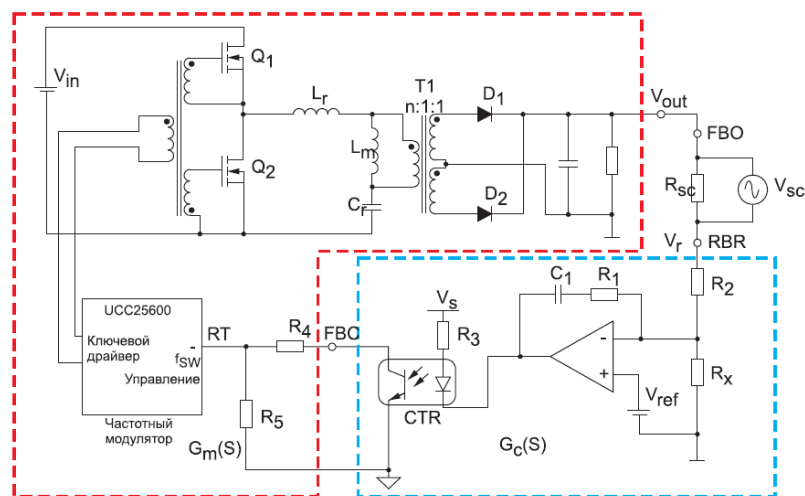


Рисунок 3.4 – Блок схема типового резонансного полумостового LLC перетворювача

Перевагами цієї топології є сприятливі моменти перемикання і, як наслідок, порівняно малі втрати потужності на силових приладах, невисокий рівень і вузький спектр перешкод, що дозволяє спростити вихідні фільтри і отримати додаткові відсотки ККД.

На рис. 3.5 показана спрощена схема безмостового ККП. За рахунок використання в випрямлячі замість двох діодів керованих резисторів на основі MOSFET в даній схемі, в порівнянні зі звичайною топологією Boost PFC, зменшуються втрати потужності.

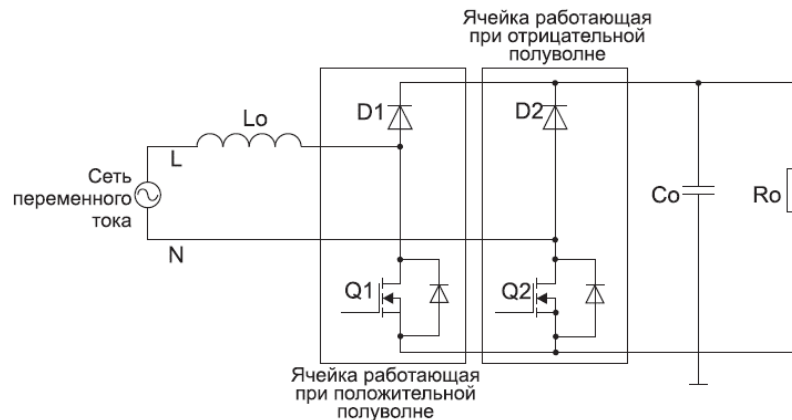


Рисунок 3.5 – Спрощена схема безмостового ККП

Для прикладу (ККП на 270 Вт), обчислення в MathCAD дають втрати 5,5 Вт в випрямному мосту і 2,26 Вт в MOSFET. При цьому ККД досягає 95,3%. У безмостовому ККП втрати є тільки в MOSFET і складають 5,18 Вт, при цьому ККД зростає до 96,1%.

### 3.3 Вибір контролера для цифрового керування ІДВЕЖ

Для побудови схем цифрового управління імпульсними джерелами живлення найбільш підходящими є цифрові сигнальні процесори (DSP) сімейства C2000 на базі ядра C28 корпорації Texas Instruments. Вони мають більшу швидкодію, невисоке енергоспоживання, хороше співвідношення ціна / продуктивність і можуть працювати в реальному масштабі часу. Для цих процесорів є велика кількість зразків розробок, програмних і апаратних засобів розробки і налагодження. Крім того, ядро C28 використовується в двоядерних мікроконтролерах сімейства Concerto, які за рахунок другого ядра Cortex-M3 мають чудові

комунікаційні можливості, що дозволяють реалізовувати управління за стандартними промисловим шинам: CAN, LIN, RS-485 і Ethernet.

### 3.4 Периферійні модулі мікроконтролерів C2000, використовувані для створення ІП з ЦУ

Для створення петлі зворотного зв'язку ІДВЕЖ з цифровим керуванням перш за все необхідні АЦП і ШІМ. Для управління одиночними ключами одноканальних джерел живлення чудово підходить модуль ШІМ з високою роздільною здатністю (HRPWM). При необхідності управляти складними багатоканальними джерелами живлення або багатофазними мостовими і напів мостовими схемами слід звернути увагу на модуль розширеного ШІМ (ePWM), який здатний виробляти складний багатофазний сигнал із загальною синхронізацією. Крім того, при побудові системи управління на мікроконтролерах C2000 для підвищення продуктивності рекомендується використовувати такі блоки, як акселератор законів управління (CLA) і блок VCU для комплексної арифметики і обчислення контрольних сум (CRC). Далі ми розглянемо кожен з цих блоків.

#### 3.4.1 Аналого-цифровий перетворювач (ADC) контролерів Piccolo

Модуль АЦП є 12разрядний конверсійний аналого-цифровий перетворювач. До його складу входять аналогові мультиплексори (MUX), два пристрої вибірки-зберігання (S / H), ядро перетворювача, стабілізатори напруги та інші аналогові схеми. Цифрова частина перетворювача містить програмований контролер послідовності вибору каналів (sequencer), регістри результату, інтерфейс до аналогових схем, інтерфейс до периферійної шини і до інших внутрішніх модулів.

Модуль АЦП має 16 каналів, які можна конфігурувати як два незалежних восьмиканальних модуля для обслуговування ePWM або використовувати

каскадне включення двох восьмиканальних модулів для отримання одного 16-канального. Кожен з восьмиканальних модулів має власну схему вибірки-зберігання, що дозволяє запам'ятовувати одночасно два вхідних аналогових сигнали. Результат перетворення запам'ятовується в одному з 16 регістрів ADCRESULTn, що відповідають обраному вхідному каналу. Незважаючи на велику кількість вхідних каналів і два контролера перетворення, в модулі АЦП є тільки один перетворювач.

АЦП має високу продуктивність, що досягає 4,5 MSPS. При використанні внутрішнього ІОН напруга на вході АЦП може змінюватися в діапазоні 0-3,3 В. При цьому цифрове значення аналогового вхідного сигналу описується формулою:

$$\{4096 * \frac{U_{\text{вх}} - ADCL0}{3,3} - 0\} \leq U_{\text{вх}} \leq 3,3 \text{ В} \quad (3.1)$$

АЦП допускає використання різних джерел сигналу запуску перетворення (start-of-conversion, SOC): програмний; запуск від ШІМ ePWM 1-6; по зовнішньому перериванню XINT2 від ліній GPIO. Гнучке управління переривань дозволяє формувати переривання по кожному сигналу кінця перетворення (end-of-sequence, EOS). Контролер вибірок може працювати в режимі «старт / стоп», дозволяючи організовувати різні «тимчасові послідовності» для синхронізації перетворення.

АЦП може працювати в режимі автоматичного перетворення. При цьому, коли АЦП приймає запит початку перетворення SOC, він може самостійно виконати кілька перетворень. Для кожного з перетворень за допомогою аналогового мультиплектора MUX може бути обраний один з 16 доступних вхідних каналів. Після перетворення цифрове значення сигналу в обраному каналі записується до відповідного регістру результату (ADCRESULTn). Сигнал одного каналу можна обробляти кілька разів поспіль, що дозволяє підвищити роздільну здатність в порівнянні з одноразовим перетворенням.

Вибір каналів АЦП для перетворення здійснюється за допомогою спеціального контролера, який складається з двох незалежних контролерів на

вісім станів (SEQ1 і SEQ2). Контролер вибірок АЦП може працювати в режимі одночасної вибірки (В конфігурації  $2 \times 8$  вибірок) або послідовної вибірки. Для кожного перетворення поточне значення бітового поля CONVxx визначає висновок, для якого будуть здійснюватися вибірка і перетворення. За послідовної вибірки всі чотири біта CONVxx визначають вхідний висновок. Старший біт (MSB) визначає, яка з двох схем ПВЗ буде використана для вибірки сигналу, а три молодших біта (LSB) задають зміщення (номер каналу). У режимі безперервного перетворення MSB регістра CONVxx не використовується. Кожна схема ПВЗ вибирає сигнал з виведення, що задається значенням трьох молодших бітів (LSB) регістра CONVxx.

### 3.4.2 Широтно імпульсні модулятори ePWM і HRPWM

У процесорах сімейства C2000 є два типи ШІМ: з високою роздільною здатністю (HRPWM) і розширений (ePWM). HRPWM можна використовувати для управління одноканальним однотоктним прецизійним перетворювачем. ePWM, який має кілька комплементарних пар каналів, що допускають роботу в синхронному режимі, можна використовувати для управління складними багатоканальними джерелами живлення або багатofазними мостовими і напівмостовими схемами.

Периферійний модуль ePWM використовується для виконання функції, яка математично еквівалентна цифро-аналоговому перетворенню (ЦАП).

Модуль HRPWM Якщо необхідна частота роботи ШІМ не забезпечує достатнє розширення, то може виникнути необхідність використовувати ШІМ з високою роздільною здатністю (HRPWM). Хоча додатки можуть відрізнятися один від іншого, для типового значення нижньої частоти роботи ШІМ (менше 40 кГц) може не знадобитися HRPWM. Можливості HRPWM найбільш затребувані в високочастотних ШІМ, необхідних для наступних топологій перетворення потужності:

- однофазні знижувальні (buck), що підвищують (boost) і зворотноходового (flyback);
- багатofазні понижуючі (buck), що підвищують (boost) і зворотноходового (flyback);
- мостові із зсувом фаз;
- підсилювачі класу D з безпосередньою модуляцією.

Робота HRPWM заснована на технології мікропозиціонування фронту (MEP). Логіка MEP може здійснювати дуже точне позиціонування фронту імпульсу шляхом ділення ширини тактового імпульсу звичайного ШІМ-генератора на рівні частини. При такому розподілі точність тимчасового кроку може досягати 150 пс. Модуль HRPWM має також режим програмної самодіагностики для перевірки оптимальності роботи логіки MEP для всіх робочих умов.

Для налаштування HRPWM спочатку потрібно конфігурувати регістри TVM, CSM і AQM, неначе необхідно згенерувати звичайний ШІМ-сигнал заданої частоти і полярності. Після того як ePWM налаштований, щоб задати частоту і полярність сигналу звичайного ШІМ, HRPWM конфігурується шляхом програмування регістра HRCNFG, розташованого за адресою зміщення 20h. Цей регістр забезпечує налаштування для наступних ключових режимів роботи:

- Режим фронту (Edge Mode). MEP програмується, щоб забезпечити прецизійне управління становищем наростаючого фронту (RE), спадаючого фронту (FE) або одночасно обох фронтів (BE). Режими FE і RE використовуються для топологій джерел живлення, в яких необхідно управляти шириною імпульсів, в той час як режим BE використовується для топологій, в яких необхідний фазовий зсув, наприклад мостових схем із зсувом фаз.

- Режим управління (Control Mode) MEP програмується для керування від регістра SMPANR (управління коефіцієнтом заповнення) або від регістра TVPHSHR (управління фазою). У режимі управління RE або FE використовується регістр SMPANR. У режимі управління BE використовується регістр TVPHSHR.

- Тіньовий режим (Shadow Mode). Цей режим забезпечує деяку функцію затінення (подвійний буферизації), як і стандартний режим ШІМ. Ця функція допустима тільки при роботі від регістра SMPAHR і повинна вибиратися такою самою, як функція звичайного завантаження регістра SMPA. При використанні TVPHSHR ця установка не має сили.

В режимі високої роздільної здатності MЕР неактивний для 100% періоду ШІМ. Він стає працездатним:

- через три такти частоти SYSCLK після початку періоду при вимкненій діагностиці;

- через шість тактів частоти SYSCLK після початку періоду при включеній SFO діагностиці.

Ці обмеження встановлюють межу на мінімальний коефіцієнт заповнення MЕР. Наприклад, прецизійне управління недоступне при коефіцієнті заповнення, що наближається до 0%. Хоча для перших трьох або шести тактів можливості HRPWM недоступні, звичайне управління коефіцієнтом заповнення залишається можливим аж до значення 0%. У більшості додатків це не повинно викликати труднощів, оскільки зазвичай система управління не проектується для роботи з коефіцієнтом заповнення, близьким до 0%.

Якщо для програми необхідна робота HRPWM в області коефіцієнта заповнення, близького до нуля, то HRPWM можна конфігурувати для роботи в віднімаючому (Count-Down) режимі з управлінням становищем наростаючого фронту (REP) за допомогою MЕР при відключеній функції формування періоду з високою роздільною здатністю ( $HRPCTL [ HRPE ] = 0$ ). У цьому випадку обмеження на мінімальне значення коефіцієнта заповнення не викликає більше ускладнень. Однак тепер буде обмеження на максимальне значення коефіцієнта.

### 3.4.3 Програма оптимізації масштабних коефіцієнтів (SFO) для МЕР

Логіка мікропозиціонування фронту (МЕР) дозволяє розташовувати фронт на одному з 255 тимчасових кроків. Розмір цих кроків може бути 150 пс і може залежати від умов роботи мікросхеми, таких як температура кристала і напруга живлення: збільшується при зменшенні напруги живлення і зростанні температури і зменшується при збільшенні напруги живлення і зниженні температури. Функції SFO допомагають динамічно визначати кількість кроків МЕР в періоді частоти SYSCLKOUT при роботі HRPWM.

Кожен модуль HRPWM має вбудовані функції самокалібрування і самодіагностики, які можна використовувати для визначення оптимального значення МЕР\_SF при будь-яких умовах функціонування. Багатофазна архітектура ШІМ дозволяє на апаратному рівні реалізовувати схеми управління напівмостовими, мостовими і багатофазними інверторами.

Багатофазна архітектура ШІМ дозволяє на апаратному рівні реалізовувати схеми управління напівмостовим, мостовим і багатофазним інверторами (рис.3.6, 3.7, 3.8).

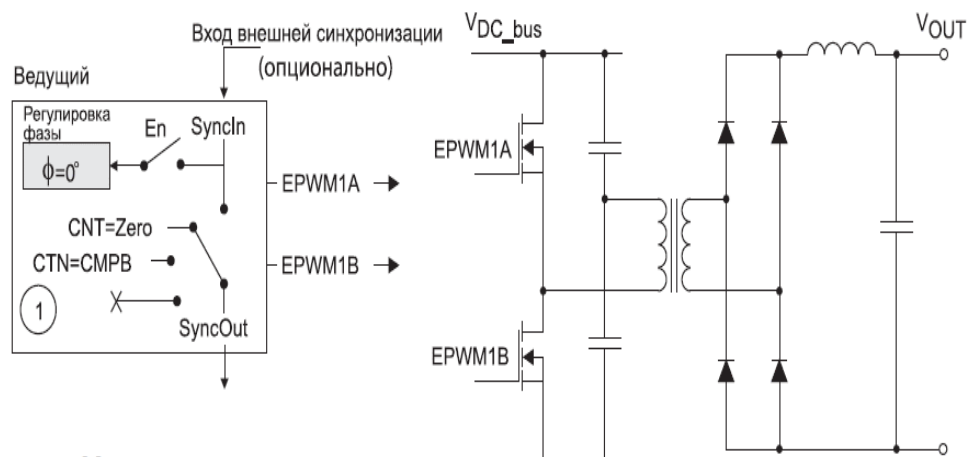


Рисунок 3.6 - Управління напівмостовим інвертором

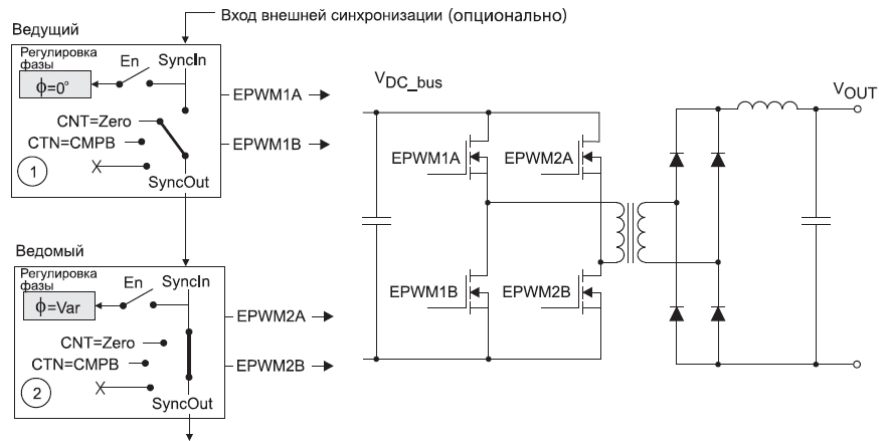


Рисунок 3.7 - Управління мостовим інвертором

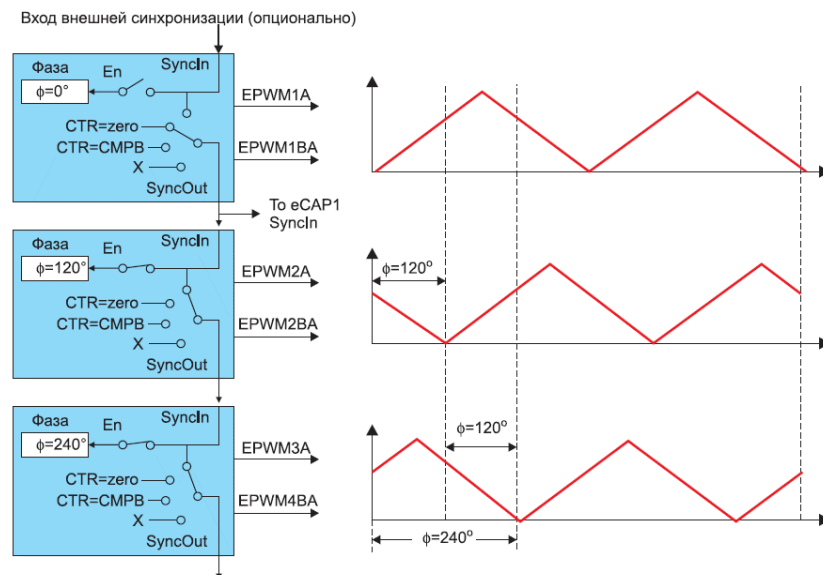


Рисунок 3.8 - Управління багатозафазним інвертором

Багатоканальні ШІМ у багатьох виробників прив'язані до одного лічильника, і тимчасові діаграми виходять тільки за рахунок різних порогів спрацьовування цифрових компараторів. У мікроконтролерів ТІ кожна комплементарна пара виходів має власний лічильник, причому всі вони можуть працювати як в синхронному, так і в незалежному режимі. Таке рішення, зокрема, дозволяє надійно формувати імпульси запуску перетворення для модулів АЦП.

### 3.4.4 Технологія Trip-Zone

Для обмеження струму і відключення виходів ШІМ при аварійних ситуаціях служить технологія Trip-Zone, яка дозволяє регулювати ширину імпульсів або переводити виходи ШІМ в заздалегідь заданий програмний стан за допомогою сигналів, що подаються на спеціальні висновки. Ці сигнали безпосередньо керують роботою ШІМ, минаючи процесорне ядро, що забезпечує мінімальний час реакції на зовнішні події. За умовами виникнення аварійної ситуації формується переривання, яке дозволяє здійснювати програмну обробку позаштатної ситуації.

При використанні процесорного управління ШІМ затримки, пов'язані з обробкою переривань, не дадуть можливості вчасно перевести ключі в безпечний стан. Trip-Zone має швидкий незалежний від тактування шлях для перекладу комплементарних виходів EPWMxA / B в заданий стан. Trip-Zone підтримує одиначне спрацьовування і очікування відпрацювання програми для визначення подальших дій (режим One-Shot) і спрацьовування в кожному циклі для режиму обмеження струму (режим Cycle-by-Cycle).

Сигнал на вхід Trip-Zone може подаватися з вбудованих аналогових компараторів. Сигнал на компаратор може заводитися, наприклад, з датчика струму, а опорною для нього може служити вбудований в Piccolo 10-бітний ЦАП. Це дозволяє програмно міняти пороги спрацьовування струмообмеження або струмового захисту, збільшуючи гнучкість рішення і в той же час зменшуючи кількість зовнішніх компонентів. Таких компараторів в Piccolo може бути до трьох штук. Мікроконтролери C2000 мають додаткові периферійні модулі, що прискорюють виконання алгоритмів управління. Далі дається їх короткий огляд.

### 3.4.5 Акселератор законів управління (CLA)

Модуль CLA виконує критично важливі за часом алгоритми управління паралельно основному ядру C28x і має керовану перериваннями архітектуру, яка може обробляти переривання від АЦП, ШІМ і таймера, має низький час відгуку і забезпечує просте читання «миттєвого» результату АЦП. CLA зменшує затримки вхід / вихід (jitter), забезпечує швидке виконання алгоритмів управління, покращує стійкість системи управління і звільняє ядро C28x для інших завдань (обмін даними, моніторинг).

### 3.4.6 Модуль VCU

VCU служить для прискорення складних математичних розрахунків і містить три основні блоки:

- Модуль роботи з поліномами Вітербо (VU). Використовується при фільтрації шуму для комунікаційних стандартів і оптимізований для Вітербо-декодування, відстеження апаратних помилок. Модуль дає 7,5-кратний виграш при згортанні матриць і в п'ять разів швидше відстежує помилки.

- Арифметичний блок (AU). Корисний для швидкого перетворення Фур'є. Підтримує операції з комплексної арифметики і розрахунок  $N$ . На множення двох комплексних чисел необхідно всього два такти і один такт для їх складання. Забезпечує триразове прискорення для 16-розрядної швидкого перетворення Фур'є.

- Блок CRC (CU). Використовується для верифікації даних. Може обчислювати CRC8, CRC16 і CRC32 для даних, що знаходяться в пам'яті. Виробляє побайтний розрахунок CRC і забезпечує 25-кратне збільшення продуктивності при апаратних розрахунках в порівнянні з програмними з підтримкою цілісності даних.

### 3.5 TI controlSUITE

Мікроконтролери TMS320C2000 широко використовуються в системах живлення з ЦУ - від блоків живлення телекомунікаційної апаратури до неізольованих DC / DC перетворювачів джерел відновлюваної електроенергії, таких як сонячні і вітрові електростанції і в гібридних електромобілях.

Мікроконтролери C2000 оптимізовані для використання в керуючих системах реального часу, таких як цифрові джерела живлення, за рахунок інтегрованого швидкодіючого АЦП і розширеної технології генерації ШІМ-сигналів спільно з високопродуктивним 32-розрядним центральним процесором. ШІМ C2000 дозволяє встановлювати параметри модуляції з точністю 150 пс і має гнучкість для підтримки будь-яких топологій силової східці ІДВЕЖ. Для найбільш повного використання можливостей мікроконтролерів C2000 корпорація TI розробила пакет controlSUITE.

Безкоштовне програмне забезпечення для роботи з апаратними засобами мікроконтролерів реального часу C2000 controlSUITE є комплексний набір елементів програмної інфраструктури та програмних засобів, які значно скорочують час розробки програмного забезпечення. Пакет controlSUITE включає всі необхідні інструменти, починаючи з бібліотек драйверів для різних пристроїв і допоміжних програмних модулів і закінчуючи повноцінними типовими прикладами для складних системних додатків, які можуть використовуватися на всіх етапах розробки та оцінки програмного забезпечення.

Висновки по розділу:

- розглянуто призначення основних структурних складових цифрових ДЕЖ, які дозволяють вирішувати широке коло задач керування;
- багатофазна архітектура ШІМ на базі мікроконтролера або ПЛІС дозволяє на апаратному рівні реалізовувати схеми управління інверторів, побудованих за різними топологіями, зокрема, напівмостовими, мостовими, резонансними,

багатофазними і т.ін. В той же час, побудова ДЕЖ за допомогою аналогових схем керування потребує застосування окремих спеціалізованих контролерів для кожної топології;

- застосування цифрових методів керування дозволяє підвищити частоту комутації силових ключів інверторних схем, що дозволяє зменшити масогабаритні показники ДЕЖ.

## ВИСНОВКИ

За результатами дослідження характеристик і варіантів побудови ДЕЖ з цифровим керуванням, проведеного в атестаційній роботі можна зробити наступні висновки:

- основними перевагами, які обумовлюють стрімке зростання цього сегменту ринку джерел живлення є їх висока ефективність, гнучкість, можливість відпрацювання складних алгоритмів включення живлення, здатність відповідати складним технічним вимогам;

- застосування в колах керування ДЕЖ цифрових сигнальних процесорів (DSP) дозволяє здійснити керування будь-яким варіантом побудови інвертора, а також, наприклад, дослідити температурні режими роботи основних силових елементів схеми, шляхом впровадження цифрових датчиків температури, і з подальшим корегуванням режимів керування;

- мікроконтролери забезпечують цифрову обробку сигналів для реалізації частотно-імпульсного та широтно-імпульсного управління і створення необхідних зворотних зв'язків в контурах керування; формування сигналу управління пусковим струмом; захист від перегріву, перенапруги, перевантаження за струму тощо;

- недоліком ЦДЕЖ, що стримує їх масове розповсюдження є відносно більша вартість порівняно з аналоговими варіантами керування, тому їх застосування доцільно при жорстких вимогах до параметрів ДЕЖ, або якщо вони експлуатуються в умовах широкого діапазону змін зовнішніх факторів, таких як температура, опір навантаження, вхідна напруга тощо.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Вукічевич М. Цифрово-контрольований напівринок електроенергії наблизиться до 1 мільярда доларів до 2001 року // Проектування енергосистеми.2008. Березень.
2. Мелешин В., Овчинников Д. Застосування мікропроцесорів в системах управління транзисторних випрямлячів // Силова електроніка.2005. № 4.
3. Гладштейн М. Нові інтегральні компоненти для імпульсних силових перетворювачів // Електронні компоненти.2006. № 6.
4. Мікроконтролери та управління імпульсними джерелами живлення. Впровадження повністю цифрового контуру управління // CHIP NEWS.2007. № 7.
5. Звонарев Е. Контролери Texas Instruments для цифрових джерел живлення // Електронні компоненти.2007. № 9.
6. Кріс Б. Цифрове управління перетворенням напруги // Електронні компоненти.2007. № 11.
7. К. Мікросхеми Digital Power для побудови каскадів електроживлення з цифровим управлінням. Частина 1 // Електронні компоненти.2008. № 9.
8. К. Мікросхеми Digital Power для побудови каскадів електроживлення з цифровим управлінням. Частина 2 // Електронні компоненти.2008. № 10.
9. Дювінейдж Ф. Використання мікроконтролерів для забезпечення ефективного управління великими комп'ютерними системами // Електронні компоненти.2007. № 9.
10. Вукічевич М. Енергетична криза - не проблема цифрового управління енергією // Проектування енергетичних систем Європи.2006 рік.
11. Куїнн С. Керування інтелектуальним перетворенням електроенергії // ElectronicsWeekly. 2008. № 2359.

12. Печі Л. Цифрова перетворення потужності відкриває двері до цифрового керування електроенергією // Power Electronics Europe. Випуск 7. листопада 2006 року.
13. Le Fèvre P. Times New Roman від цифрової плутанини до цифрової конверсії // Power Electronics Europe. Випуск 7. листопада 2006 року.
14. Le Fèvre P. Цифрові методи силових модулів // EPN. 2008. № 11.
15. Баоксін Чен. Переваги ізоляції мікротрансформаторів Цифрове управління // Технологія силової електроніки для інженерів, дизайнерів та інтеграторів. 2008. Жовтень. Вип. 34. № 10.
16. Владимиров Е., Ланцов В. Імпульсні джерела живлення великої потужності з мікропроцесорним управлінням // Сучасна електроніка. 2009. № 1.
17. Гудіноф Ф. Інтегральні схеми управління імпульсними джерелами живлення // Електроніка. 1989. № 23.
18. Тухас В. А., Прожідаєв С. В., Ейнтроп С. А. Вимірювання флікерів і гармонійних складових струму // Технології ЕМС. 2002. № 3.
19. Білий Роберт В. Вбудовані енергетичні лабораторії. Цифрова потужність: після ажіотажу // Конференція та виставка прикладної електроніки, 22 лютого 2010 року.
20. Рако Пол. Унікальний, недорогий підхід до проектування електроживлення // EDN Global Innovators, 13 листопада 2008 р., С. 24.
21. Рако Пол. ІС-контролер Quad-PWM включає лінійний регулятор з низьким рівнем випадку // EDN, 15 грудня 2009 р., С. 12.
22. Піс Боб. Що все-таки це нечітка логічна штука? (Частина V) // Електронний дизайн, 20 листопада 2000 р.
23. Рако Пол. Інтеграція в іншому напрямку // EDN, 21 січня 2010, с. 24.
24. Рако Пол. Четверний контролер перетворювача потужності використовує PMBus // EDN, 3 грудня 2009 р., Стор. 11.
25. Мікроконтролюючий чіп-перетворювач Raiko Paul Paul використовує PMBus // EDN, 8 жовтня 2009 р., С. 7.

26. 32-бітні мікроконтролери C2000в режимі реального часу.[http://www.ti.com/llds/ti/microcontroller/32bit\\_c2000/overview.page](http://www.ti.com/llds/ti/microcontroller/32bit_c2000/overview.page)(дата звернення 15.11.2019 )
27. SPRU812.TMS320x2833x, 2823x аналого-цифровий перетворювач (АЦП).Довідковий посібник.[http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber = spru 812 & track = no](http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=spru812&track=no)(дата звернення 15.11.2019)
28. SPRUG02.TMS320x2833x, 2823x модулятор ширини імпульсу високої роздільної здатності.Довідковий посібник.[http://www.ti.com/lit/ug/sprug02b/ sprug02b.pdf](http://www.ti.com/lit/ug/sprug02b/sprug02b.pdf)(дата звернення 18.11.2019)
29. SPRUG04.TMS320x2833x, 2823x модуль посиленої імпульсної ширини (ePWM).Довідковий посібник.[www.ti.com/lit/ug/sprug04a/ sprug04a.pdf](http://www.ti.com/lit/ug/sprug04a/sprug04a.pdf)(дата звернення 21.11.2019)
30. SPRUGE6B.TMS320x2803x Piccolo Control Accelerator Law (CLA).Довідковий посібник.[http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/lit/getliterature.tsp? literature-Number = spruge6b & fileType = pdf](http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=spruge6b&fileType=pdf)(дата звернення 27.11.2019)
31. SPRC530.Файли заголовків C2833x / C2823x C / C ++ та периферійні приклади.[http://www.ti.com/ tool / sprc530](http://www.ti.com/tool/sprc530) (дата звернення 29.11.2019)
32. SPRUFB8.TMS320x2833x, 2823x прямий доступ до пам'яті (DMA).Довідковий посібник.[http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp? baseLiteratureNumber = SPR UFB8 & fileType = pdf](http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SPRUFB8&fileType=pdf)(дата звернення 29.11.2019)
33. SLUA622.Приклад цифрового циклу.[http:// www.ti.com/general/docs/lit/getlit-erature.tsp?literatureNumber = slua622 &fileType = pdf](http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=slua622&fileType=pdf)(дата звернення 30.11.2019)
34. SLUA582A.Зворотний зв'язок Дизайн резонансного перетворювача живлення ТОВ.[http://www.ti.com/ general / docs / lit / getliterature.tsp? literatureNumber = slua582a&fileType = pdf](http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=slua582a&fileType=pdf)(дата звернення 01.12.2019)
35. SLUA517.UCC28070 Виконайте конструкцію попереднього регулятора корекції безконтактного фактора живлення (PFC).<http://www.ti.com.cn/general/cn/>

docs / lit / getliterature.tsp? literatureNumber = slua517 &fileType = pdf(дата звернення 01.12.2019)

36. Порівняння базових топологій перетворювача для виправлення фактора потужності.Хуайвей.<http://floridaprec.engr.ucf.edu/publications/> конференції / ieee\_se / conf\_ten.pdf(дата звернення 29.11.2019)
37. controlSUITE.<http://www.ti.com/ww/ru/embedded/controlsuite/index.html>(дата звернення 29.11.2019)