

Скрипченко О.В.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

У статті проаналізовано особливості роботи зарядного пристрою під час навантаження на суперконденсатор з високими значеннями зарядного струму. Побудовано фізичний макет схеми, що працює від мережі. Показано, що за умов досягнення високих значень коефіцієнта заповнення зарядний пристрій працюватиме в режимах температурного максимуму. На прикладі побудованого пристрою визначено регульовальні характеристики, які забезпечать режим безперервного струму. В ході виконаних дослідів встановлено, що за збільшення коефіцієнта заповнення порушується температурний режим роботи. Надано рекомендації щодо встановлення додаткових монтажних кріплень на окремі силові каскади схеми.

Ключові слова: зарядний пристрій, акумулятор, DC-DC-перетворювач, режим безперервного струму, іоністор, stm32.

Постановка проблеми. В сучасному світі актуальними проблемами є автономне енергозабезпечення та енергоефективність різноманітних систем електроживлення. Запровадження з недавнього часу суперконденсаторів як джерел живлення електричної апаратури та машин набуває все більшого поширення за свої переваги перед літєвими акб, такими як високі пускові струми, порівняно невеликі втрати енергії в режимі очікування, відсутність ефекту старіння, відсутність зменшення повної ємності навіть після 100 000 циклів заряду-розряду, можливість заряджання та розряджання іоністорів великими струмами. Для таких видів зберігання енергії може бути використана система заряджання надвисоких струмів, що зменшить час заряду в десятки разів порівняно зі звичайними АКБ. Зазначене сформулоало необхідність розроблення високоефективних перетворювачів напруги для перетворення отриманої від альтернативних джерел змінної напруги мережі на стандартизовану постійну напругу.

Під час використання суперконденсаторів як накопичувачів енергії бажано застосовувати спеціалізовані мікросхеми. Сучасні суперконденсатори мають ємність до 100 Ф, але їх робоча напруга не перевищує 2,7 В. Оскільки більшість систем вимагає вищої напруги живлення, багато суперконденсаторів представлені як пара паралельно з'єднаних в батарею елементів в єдиному корпусі з додатковим виводом із загальної точки [2].

Концепція створюваного перетворювача передбачає перетворення напруги мережі альтернативних джерел на постійну напругу з можливістю повернення невикористовуваної енергії до лінії. Керу-

вання роботою ключового транзистора перетворювача здійснюється за допомогою плати stm32 nucleo.

Постановка завдання. Метою статті є вибір та створення кращої топології схеми заряду іоністорів, що забезпечить високий за значенням струм навантаження, характерними рисами якої виступатимуть відносна простота конструкції та собівартість.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Аналіз наявних топологій схем.

Загалом існує багато різних топологій схем. Розроблення зарядного пристрою підпорядковує умову заряджання від мережі змінної напруги 220В. Для заряджання слід перетворити вхідні параметри на необхідні для досягнення умови задачі.

Оскільки розроблення передбачає практичну реалізацію в кінцевий пристрій, питання вибору перетворювача напруги є ключовим, який за своїми характеристиками, ціною та масо-габаритами найкраще буде підходити до поставленої задачі.

Розглянувши популярні топології силових перетворювачів, таких як зворотноходовий, прямоходовий, мостовий, напівмостовий і резонансний, можемо для кожної з них зазначити галузі застосування.

Основними параметрами імпульсних перетворювачів є такі.

1) Діапазон вхідних напруг. На жаль, завжди є обмеження не тільки на максимальну, але й на мінімальну вхідну напругу. Значення цих параметрів завжди вибирається з деяким запасом [3].

2) Діапазон вихідних напруг. Через обмеження на мінімальну та максимальну тривалість імпульсу діапазон значень вихідної напруги обмежений [1].

3) Максимальний вихідний струм. Цей параметр може бути обмежений цілою низкою чинників,

зокрема максимально допустимою потужністю розсіювання, кінцевим значенням опору силових ключів.

4) Частота роботи перетворювача (кГц). Чим вище частота перетворення, тим простіше зробити фільтрацію вихідної напруги. Це дає змогу боротися з перешкодами та знижувати значення номіналів елементів зовнішнього L-C-фільтра, що приводить до збільшення вихідних струмів та зменшення габаритів. Однак зростання частоти перетворення збільшує втрати на перемикання силових ключів і збільшує індуктивну складову перешкод, що явно є небажаним для тривалої роботи перетворювача за великих значень струму [3].

5) Інші параметри (опір каналів інтегральних силових ключів (мОм), власний струм споживання (мкА), тепловий опір корпусу тощо). Вони є менш важливими, але їх також слід враховувати.

Для зворотногоходових перетворювачів характерні такі особливості, як простота побудови та низька собівартість схеми за невеликих потужностей. За досягнення високих показників струму навантаження через ключовий транзистор первинної обмотки на навантаженні спостерігається пульсація напруги, що не є бажаним за повного заряду іоністорів, тим більше тих, що послідовно з'єднані. В таких схемах дуже високими є вимоги до вхідного конденсатора та самого транзистора.

Прямоходовий перетворювач спрямований на живлення побутової апаратури низької потужності, що також не задовольняє умови задачі.

Резонансний перетворювач, маючи таку перевагу, як висока робоча частота, малі габарити та простота фільтрації завад на навантаженні, краще підходить для живлення моніторів комп'ютерів, TV та іншої техніки з вимогами до високочастотної розгортки [4].

Двотактна схема, як і напівмостова, вирізняється порівняно зменшеними рівнями завад, що не є принциповим для розроблення схеми, а якщо вона має більшу кількість елементів, то надійність зменшена, собівартість збільшена, рівень ККД є не дуже високим, що підпорядковує використання монтажних елементів охолодження [5].

Підсумовуючи все вищесказане, можемо сказати, що понижувальний перетворювач DC-DC разом з випрямлячем на силовому трансформаторі, діодним мостом та фільтруючим конденсатором є кращим вибором за такими параметрами, як необхідна потужність до 500 Вт за великого струму навантаження, відносна простота топології перетворювача, високий ККД самого перетворювача, краща завадостійкість порівняно з імпульсними джерелами жив-

лення. Серед недоліків такої установки слід назвати низький ККД силового трансформатора, підвищені вимоги до фільтруючого конденсатора, порівняно великі масогабарити пристрою.

Перетворювачі напруги/струму мають вхідний каскад, який складається з трансформатора, випрямляча та фільтруючих елементів. Цей каскад бере участь у перетворенні вхідної синусоїдальної напруги мережі, трансформатор понижувального типу змінює напругу мережі на вихідну понижену синусоїдальну із середнім значенням струму 3,4 А. Випрямляч віднімає негативні імпульси, а фільтр у його складі випрямляє напругу, струм, які поступають на регулюючий елемент, що підпорядкований системі керування. Саме вона визначає те, яку модуляцію треба синхронізувати на навантаження. На рис. 1 показана функціональна схема перетворювача. Регулюючим елементом є блок ШІМ. Він регулює скважність імпульсів, коефіцієнт їх заповнення на виході. Форма імпульсів задається із системи керування. Вона є мікроконтролером на базі STM та колом зворотного зв'язку. Оскільки деякі мікроконтролери мають широкі можливості, включаючи широтно-імпульсну модуляцію, аналогово-цифрові перетворювачі високої точності, операційні підсилювачі напруги, доцільно вибирати саме такі із сімейства STM. Вони значно зручніші під час кодування на мовах високого рівня завдяки об'єднанню багатьох блоків в один, зменшують ефективну площу плати, мають менші показники тепловиділення, споживання енергії. Коло зворотного зв'язку включає 2 блоки датчиків струму та напруги. Воно призначене для відслідковування вхідної напруги та струму іоністорів для запобігання перезаряду та високого нагріву. За надто високих показників, зазначених в прошивці мікроконтролера, останній керує блоком ШІМ, згодом зменшується коефіцієнт заповнення імпульсів, отже, середні показники струму, напруги, що поступають на навантаження.

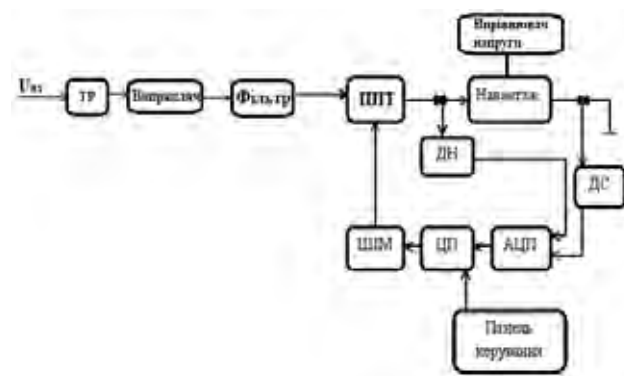


Рис. 1 Функціональна схема понижуючого перетворювача напруги

Знімання вимірювальної напруги, розміщене перед навантаженням, є шунтом, з якого знімаються показники, які через дільник напруги надходять в АЦП мікроконтролера. Датчик струму розташований на мінусовому виводі навантаження також до АЦП. Отже, система керування на рис. 1 є STM-мікроконтролером, який включає такі блоки, як блок ШІМ, центральний процесор, аналогово-цифровий перетворювач. Також до мікроконтролера в АЦП надходить інформація про стан навантаження (коло зворотного зв'язку). Зарядний пристрій складається з двох основних топологій електричних схем, а саме понижувального перетворювача DC-DC, діодного мостового перетворювача напруги. Останній має три основних компоненти. Першим вхідним компонентом є силовий трансформатор, який понижує вхідну синусоїдальну напругу з 220 В на 15 В. На рис. 2 показана принципова схема зарядного пристрою. Другим компонентом вхідного каскаду є діодний міст (VD2-VD5), перетворюючий напругу на вторинній обмотці Tr1 на імпульсну. Імпульсна напруга згладжується фільтруючим конденсатором C1 відповідної ємності. Понижуючий перетворювач DC-DC умовно поділений на силову частину та частину керування. Силова частина перетворювача складається з ключового транзистора VT2, який, працюючи в імпульсному режимі, регулює напругу навантаження. Дросель відповідної індуктивності та параметрів протікаючого струму, встановлений після транзистора, виконує роль накопичувача енергії. Під час відкритого стану транзистора VT2 струм, що протікає через дросель L1 на навантаження, накопичується в

ньому до межі насичення. Під час закриття транзистора каскад перестає отримувати живлення від мережі, а єдиним джерелом живлення залишається дросель, який розряджається на навантаження.

Для цього встановлений зворотній діод VD1, який утворює електричне коло під час вимкненого VT2. Навантаження представлено у вигляді двох послідовно з'єднаних конденсаторів високої ємності C6, C7. Для вирівнювання напруги на конденсаторах паралельно встановлені резистори високого опору R17, R18. Система керування складається з мікроконтролера STM32 (значно спрощує систему керування перетворювача за собівартості 54 грн. за модель STM32F103C8T6), системи зворотного зв'язку щодо напруги, виконаної на базі, двох послідовно з'єднаних резисторів, паралельно підключених до навантаження R3, R4. Для корекції значень струму навантаження встановлений шунт, виконаний на базі низькоомного резистора R5. Для усунення завад під час зчитування даних напруги, струму зворотного зв'язку встановлені конденсатори низької ємності C3, C4. Для живлення мікроконтролера має бути встановлено лінійний стабілізатор напруги у вигляді мікросхеми VR1, яка за допомогою допоміжних дільників напруги R11, R12 живить STM32. Під час заряду суперконденсаторів до напруги 3,2 В мікроконтролер дасть сигнал про закриття ключового транзистора, отже, заряджання буде припинено. Причому задля усунення перенапруги струм навантаження зменшується за ступенем заряду іоністорів. Так, за напруги 2,6 В на навантаження скважність становить 60%, відповідно, струм

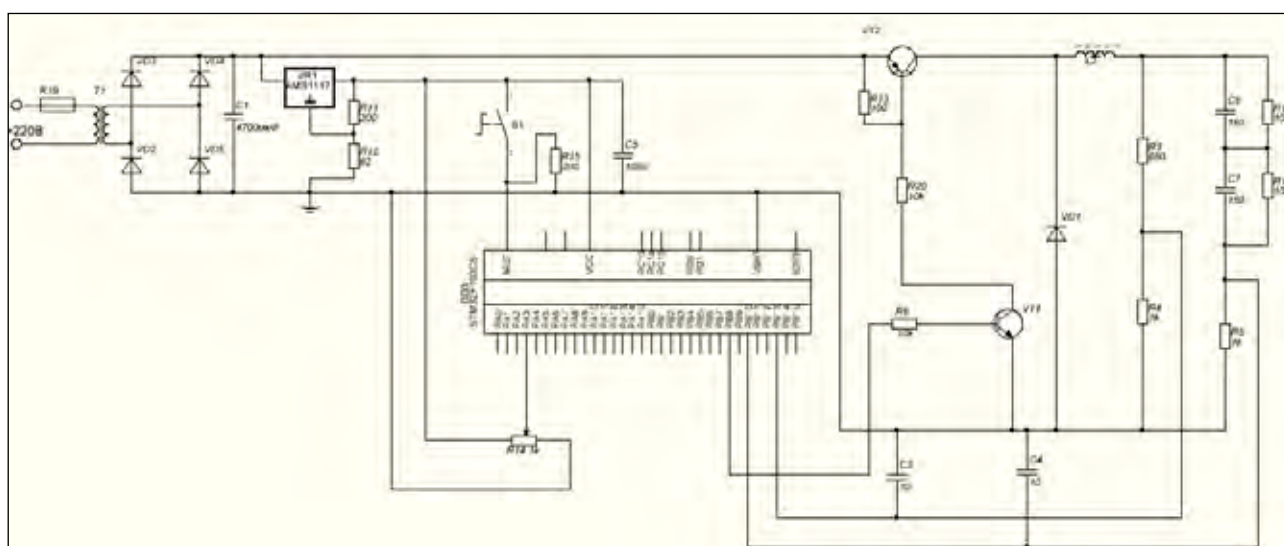


Рис. 2. Принципова схема зарядного пристрою

становить 1,2 А, за 3 В – 90%, відповідно, 300 мА до повного заряду. Перемикач S1 є кнопкою перезавантаження мікроконтролера. Резистор R14 виконує функцію реостату. Змінюючи опір на резисторі, можемо регулювати струм навантаження. Передусім це необхідно задля виконання граничних умов заряджання деяких гібридних суперконденсаторів, які мають спеціальний подвійний електричний шар, а за хімічної будови їм притаманні особливості звичайних літієвих батарей. В таких іоністорах є обмеження у значеннях максимального струму заряджання. Завдяки АЦП перетворений сигнал надходить на ОП, де згодом зчитується ЦП, регулюється скважність імпульсів ключового транзистора. Розрядність АЦП у 12 біт є достатнім показником для точного зчитування напруги навантаження. За бажання задля отримання більш точних даних з навантаження в коло зворотного зв'язку може бути встановлений компаратор, працюючий тільки від додатної напруги +5В, виконуючий роль підсилення вихідного сигналу, завдяки чому регулювання буде більш точним. Транзистор VT1 виконує функцію драйвера.

Оскільки мікроконтролер не може подавати на базу транзистора негативні імпульси, доцільно встановити драйвер, який є ррп-транзистором, колектор якого під'єднаний до бази транзистора VT2, а емітор – до землі.

На рис. 3 показана схема включення ключового транзистора.

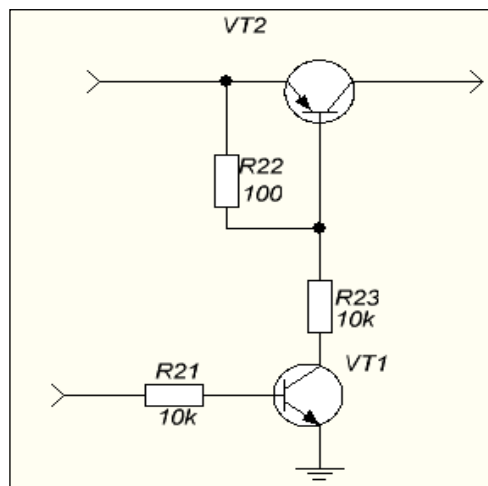


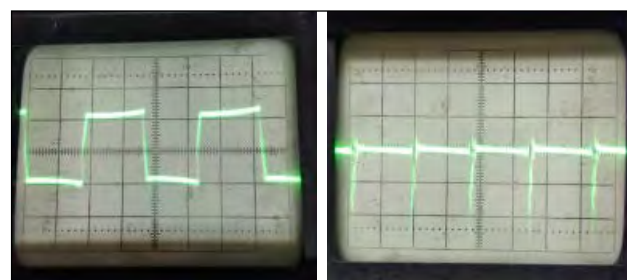
Рис. 3. Схема включення ключового транзистора

Коли пін порта stm32 подає додатний імпульс, відкривається перехід база-емітор на транзисторі VT1, створюється різниця потенціалів між VT1 та вхідним ланцюгом, що викликає відкриття VT2. Чим більше величина індуктивності, тим вище максимальний вихідний струм через зниже-

ний струм пульсацій. Чим нижче індуктивність, тим менше габарити пристрою. Зауважимо, що котушка повинна завжди мати номінальний струм вище максимального струму, тому що струм збільшується під час зменшення індуктивності. Якщо не зазначено діапазон індуктивностей, можна скористатися таким рівнянням (1), яке досить точно оцінює величини індуктивності:

$$L = \frac{V_{in}(V_{out} - V_{in})}{\Delta I_L f_s V_{out}} \quad (1)$$

де $V_{in}(\min)$ – мінімальна вхідна напруга, V_{out} – задана вихідна напруга, f_s – мінімальна частота комутації перетворювача (задаємо 1 кГц), ΔI_L – приблизна величина струму пульсацій котушки (див. нижче). Струм пульсацій котушки індуктивності можна розрахувати, оскільки індуктивність невідома. Струм пульсацій котушки індуктивності можна оцінити як такий, що приблизно дорівнює величині 20–40% від вихідного струму. Перетворювач розсіює потужність, а розрахунок з урахуванням ККД дає змогу отримати більш реальне значення коефіцієнта заповнення. Виходячи з мінімальної індуктивності дроселя та середнього струму дроселя, вибираємо дросель CDEP147 з такими параметрами: $L_{др} = 471$ мкГн; $I_{Lcp} = 1,5$ А; $R_L = 0,1$ Ом.



а)

б)

Рис. 4. Плата, використана для перевірки схеми: а) за к. з. 60%; б) за к. з. 95%

Дослідження побудованої схеми, яка зображена на рис. 4, 5, проведені в умовах лабораторного стенду. Як основа був використаний корпус блока живлення формату ATX персонального комп'ютера. Для зниження амплітудного значення напруги мережі був взятий трансформатор тороїдального типу. Середнє значення напруги збігається з характеристиками. Для контролювання напруги навантаження використаний ключовий транзистор VT2, коефіцієнтом заповнення якого керує мікроконтролер. Вид модуляції вибраний широтно-імпульсний. Коефіцієнт заповнення імпульсів був вибраний таким чином, щоби температурний режим роботи транзистора в імпульсному режимі зберігався на достатньому рівні.

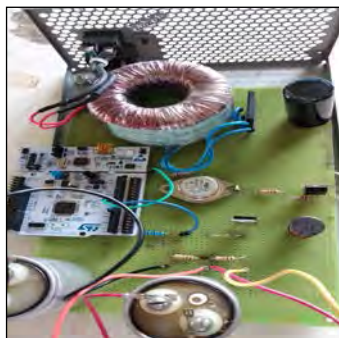


Рис. 5. Плата, використана для перевірки схеми

За коефіцієнта заповнення 60% температура ключового транзистора VT2 сягала 52 градусів в умовах відкритого стенду за температури лабораторії у 22 градуси за Цельсієм. При цьому струм навантаження складав 2,1 А, що є непоганим результатом. За коефіцієнта заповнення імпульсів більше 80% транзистор виходив за граничні рамки температур, маючи 94 градуси. Отже, доцільно встановити на монтажне кріплення транзистора алюмінієвий радіатор, площі у 100 мм² буде достатньо для здійснення ефективної роботи в умовах підвищеного коефіцієнта заповнення імпульсів. Дросель також мав високі показники температури, близько 100 градусів, що не є критичним, а в закритому корпусі впливатиме на температуру повітря всередині, що спрямує до нагріву елементів схеми, тому для вентиляції схеми в закритому блоці кращим виходом буде

використання вентилятора з гідродинамічним підшипником та живленням до 5 В. Живлення можна реалізувати у каскаді стабілізатора напруги AMS1117. Фотографії діаграм з осцилографа коефіцієнта заповнення імпульсів ключового транзистора VT2 представлені на рис. 5.

Висновки. В ході досліджень була побудована та реалізована на практиці принципова схема зарядного пристрою для двох послідовно з'єднаних у батарею суперконденсаторів на базі мікроконтролера STM32. Здійснені огляди наявних рішень топологій схем для його заряджання, вибрана краща з них за такими критеріями, як простота побудови, високі струми навантаження, відносна невелика собівартість пристрою, прийнятні масогабарити, необхідний та достатній рівень пульсацій випрямленої напруги на виході перетворювача. Режим заряджання реалізований ключовим транзистором, керованим мікроконтролером, живлення якого включене у склад схеми окремим каскадом. В ході виконаних дослідів встановлено, що під час збільшення коефіцієнта заповнення порушується температурний режим роботи. Доцільно встановити на монтажне кріплення транзистора алюмінієвий радіатор, площі в 100 мм² буде достатньо для більшого значення струму навантаження та швидшої зарядки. Реалізована схема характеризується простотою конструкції, надійністю, високими показниками струму заряджання, достатньою точністю зчитування зворотного зв'язку.

Список літератури:

1. Перетворювальна техніка. Ч. II : навчальний посібник / Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов, М.В. Панасенко, В.С. Руденко, В.Я. Ромашко. Харків, 2000. 360 с.
2. Моин В.С. Стабилизированные импульсные преобразователи. Москва, 1986. 376 с.
3. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. Москва, 1988. 294 с.
4. Шелест М.Б., Гайда П.І. Основи будови та експлуатації акумуляторних батарей. Суми, 2014. 210 с.
5. Soh L.-Q., Tiew Ch.D. Building of a portable solar ac & dc power supply. *Intelligent Systems, Modelling and Simulation*. DOI: 10.1109/ISMS.2014.82.
6. Datasheet STM32F0. *Practical electronics*. 2018. URL: <http://www.ruselectronic.com>.

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

В статье проанализированы особенности работы зарядного устройства при нагрузке на суперконденсатор с высокими значениями зарядного тока. Построен физический макет схемы, которая работает от сети. Показано, что при условиях достижения высоких значений коэффициента заполнения зарядное устройство будет работать в режимах температурного максимума. На примере построенного устройства определены регулировочные характеристики, которые обеспечивают режим непрерывного тока. В ходе выполненных исследований установлено, что при увеличении коэффициента заполнения нарушается температурный режим работы. Предоставлены рекомендации по установлению дополнительных монтажных креплений на отдельные силовые каскады схемы.

Ключевые слова: зарядное устройство, аккумулятор, DC-DC преобразователь, режим непрерывного тока, ионистор, stm32.

CHARGER FOR SUPERCAPACITOR

In the article analyzed the features of the charger when the load on the supercapacitor with high values of charging current. The physical layout of the scheme is working on the network. It is shown that in conditions of achieving high values of the fill factor, the charger will operate in temperature maximum modes. On the example of the constructed device, the regulating characteristics are determined, which will provide the modes of continuous current. In the course of the research, it was found that with an increase in the fill factor, the temperature regime of operation is disturbed. These recommendations for installing additional mounting mounts on separate power stages of the circuit.

Key words: *charger, battery, DC-DC-converter, continuous current modem Ionistor, stm32.*