

УДК 621.314

В.М. Співак, В.Б. Волківський
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗАРЯДУ ЕНЕРГОЄМНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

© Співак В.М., Волківський В.Б., 2003

Розглянуто моделювання електромагнітних процесів (ЕМП) у пристрої для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом з імпульсним регулюванням. Новий пристрій має підвищений ККД порівняно з відомим пристроєм для заряду акумуляторів асиметричним струмом.

This article deals with modeling of electromagnetic processes in device for charging of storage batteries by asymmetric current with an application pulse regulation method. New device have increased efficiency at comparison with existing device.

Вступ. Для розв'язання задач дослідження електромагнітних процесів (ЕМП) у теперішній час існує достатня кількість прикладних комп'ютерних пакетів. Особливо потрібно відмітити пакет розгалуження математичної системи MATLAB 6 – Simulink 4, який надає користувачу зручні і прості засоби візуального моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем. Пакет розгалуження Simulink 4 служить для імітаційного моделювання моделей, які складаються з графічних блоків із заданими властивостями (параметрами). При цьому, на відміну від класичних способів моделювання, користувачеві не потрібно досконально вивчати мови програмування і чисельні методи математики, а досить загальних знань, потрібних при роботі на комп'ютері і знань тієї предметної галузі, в якій він працює.

При роботі з Simulink користувач має можливість модернізувати бібліотечні блоки, створювати свої власні, а також складати нові бібліотеки блоків.

При моделюванні користувач може вибирати метод розв'язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). Під час моделювання існує можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можна зобразити у вигляді графіків або таблиць [1, 2, 3].

Розглянуто розв'язання задачі дослідження ЕМП за допомогою пакета Simulink 4 у пристрої для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом із підвищеним ККД, який досягається за рахунок збереження енергії розрядного імпульсу у накопичувальному конденсаторі та застосування транзисторних широтно-імпульсних перетворювачів (ШПП).

При заряді акумуляторних батарей асиметричним струмом досягається збільшення зарядної ємності q_3 на 10-15%, скорочення часу заряду t_3 на 10-15 % (порівняно з зарядом постійним струмом), а також істотне підвищення ресурсу акумуляторної батареї [4, 5].

Схема та принцип роботи пристрою. Електрична схема пристрою, що розглядається, показана на рис. 1.

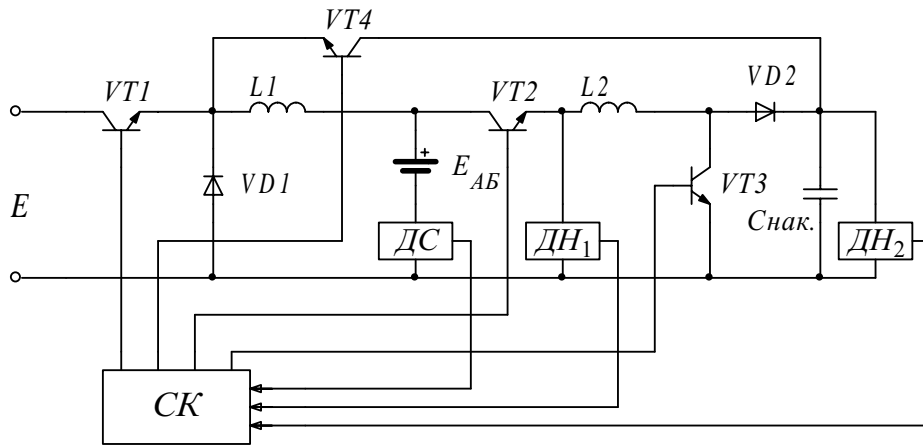


Рис. 1. Схема пристрою для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом

Пристрій працює так. Напруга мережі (E) надходить на вхід понижуючого ШПІ ($VT1$, $VD1$, $L1$, E_{AB}), який формує імпульс зарядного струму необхідної амплітуди. У проміжках між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс акумуляторної батареї через транзистор $VT2$. Останній використовують для підключення АБ до підвищуючого ШПІ ($L2$, $VT3$, $VD2$, $C_{нак.}$), який формує імпульс розрядного струму, енергія якого зберігається на накопичувальному конденсаторі $C_{нак.}$. При досягненні необхідної напруги на накопичувальному конденсаторі його використовують як джерело напруги замість основного (E) у понижуючому ШПІ ($VT4$, $VD1$, $L1$, E_{AB}), який формує імпульс зарядного струму. Розрядивши накопичувальний конденсатор до зазначеної напруги для формування імпульсу зарядного струму, знову використовується основне джерело напруги (E), а накопичувальний конденсатор знову заряджається до необхідної напруги під час формування розрядних імпульсів. Отже, пристрій забезпечує заряд АБ асиметричним струмом. Схема містить також систему керування ($СК$), давач струму ($ДС$) і давач напруги ($ДН_1$, $ДН_2$).

Оптимізація заряду накопичувального конденсатора та вибір величини його ємності. Для оптимального заряду конденсатора потрібно максимально ефективно використовувати енергію розрядного імпульсу акумулятора. Згідно з [6] для того, щоб втрати енергії розрядного імпульсу були мінімальними, потрібно розрахувати закон зміни коефіцієнта заповнення імпульсного циклу, який підвищує напругу ШПІ.

Згідно з [7] втрати мінімальні, коли приріст напруги $\Delta U_{C_{нак.}}$ для кожного ступеня заряду величина постійна і дорівнює:

$$\Delta U_{C_{нак.}} = \frac{I \cdot t_{зар.}}{C_{нак.}}$$

$$\text{Час заряду одного ступеня: } t_{зар.} = \frac{1}{f} \cdot \gamma.$$

Враховуючи втрати у елементах схеми, перехідні процеси та інерційність зміни напруги на виході підвищуючого ШПІ, у формулі для $t_{зар.}$ коефіцієнт γ можна прирівняти до

одиниці та приріст напруги $\Delta U_{\text{Снак.}}$ потрібно вибирати в 2–5 разів більший. З урахуванням того, що $\gamma=1$, формулу для розрахунку приросту напруги $\Delta U_{\text{Снак.}}$ запишемо у вигляді:

$$\Delta U_{\text{Снак.}} \approx \frac{I \cdot 1/f}{C_{\text{нак.}}},$$

Тоді коефіцієнт заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШП, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, буде

$$\gamma(U_{\text{Снак.}}, U_{\text{вх.}}) = \frac{U_{\text{Снак.}} + \Delta U_{\text{Снак.}} - U_{\text{вх.}}}{U_{\text{Снак.}} + \Delta U_{\text{Снак.}}}. \quad (1)$$

Значення напруги живлення підвищуючого ШП ($U_{\text{вх.}}$) і напруги на накопичувальному конденсаторі ($U_{\text{Снак.}}$), необхідні для розрахунку коефіцієнта заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШП, отримуються за допомогою давачів напруги ДН₁ та ДН₂ (рис. 1).

Нижче наводиться спрощена формула, яка використовується для попередньої оцінки величини ємності накопичувального конденсатора:

$$C_{\text{нак.}} \approx \frac{I_{\text{зар.}} \cdot t}{U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}}} \cdot \gamma_{\text{пон.ШП}} = \frac{I_{\text{зар.}} \cdot t}{U_{\text{Снак.мак}} - U_{\text{Снак.мін}}} \cdot \frac{E_{\text{АБ}}^*}{\frac{U_{\text{Снак.мак}} + U_{\text{Снак.мін}}}{2}}, \quad (2)$$

де $I_{\text{зар.}}$ – величина струму зарядного імпульсу; t – час заряду АБ від накопичувального конденсатора, який рекомендується обирати не більшим від довжини імпульсу зарядного струму; $U_{\text{Снак.мак}}$ – максимальна напруга, до якої буде заряджатися накопичувальний конденсатор:

$$U_{\text{Снак.мак}} \approx E + 20\% ;$$

$U_{\text{Снак.мін}}$ – мінімальна напруга, до якої буде розряджатися накопичувальний конденсатор:

$$U_{\text{Снак.мін}} \approx E - 20\% ;$$

E – напруга мережі живлення; $\gamma_{\text{пон.ШП}}$ – коефіцієнт заповнення імпульсного циклу понижуючого ШП на елементах $VT4$, $VD1$, $L1$, $E_{\text{АБ}}$; $E_{\text{АБ}}^*$ – напруга на АБ при її заряді.

Вибір типу силових ключів для пристрою. При дослідженні моделі пристрою було виявлено, що доцільно вибирати силовими ключами $VT2$ та $VT3$ MOSFET-транзистори, оскільки вони мають нижче значення напруги у ввімкненому стані при номінальних напругах менше 200 В, а в якості $VT1$ та $VT4$ вибирати IGBT-транзистори, оскільки вони, на відміну від MOSFET, не мають паралельно транзистору технологічно вбудованого зворотного діоду [2, 8]. При формуванні зарядного імпульсу понижуючим ШП накопичувальний конденсатор буде заряджатися від мережі живлення (E) через наявність вбудованого зворотного діоду в транзистор $VT4$. При його розряді на АБ значна частина накопленої в ньому енергії буде передаватися через вбудований у транзистор $VT1$ зворотний діод у мережу живлення.

Моделювання електромагнітних процесів. Модель пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом зображена на рис. 2, 3. Модель складається з силової частини та системи керування (СК). До СК входять: PWM – підсистема широтно-імпульсного модулятора (ШІМ); Capacitor Charge Control – підсистема керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШІМ; Commutation Control – підсистема керування комутацією транзисторів.

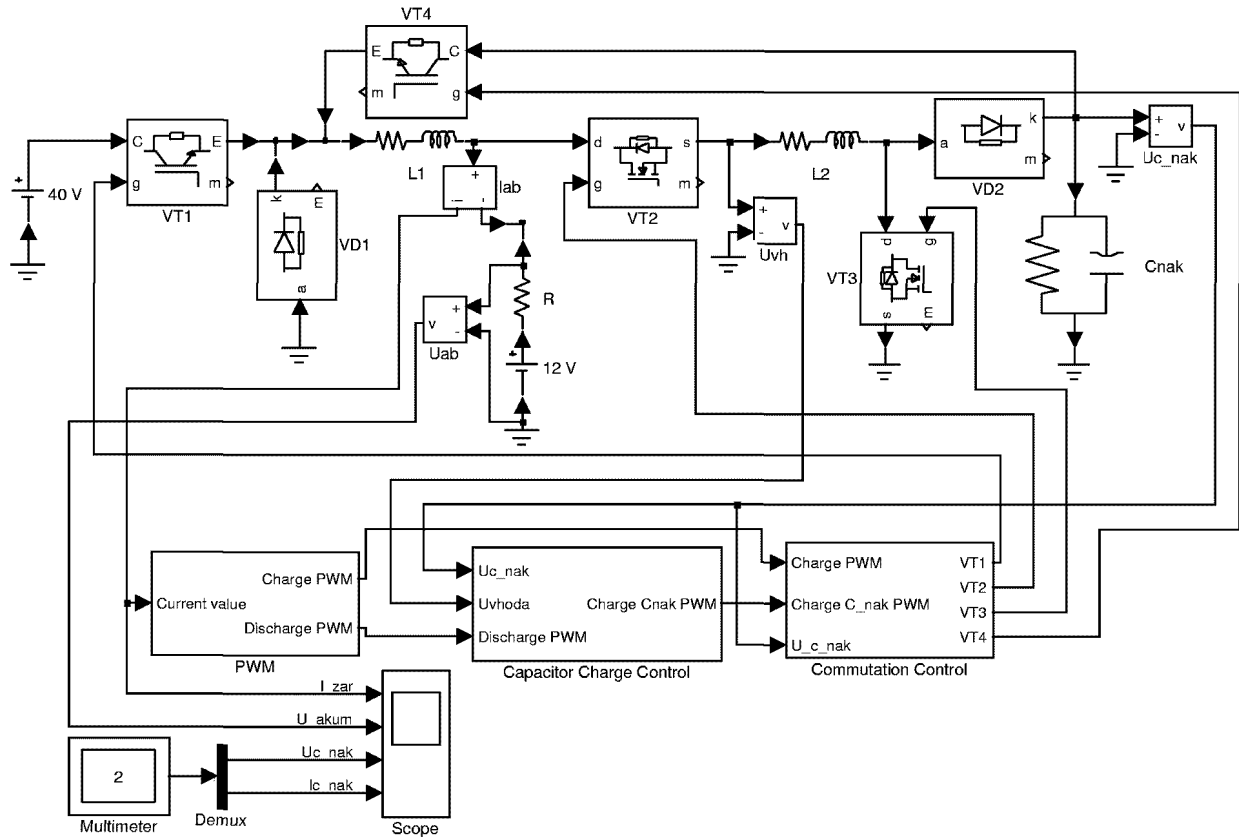


Рис. 2. Модель пристрою для заряду акумуляторної батареї асиметричним струмом

Силова частина моделі, зображеної на рис. 2, складається з таких елементів (модулів):

- джерело постійної напруги (40 V);
- силові транзисторні модулі на IGBT-транзисторах (VT1, VT4) та MOSFET-транзисторах із зворотним діодом (VT2, VT3);
- діоди (VD1, VD2);
- спрощена модель акумуляторної батареї, яка складається з джерела живлення та опору (R, 12 V);
- накопичувальні індуктивності (дроселі) (L1, L2);
- накопичувальний конденсатор (Cnak);
- вимірювач миттєвого струму у акумуляторній батареї (Iab);
- вимірювачі миттєвих напруг на акумуляторній батареї (Uab), на вході підвищувачого ШП (Uvh) і на накопичувальному конденсаторі (Uc_nak);
- Multimeter – блок для спостереження (вимірювання) миттєвих значень величин, які вибрані у полі Measurement відповідних блоків (у нашому випадку це струм у конденсаторі та напруга на ньому);
- блок Demux – для розділення сигналів;
- блок Scope – для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струму у АБ та напруги на ній, а також струму у накопичувальному конденсаторі та напруги на ньому.

Підсистема ШІМ, модель якої зображена на рис. 3, генерує сигнали керування транзисторами понижуючих ШП, які формують імпульс зарядного струму від джерела постійної напруги (транзистор VT1) і накопичувального конденсатора (транзистор VT4), а також корегуючі сигнали керування для корекції коефіцієнта заповнення імпульсного

циклу підвищуючого ШПІ, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, які передаються у підсистему керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШПІ.

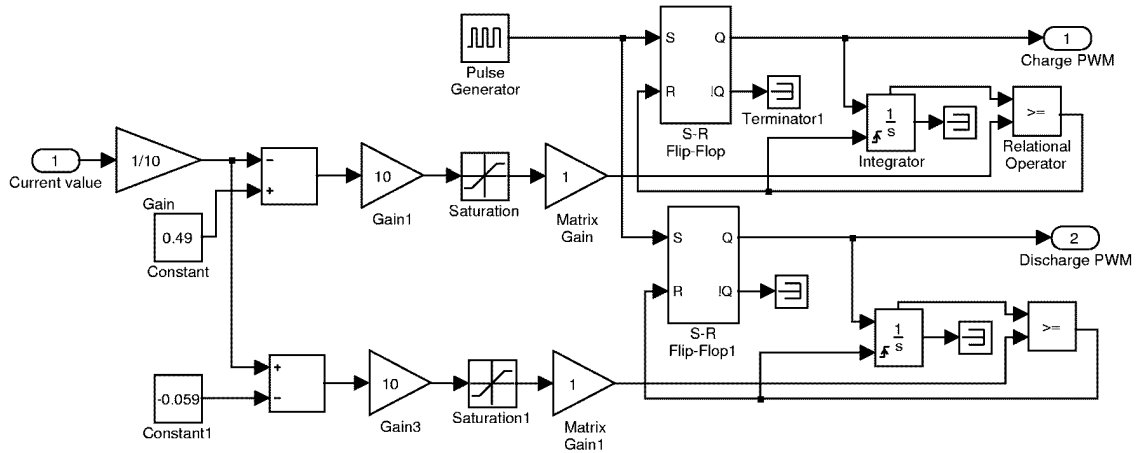


Рис. 3. Модель підсистеми ШПІ

У підсистемі керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШПІ, модель якої зображена на рис. 4, виконується розрахунок і генерація коефіцієнта заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПІ, що використовується для заряду накопичувального конденсатора, за формулою (2.1), а також проводиться корекція цього коефіцієнта заповнення у разі відхилення струму розрядного імпульсу від заданого значення.

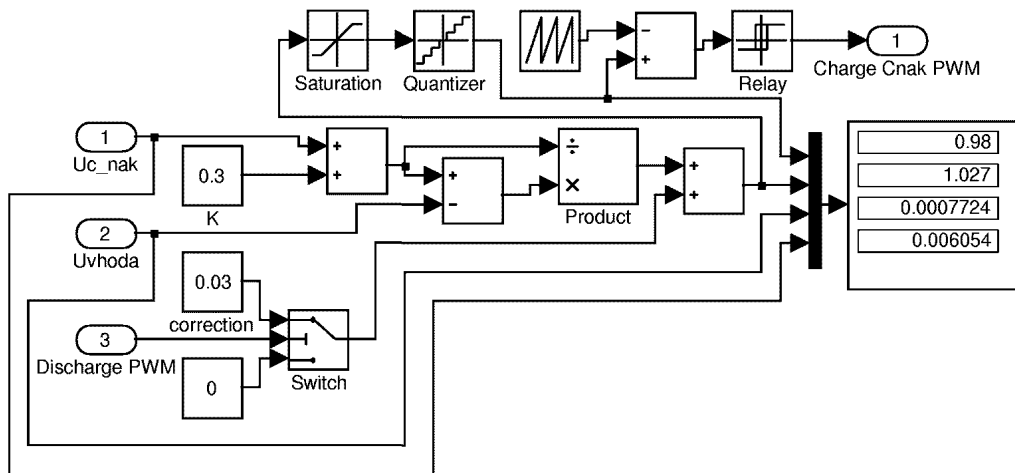


Рис. 4. Модель підсистеми керування оптимальним зарядом накопичувального конденсатора підвищуючим ШПІ

Підсистема керування комутацією транзисторів, модель якої зображена на рис. 5, складається з генератора, який задає довжини зарядного та розрядного імпульсів, та набору логічних елементів, які, залежно від сигналу на виході генератора та напруги на накопичувальному конденсаторі, вмикають або понижуючі ШПІ: подається сигнал ШПІ на транзистор VT1 або VT4, що, у свою чергу, залежить від напруги на конденсаторі (якщо напруга на конденсаторі досягає $U_{Снак} \geq 50V$ – працює VT4, а якщо понижується до $U_{Снак} \leq 30V$ – знову

починає працювати VT1); або вмикають транзистор VT2 і починається розряд АБ на накопичувальний конденсатор.

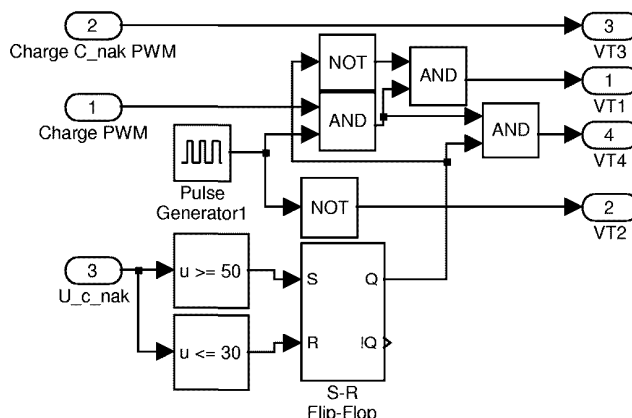


Рис 5. Модель підсистеми керування комутацією транзисторів

Результати моделювання зображені на рис. 6, 7.

Як видно з результатів моделювання (рис. 6, а), пристрій забезпечує заряд АБ асиметричним струмом необхідних параметрів. При цьому енергія розрядного імпульсу зберігається накопичувальним конденсатором (рис. 6, в) і потім знову передається АБ під час зарядного імпульсу (рис. 7, в).

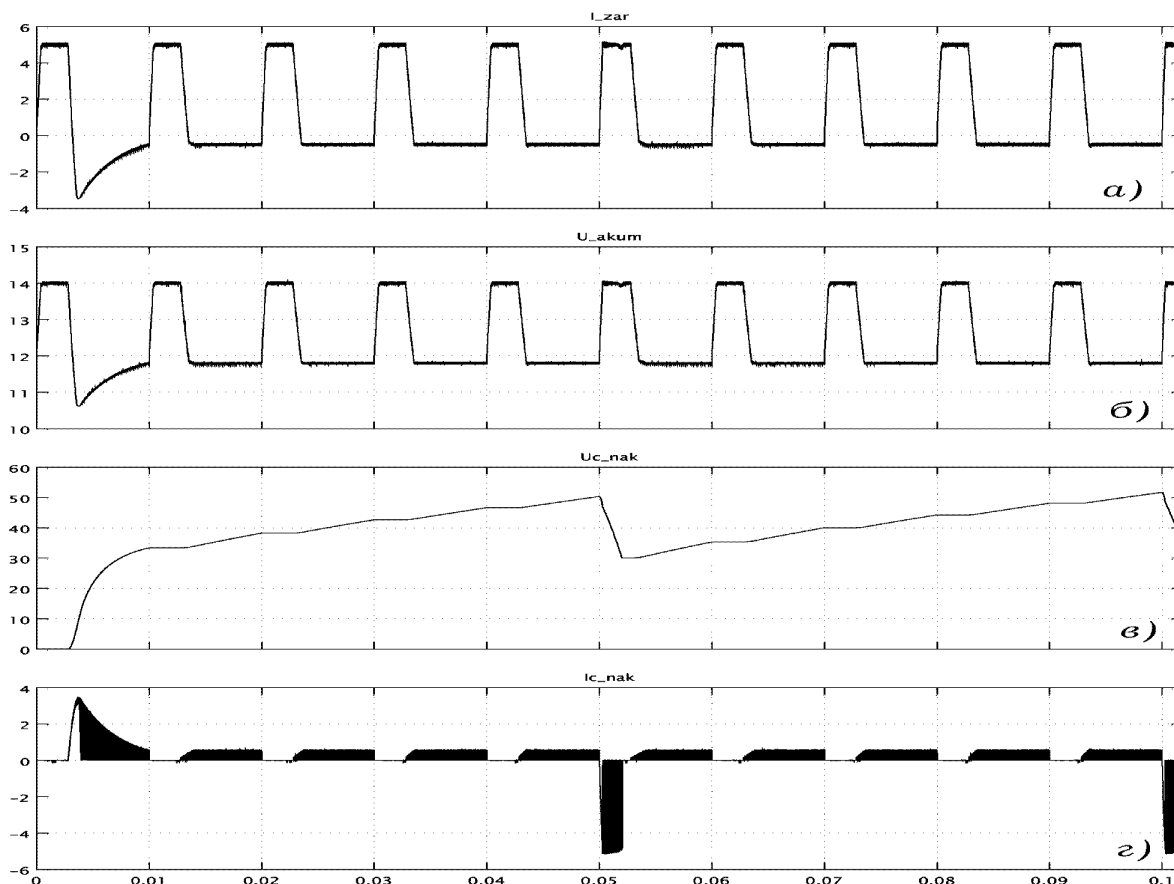


Рис. 6. Струм заряду АБ (а) та напруга на АБ під час її заряду (б), напруга на накопичувальному конденсаторі (в) та струм у ньому (г)

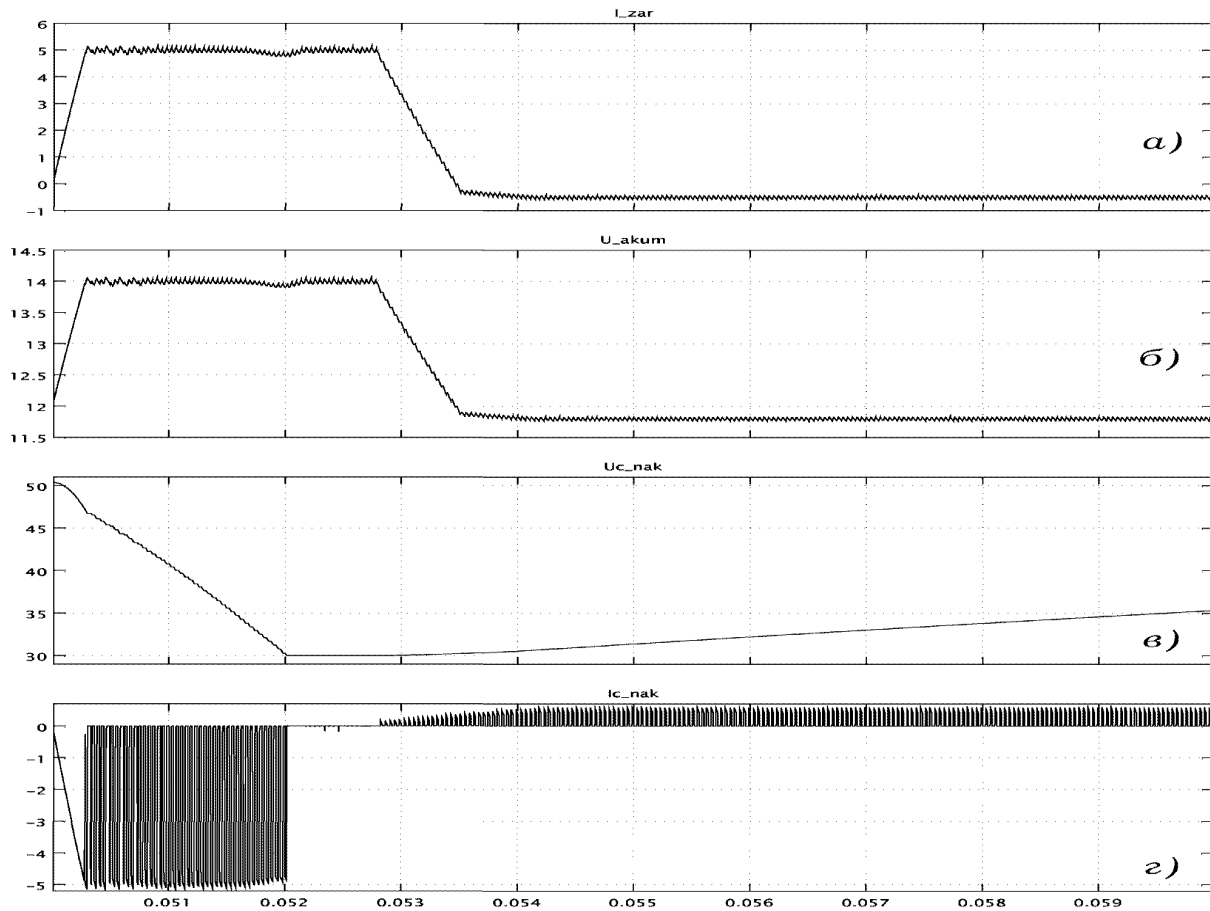


Рис. 7. Струм заряду АБ (а) та напруга на АБ під час її заряду (б), напруга на накопичувальному конденсаторі (в) та струм у ньому (г) під час його розряду

Перевагою запропонованого пристрою також є те, що в ньому використовується імпульсний метод регулювання, на відміну від пристрою, запропонованому в [5], в якому використовується безперервне регулювання. Головна перевага імпульсного методу регулювання – високий ККД, який, як правило, перевищує 80–90 % [9].

Висновки. При моделюванні пристрою було виявлено, що доцільно вибирати як силові ключі $VT2$ та $VT3$ MOSFET-транзистори, оскільки вони мають нижче значення напруги у включеному стані при номінальних напругах менше 200 В, а $VT1$ та $VT4$ вибирати IGBT-транзистори, оскільки вони, на відміну від MOSFET, не мають паралельно транзистору технологічно вбудованого зворотного діоду, через наявність якого у транзисторі $VT4$ при формуванні зарядного імпульсу понижуючим ШПІ накопичувальний конденсатор заряджався б від мережі живлення (E), а при розряді накопичувального конденсатора на АБ значна частина накопленої в ньому енергії передавалася б через вбудований у транзистор $VT1$ зворотний діод у мережу живлення.

Запропонований пристрій для заряду акумуляторних батарей асиметричним струмом, який має такі переваги: за рахунок того, що енергія розрядного імпульсу зберігається у накопичувальному конденсаторі, зменшується споживання енергії мережі на 10–12 % порівняно з відомим пристроєм для заряду акумуляторів асиметричним струмом, що наочно доводить моделювання; використовується імпульсний метод регулювання, ККД якого, як правило, перевищує 80–90 % [9].

Виведено формулу регулювання коефіцієнта заповнення імпульсного циклу підвищуючого ШПП, яка забезпечує оптимальний заряд конденсатора, що дає змогу максимально ефективно використовувати енергію розрядного імпульсу акумулятора. Формула використовувалась при моделюванні ЕМП у пристрої.

1. MATLAB 6 / 6.1 / 6.5 + Simulink 4 / 5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М., 2002. – 768 с. 2. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб., 2002. – 304 с. 3. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. – www.matlab.ru/simulink/book1/index.asp.htm. 4. Синдеев Игорь Михайлович. Электроснабжение летательных аппаратов: Учеб. для вузов гражд. авиации / И.М. Синдеев. – М., 1982. – 272 с. 5. Батарейки и аккумуляторы: Для широкого круга читателей / В.С. Лаврус. – К., 47 с. 6. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии / О.Г. Булатов, В.С. Иванов, Д.И. Панфилов. – М., 1986. – 160 с. 7. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии / И.В. Пенетгов. – К., 1982. – 424 с. 8. Рогачёв К.Д. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). – <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/igbt/index.htm>. 9. Перетворювальна техніка: Підручник. Ч. 2 / Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов та ін.; За ред. В.С. Руденка. – Харків, 2000. – 360 с.

УДК 621.382.001

О.І. Шегедин, В.С. Мадай

Національний університет “Львівська політехніка”

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАМАГНІЧУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

© Шегедин О.І., Мадай В.С., 2003

Розглянуто розроблення математичних моделей і проаналізовані режими роботи намагнічувальних систем апаратури для вимірювання магнітних характеристик. Розроблені математичні моделі електромагніту сильних полів разом з випробувальним зразком циліндричної форми, які виготовлені з висококоерцитивного магнітотвердого матеріалу.

Modelling features of magnetizing system electromagnetic processes of the equipment for measuring of magnetic characteristics and its performances research are considered.

Вступ. Намагнічувальна система є основним блоком, що визначає електромагнітні параметри інформаційно-вимірювальних комплексів (ІВК) контролю параметрів сучасних висококоерцитивних магнітотвердих матеріалів (МТМ). На теперішній час під час побудови й аналізу намагнічувальних систем ІВК набувають поширення методи математичного моделювання, що дозволяють з достатнім ступенем ймовірності прогнозувати їх метрологічні (точність, швидкодія) та експлуатаційні (портативність, енергоощадність) параметри. Розроблені математичні моделі [1] дають змогу здійснювати аналіз режимів роботи пристрою на етапі проектування, однак не враховують впливу досліджуваного зразка на магнітне поле в