

УДК 621.314

О. О. ШАВЬОЛКІН, С. М. КОЖЕМЯКІН**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕРЕЖЕВОГО ІНВЕРТОРА КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ПОНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

Розглянуто однофазний мостовий інвертор напруги в режимі джерела струму. Для однополярного формування напруги запропоновано рішення з дворівневим і тривірневим релейним регулятором струму при зниженні кількості і обмеженні частоти перемикачів транзисторів. В автономному режимі завдання струму формується пропорційно-інтегральним регулятором напруги. При роботі на мережу інвертор підключається через реактор, в автономному режимі паралельно навантаженню підключається конденсатор. Виконано моделювання роботи з мережею і нелінійним навантаженням.

Ключові слова: Комбінована система електропостачання, поновлювані джерела енергії, інвертор напруги в режимі джерела струму, релейний регулятор струму, тривірневий релейний регулятор, регулятор напруги, автономний режим, моделювання.

Рассмотрен однофазный мостовой инвертор напряжения в режиме источника тока. Для однополярного формирования напряжения предложено решение с двухуровневым и трехуровневым релейным регулятором тока при снижении количества и ограничении частоты переключений транзисторов. В автономном режиме задание тока формирует пропорционально-интегральный регулятор напряжения. К сети инвертор подключается через реактор, в автономном режиме параллельно нагрузке подключается конденсатор. Выполнено моделирование работы с сетью и нелинейной нагрузкой.

Ключевые слова: Комбинированная система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, инвертор напряжения в режиме источника тока, релейный регулятор тока, трехуровневый релейный регулятор, регулятор напряжения, автономный режим, моделирование.

Considered a single-phase current controlled voltage source bridge inverter for the converter unit with renewable energy sources. In parallel work with AC network the inverter is provides a power factor equal to one, regardless of the type of load and the direction of energy transfer. In autonomous mode, when the AC network is disconnected, inverter provides the energy transfer to the load. Proposed solutions with using a two-level and three-level hysteresis current controller with adjustable setting trigger of controller. This allows for the formation of a unipolar voltage inverter and to reduce the number of switching of transistors with limiting the frequency switching. When operating on AC power inverter current reference is formed in accordance with the load current and the power that is generated from renewable sources. In the autonomous mode, the instantaneous value of the load voltage is formed by a proportional-integral voltage controller that generates a reference to the hysteresis current controller. The current regulator is provides to limit the inverter current for transient regimes. The inverter is connected to AC power and load through the reactor. In the autonomous mode, the capacitor is connected parallel to the load. The inverter control system, which implements the proposed solutions have been developed. Simulation has executed for a system which includes a source AC with active and inductive impedance of power line, inverter with its control system and combined load. The load is an active-inductive, and includes a rectifier with an output capacitor filter. The simulation results confirm the effectiveness of solutions that are offered.

Keywords: The combined system of power supply, renewable energy, current controlled voltage source inverter, hysteresis current controller, a three-level hysteresis controller, voltage controller, autonomous mode, modeling.

Вступ. Широке впровадження поновлюваних джерел електроенергії (ПДЕ) у локальних системах електрозабезпечення (сонячних батарей, вітрогенераторів) створює можливість для їх паралельної роботи з централізованою мережею (ЦМ). Особливо це актуально в умовах дії "зелених" тарифів [1], коли споживач стає, в певній мірі, учасником регіонального енергоринку: надлишок електроенергії, який генерується ПД, віддається у ЦМ, підвищуючи цим самим ефективність функціонування таких систем. Інтегровані у єдину мікроенергетичну систему джерела електроенергії (насамперед, поновлювані) з можливістю паралельної роботи з ЦМ утворюють комбіновану систему електроживлення (КСЕ) [2]. Енергетичний зв'язок між джерелами і узгодження їх режимів роботи забезпечує напівпровідниковий перетворювальний агрегат (ПА), основним елементом якого є мережевий автономний інвертор напруги (МАІН), що забезпечує передачу енергії від ПДЕ.

Автономні системи електроживлення (АСЕ) з ПДЕ, а також КСЕ випускаються значною кількістю виробників у завершеному вигляді, також виготовляються і окремі елементи систем [3, 4]. Стосовно МАІН звичайно розглядається формування "чистої синусоїди" напруги, що цілком виправдано для АСЕ, але не є однозначним для КСЕ. З метою зменшення вихідних фільтрів МАІН працює з високою частотою модуляції і має найбільші втрати енергії у силових колах ПА.

Навантаження сучасної будівлі споживає

реактивну потужність, є нелінійним і спотворює струм, що споживається з ЦМ. Щодо гармонійного складу струму споживання існують стандарти МЕК [5]. В КСЕ присутні два джерела електроенергії – одне (з боку АІН) є стабілізованим за напругою, інше – ЦМ, яка у більшості локальних об'єктів, що віддалені від розподільчих пунктів в умовах їхньої перевантаженості, має коливання напруги, що можуть перевищувати припустимі значення. Отже, виникають питання забезпечення сумісності їх роботи і забезпечення коефіцієнту потужності близького до 1. Для вирішення цього в роботі [6] показана доцільність суміщення функцій МАІН з функцією силового активного фільтру (САФ). За цього пропонується використовувати МАІН у режимі джерела струму. Тенденція використання МАІН у режимі джерела струму проглядає і у роботах інших дослідників [7, 8].

Топологія МАІН залежно от потужності, структури КСЕ може бути різною. Щодо дворівневого трифазного мостового АІН питання реалізації режиму джерела струму в цілому вирішено. Недостатньо вивчено питання стосовно режиму джерела струму для однофазної мостової схеми МАІН, де можливі різні варіанти реалізації з постійною і змінною частотою модуляції, що використовують біполярне формування напруги. Покращення показників МАІН зараз пов'язують з багаторівневими топологіями схем [9], проте питання стосовно використання каскадних схем інверторів де базовим елементом є однофазний мостовий МАІН у режимі джерела струму, теж

вивчено недостатньо. Певні можливості зменшення кількості перемикачів ключів забезпечує однополярна модуляція напруги однофазного мостового АІН, питання її реалізації в режимі джерела струму потребує додаткових досліджень. В існуючих рішеннях МАІН працює або паралельно з ЦМ або у автономному режимі в якості джерела синусоїдальної напруги. Питання використання МАІН, як джерела струму в автономному режимі роботи на навантаження потребує додаткового вивчення.

Мета. Удосконалення принципів керування однофазним мостовим МАІН в режимі джерела струму із забезпеченням роботи КСЕ разом із ЦМ і в автономному режимі роботи.

Завдання, що підлягають вирішенню:

- дослідити можливості зменшення кількості перемикачів ключів АІН і втрат енергії на їхнє перемикання, обґрунтувати принцип реалізації відповідного рішення і структуру системи керування;
- розробити структуру системи керування мережевого АІН в режимі джерела струму для

автономного режиму роботи КСЕ;

– розробити математичну модель мережевого АІН з системою керування;

– здійснити імітаційне моделювання щодо перевірки працездатності одержаних рішень.

Викладення основного матеріалу.

Запропонована структура силових кіл КСЕ з МАІН (рис. 1) містить: ЦМ (джерело змінного струму G , лінію електропередавання (ЛЕП) з опором $Z_{ЛЕП}$), однофазний мостовий МАІН на чотирьох ключах $K_1 \div K_4$ (IGBT зі зворотним діодом), автоматичний вимикач QF на вході локального об'єкту, високочастотний фільтр (R_ϕ, C_ϕ), контактор $K1$ для підключення МАІН до ЦМ, контактор $K2$ для підключення конденсатора фільтра $C1$ у автономному режимі, навантаження об'єкту Z_H , реактор L , конденсатор у колі постійного струму МАІН $C2$, датчики напруги у точці підключення u_1 , на вході МАІН u_d , датчики струму навантаження – i_2 , вихідного струму МАІН – i_{in} , вхідного струму МАІН i_d .

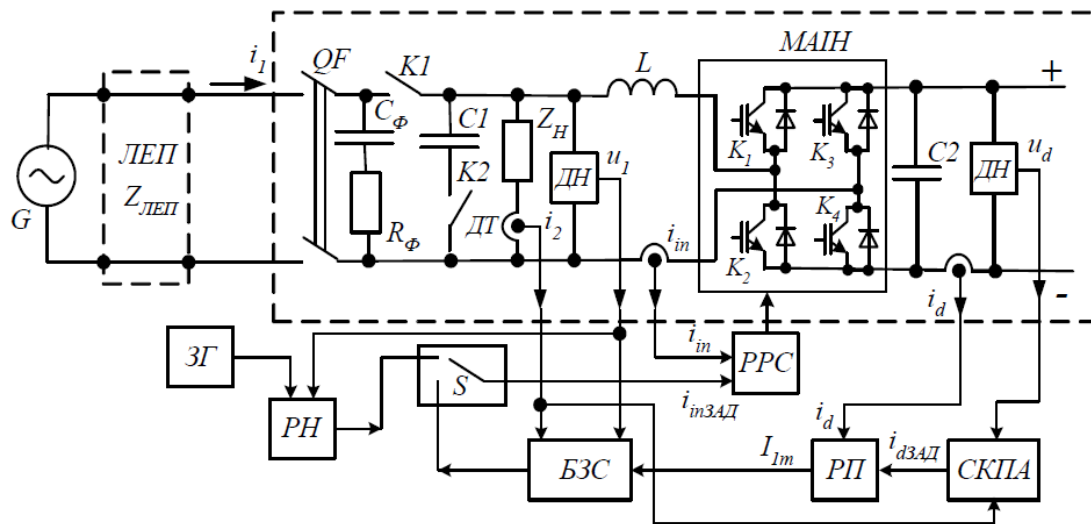


Рис. 1 – Структура силових кіл і системи керування МАІН

Система керування МАІН містить релейний регулятор струму (РПС), блок завдання струму (БЗС) для режиму роботи з ЦМ, регулятор напруги (РН), генератор синусоїдальної напруги (ЗГ), що задає напругу у автономному режимі, перемикач сигналу завдання струму (i_{in}) S , регулятор потужності (РП), систему керування перетворювальним агрегатом СКПА (у даній роботі не розглядається).

Робота МАІН паралельно мережі. Для зменшення впливу високочастотних складових в точці підключення МАІН встановлено RC фільтр. Оскільки постановлено завдання забезпечення відносно ЦМ коефіцієнту потужності, що дорівнює 1, використання у вхідних колах МАІН конденсатору у разі роботи з ЦМ є недоречним. Це приводить до додаткового навантаження МАІН за струмом (компенсація ємнісного струму $C1$ за активного опору навантаження або його відсутності), адже напруга ЦМ є синусоїдальною (у всякому разі наближена до синусоїдальної). До того ж наявність ємності у колі з індуктивністю може спричинити резонанс.

Отже розглянемо роботу МАІН на джерело

синусоїдальної напруги. За цього формування синусоїдального струму здійснюється у замкненій за струмом системі відповідно миттєвому значенню завдання $i_{3ад}$ і фактичному значенню струму на виході АІН (сигнал зворотного зв'язку за струмом) згідно похибки $\Delta i = i_{3ад} - i_\phi$. Можливі різні варіанти реалізації з постійно і змінною частотою модуляції [7, 8].

Зазвичай формування струму здійснюється з похибкою за умови, що середнє за період перемикачів ключів АІН значення похибки близьке до нуля. Аналіз показує, що найбільш ефективним є використання релейного (гістерезисного) регулятора струму з обмеженням Δi заданим відхиленням $\delta > 0$ відносно значення $i_{3ад}$. Недоліком є змінна на періоді вихідного струму частота перемикачів ключів МАІН, проте спектр струму є рівномірним і амплітуди вищих гармонік не перевищують 1 %, тобто потреба у додаткових фільтрах відсутня. Вадою є й те, що пульсації постійної напруги u_d на вході МАІН з подвійною до частоти мережі частотою, враховуються РПС у тривалості вмикання транзисторів. Це зменшує вимоги до фільтру ($C2$).

За використанням однополярного формування напруга $u_{МАІН}$, приймає три значення $+U_d$, 0 , $-U_d$. Варто зазначити, що за синусоїдальної форми струму значення di/dt змінюється від нуля до максимального значення. Очевидно, що за використанням РРС швидкість змінювання струму у реакторі L визначається прикладеною напругою з боку ЦМ та МАІН і повинна перевищувати $di_{ЗАД}/dt$ (струм коливается в межах $(i_{ЗАД} - \delta) < i_n < (i_{ЗАД} + \delta)$). Однак, за значного перевищення $|di/dt| > |di_{ЗАД}/dt|$ струм за спрацьовуванням РРС швидко зростає і убуває, що збільшує кількість перемикачів ключів АІН, які забезпечують відповідні значення вихідної напруги $+U_d$ та $-U_d$. Це має місце за використанням звичайного дворівневого РРС, що спрацьовує (перемикається) за рівнями $(i_{ЗАД} - \delta)$ та $(i_{ЗАД} + \delta)$.

Кількість перемикачів ключів можна суттєво зменшити якщо di/dt а $di_{ЗАД}/dt$ близькі за значенням. Розглянемо формування позитивної напівхвилі струму. Так, під час зростання $i_{ЗАД}$ ($di_{ЗАД}/dt > 0$) змінення струму i_n від рівня $(i_{ЗАД} - \delta)$ до $(i_{ЗАД} + \delta)$ досягається за $u_{МАІН}=U_d$, що забезпечує $di/dt > di_{ЗАД}/dt$. Якщо для подальшого зменшення i_n встановити $u_{МАІН} = 0$ швидкість убування струму зменшується (відносно випадку,

коли $u_{МАІН} = -U_d$) – тривалість інтервалу часу досягнення значення $(i_{ЗАД} - \delta)$ збільшується. На ділянці з $di_{ЗАД}/dt < 0$ на інтервалі змінювання струму $(i_{ЗАД} - \delta) < i_n < (i_{ЗАД} + \delta)$ можна використати наступні варіанти: $u_{МАІН} = U_d$ ($di/dt > 0$) або $u_{МАІН} = -U_d$ ($di/dt < 0$), якщо $|di_{ЗАД}/dt| \geq |di/dt|$ – струм навантаження зменшується повільніше ніж завдання. На наступному інтервалі зменшення i_n до рівня $(i_{ЗАД} - \delta)$ теж можливі два варіанти: $u_{МАІН} = 0$ ($di/dt < 0$), якщо $|di/dt| \geq |di_{ЗАД}/dt|$ або $u_{МАІН} = -U_d$ ($di/dt > |di_{ЗАД}/dt|$).

Отже, якщо змінювати стани схеми залежно від значення $di_{ЗАД}/dt$ можна значно зменшити кількість перемикачів ключів АІН тобто перейти до однополярного формування напруги навантаження.

Можливими є наступні варіанти реалізації.

Згідно полярності струму i_1 та напруги u_1 . В загальному випадку з формуванням струму i_1 , що зсунутий відносно напруги u_1 на кут φ можливі наступні режими роботи схеми: випрямний при співпадінні напрямків u_1 та i_1 і інвертування при протилежних напрямках u_1 та i_1 . Розглянемо стани для цих режимів:

1. Випрямний за $u_1 > 0$ та $i_1 > 0$. Можливі два рівноцінних стани:

а) з використанням ключа K_2 – при вмиканні ключа отримуємо коло джерело $G, L, K_2, VD4, G$ – струм i_1 зростає; за вимкненням K_2 вмикається $VD1$ – енергія, що накопичена у реакторі віддається у навантаження – струм зменшується;

б) з використанням ключа K_3 – при вмиканні ключа отримуємо коло джерело $G, L, VD1, K_3, G$ – струм i_1 зростає; за вимкненням K_3 вмикається $VD4$ – енергія, що накопичена у реакторі віддається у навантаження – струм i_1 зменшується;

2. Випрямний за $u_1 < 0$ та $i_1 < 0$. Можливі два рівноцінних стани з використанням ключів K_4 і K_1 ;

3. Інвертування за $u_1 > 0$ та $i_1 < 0$. Можливі три стани:

а) за вмиканням ключів K_1 і K_4 утворюється коло G, L, K_1 , навантаження, K_4, G . Напруга U_d є зустрінною відносно u_1 – під її дією i_1 зростає;

б) за вимиканням K_1 і K_4 струм підхоплюють діоди $VD2$ в $VD3$ – струм зменшується, енергія віддається у навантаження;

в) за вимиканням ключа K_1 , ключ K_4 залишається в роботі, струм підхоплює $VD2$. Утворюється коло $G, L, VD2, K_4, G$ – під дією u_1 струм i_1 зменшується.

4. Інвертування за $u_1 < 0$ та $i_1 > 0$. Можливі стани, що аналогічні п. 3 за участю ключів K_2 і K_3 та $VD1, VD4$.

Що стосується станів б) та в) за режимами 3 та 4 дія однакова – струм зменшується, проте у першому випадку $|u_B| = U_d$, а у другому $u_B = 0$, отже для стану б) темп зменшення струму більше – зростає частота перемикачів ключів.

Отже, для функціонування схеми треба визначити полярність струму i_1 та напруги u_1 , згідно цьому імпульси з виходу РРС подаються на відповідні ключі.

Більш універсальним є використання трирівневого РРС, який має додатковий релейний елемент (РЕ) з рівнем спрацьовування $\delta_1 = (1,2 \div 1,5)\delta$. Так, для позитивної напівхвилі струму спрацьовуванню РРС за рівнями $(i_{ЗАД} \pm \delta)$ відповідають значення напруги навантаження $u_{МАІН} = U$ і $u_{МАІН} = 0$. На певній ділянці формування струму виникає ситуація, коли після досягнення $i_1 \geq (i_{ЗАД} + \delta)$ і перемикачів у стан $u_{МАІН} = 0$ швидкість змінювання струму не забезпечує спадання струму і струм продовжує зростати. За досягненням значення $i_1 \geq (i_{ЗАД} + \delta_1)$ спрацьовує РЕ, який перемикає стан схеми $u_{МАІН} = -U$ для гарантованого зменшення струму. У подальшому використовуються стани $u_{МАІН} = 0$ і $u_{МАІН} = -U$. Аналогічна робота РРС для негативної напівхвилі, коли використовуються стани $u_{МАІН} = -U$ і $u_{МАІН} = 0$, за спрацьовуванням РЕ $u_{МАІН} = 0$ і $u_{МАІН} = -U$.

Отже на виході РРС маємо сигнал u_g , що відповідає рівням 1, 0, -1. Відповідно змінюється і алгоритм керування ключами приймають значення: якщо $u_g \geq 0$ $g_1 = 1$, якщо $0 \geq u_g$ $g_3 = 1$, $g_2 = \bar{g}_1$, $g_4 = \bar{g}_3$.

Значення індуктивності реактору L (з урахуванням індуктивності джерела (мережі) змінного струму) визначає швидкість змінювання струму реактору i_1 і, відповідно, амплітуду його пульсацій. Для відпрацьовування струму заданої амплітуди швидкість змінювання струму реактора повинна перевищувати швидкість змінювання завдання струму. Максимальна швидкість синусоїдального струму має місце при переході струму нуль і дорівнює $\left(\frac{di}{dt}\right)_{MAX} = \omega I_{1m}$. Швидкість

змінювання струму реактору при вмиканні транзистору визначається напругою джерела u_1 , що прикладена до реактору і, яка є малою в зоні переходу струму через нуль. Вважаємо, що напівхвиля струму починає формуватися з вмикання транзистору (стан 1, а, що розглянуто вище). Нехай тривалість вмикання становить $10^\circ = \pi/18$. Середнє значення напруги за цей час становить

$$U_{CP} = \int_0^{\pi/18} U_{1m} \sin \omega t d\omega t = U_{1m} (1 - \cos(\pi/18)) = 0,015 U_{1m}.$$

Тоді середнє значення швидкості змінювання струму становить $\frac{di}{dt} = \frac{U_{CP}}{L} = \frac{0,015 U_{1m}}{L}$ і повинна виконуватися умова $\frac{U_{CP}}{L} > \left(\frac{di}{dt}\right)_{MAX} = \omega I_{1mMAX}$.

Зменшення діапазону змінювання частоти перемикачів ключів у процесі формування струму можна досягнути регулюванням значення δ згідно напруги навантаження і амплітуди струму.

Автономний режим роботи МАІН. Умови і механізм перемикачів МАІН у автономний режим роботи залежить від різних факторів – наявності інших генерувальних установ, інших навантажень, просадок напруги внаслідок зварювальних робіт і тощо, що є предметом окремого розгляду. Тому питання розглянуто дещо спрощено. Тобто у разі зникнення напруги з боку ЦМ контактор К1 відключається. Зворотнє вмикання К1 за відновленням живлення ЦМ здійснюється згідно за сигналом від системи керування КСЕ.

Для забезпечення синусоїдальної форми напруги навантаження в схему додається конденсатор С1, що вмикається контактором К2. Отже у даному разі МАІН працює з LC фільтром. Ємність конденсатору С1 достатньо мати мінімальною за умови придушення високочастотних пульсацій напруги. В разі активно-індуктивного навантаження для розвантаження МАІН за реактивним струмом ємність С1 може бути обрана за умови певної компенсації реактивної потужності навантаження.

Можливі наступні варіанти керування МАІН у автономному режимі:

- переведення МАІН у режим джерела напруги з синусоїдальною ШІМ;
- робота у режимі джерела струму з визначенням завдання струму згідно потужності навантаження.

У разі використання релейного регулятора струму, що забезпечує високу швидкодію відпрацювання струму, можливим і доцільним виглядає комбінований варіант з формуванням миттєвого значення напруги МАІН з підпорядкованим контуром регулювання струму. Це забезпечує двоконтурна система з зовнішнім пропорційно-інтегральним регулятором напруги і внутрішнім контуром регулювання струму. Завдання напруги формується генератором (ЗГ) синусоїдальної напруги з частотою 50 Гц. Така побудова системи регулювання дозволяє виключити викривлення форми напруги у разі нелінійного навантаження, здійснити обмеження вихідного струму МАІН, що потрібно для виключення пошкодження ключів у перехідних ремах роботи.

Результати моделювання. Моделювання здійснювалось для системи, що відповідає рис. 1, і містить у собі ЦМ з активним і індуктивним опорами,

МАІН і навантаження. Розглядалась робота МАІН на активноіндуктивне і нелінійне навантаження. В якості нелінійного навантаження використано некерований випрямляч з вихідним ємнісним фільтром.

На рис. 2 для автономного режиму роботи МАІН наведені осцилограми напруги (навантаження u_1 , МАІН $u_{МАІН}$) і струмів (МАІН i_{in} , навантаження i_H , конденсатору i_{C1}) за дещо завищеним значенням відхилення δ для РРС. За цього напруга $U_1=220$ В, індуктивність реактору $L=3$ мГн, постійна напруга на вході МАІН $U_d=350$ В, $C_1=100$ мкФ. Можна побачити, що здебільшого здійснюється однополярна модуляція (імпульси напруги мають одну полярність) і лише на певних інтервалах, що відповідають максимальній швидкості змінювання струму має місце біполярна модуляція (чергуються імпульси позитивної і негативної полярності). На цих інтервалах збільшується частота перемикачів ключів. На інших інтервалах суттєвого змінювання частоти перемикачів ключів немає. Напруга і струм навантаження не мають високочастотних пульсацій, щодо струму високочастотні складові струму МАІН замикаюся через конденсатор.

На рис. 3 наведені осцилограми напруги (навантаження u_1 , МАІН $u_{МАІН}$) і струмів (мережі i_1 , МАІН i_{in} , навантаження i_H) у разі перемикачів систем у автономний режим роботи. До перемикачів поряд з живленням навантаження здійснювалось генерування енергії у ЦМ. За наявності конденсатору у вихідних колах МАІН виникає перехідний процес, проте струм інвертору обмежується припустимим значенням. На рис. 3 показано найгірший випадок, коли початок роботи у автономному режимі співпадає з максимумом напруги.

Висновки за результатами дослідження. Запропоновані принципи керування однофазним мостовим АІН у режимі джерела струму дозволяють забезпечити роботу КСЕ по відношенню до ЦМ з коефіцієнтом потужності близьким до 1, як за лінійним, так і нелінійним навантаженням з одночасною генерацією електроенергії у ЦМ. За цього здійснюється однополярне формування напруги і практично у два рази зменшується кількість перемикачів ключів АІН і обмежується їх частота. Виключення ємності у вихідних колах у разі роботи з ЦМ зменшує завантаження ключів за струмом.

Використання у автономному режимі роботи двоконтурної системи регулювання з зовнішнім регулятором напруги і внутрішнім релейним регулятором струму поряд із забезпеченням синусоїдальної форми напруги навантаження дозволяє обмежити струм АІН у перехідних режимах.

Подальшим розвитком роботи є удосконалення принципів реалізації режиму джерела струму для каскадних схем з послідовним з'єднанням декількох АІН і удосконалення системи регулювання потужності КСЕ у разі відсутності акумуляторної батареї або за її мінімальної ємності.

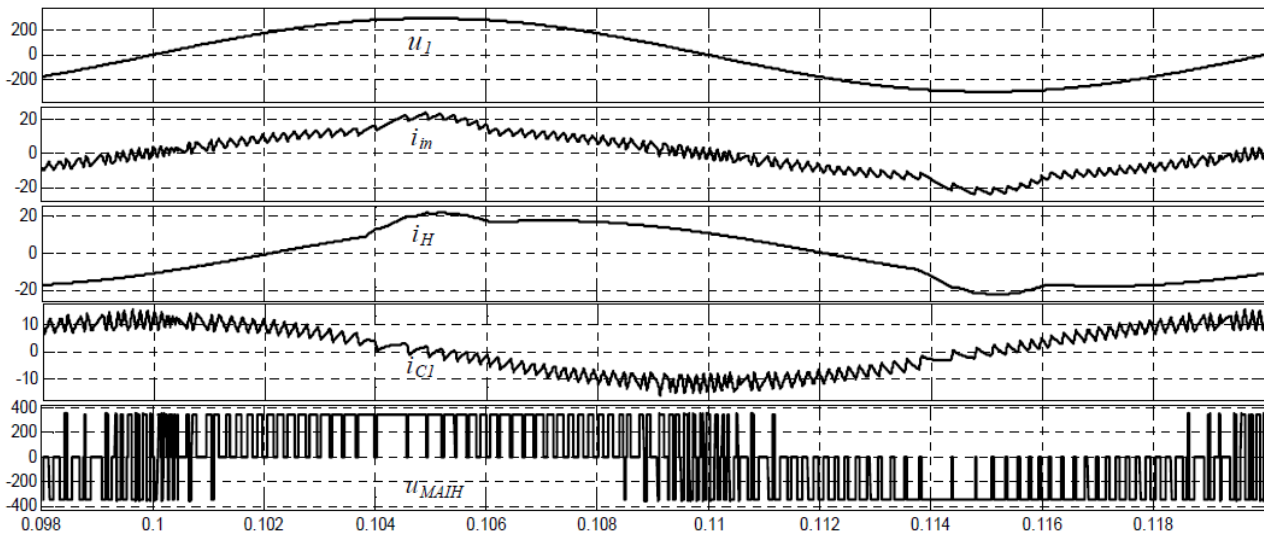


Рис. 2 – Осцилограми напруги і струмів у автономному режимі роботи МАІН

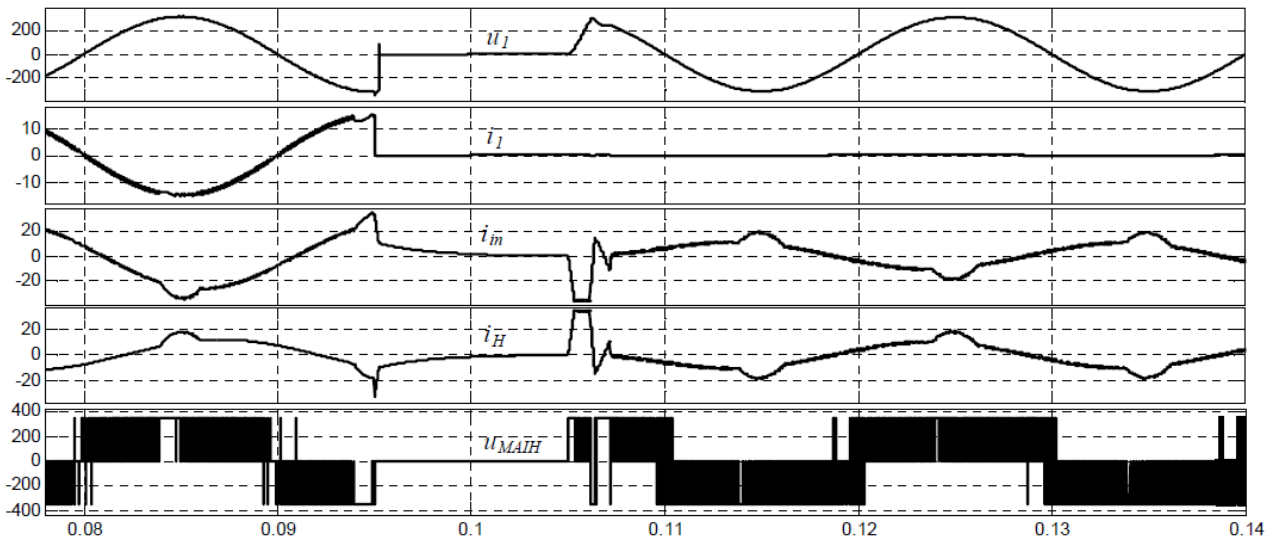


Рис. 3 – Осцилограми напруги і струмів під час перемикання МАІН у автономний режим роботи

Список літератури

1. Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств [Текст] / Постанова НКРЕКП № 2046 від 20.07.2015 р.
2. Каплун В.В. Комбіновані системи електроживлення з поновлюваними джерелами енергії [Текст] / В.В. Каплун, В.В. Козирський, А.В. Петренко – К.: ЦПТ "Аграр Медіа Груп", 2011. – 330 с.
3. Солнечная электростанция для дома. [Electronic resours]. <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/>.
4. BEKAR. Ветро-солнечная система. [Electronic resource]. – <http://www.ra-energo.ru/vetro/>.
5. IEEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Jun. 1992.
6. Каплун В. В. Удосконалення перетворювального агрегату комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами енергії / В.В. Каплун, О.О. Шавьолкін // "Електротехнічні та комп'ютерні системи" № 22 (98), Наука і техніка, 2016. – С. 165-169,
7. Tsao-Tsung Ma. Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2012 Vol II, IMECS 2012, March 14 - 16, 2012, Hong Kong. – pp. 996-1001.
8. Sung-Hun Ko. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct

Coupled Power Quality Control / Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar // IEEE Transactions, 2006.–pp. 5203-5208.

9. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник [Текст] / О. О. Шавьолкін; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с.

References (transliterated)

1. Pro vstanovlennia – zelenyh taryfiv na elektrychnu energiu dla pryvatnyh gospodarstv. Postanova NKREKP 2046 vid 20.07.2015 [About establishment of "green" tariffs on electric energy for private house. Resolution NKRE № 2046 from 20.07.2015]. Available at: <http://www.zakon3.rada.gov.ua/aws/show/z0942-5>.
2. Kaplun V.V., Kozirs'kij V.V., Petrenko A.V. Kombinovani sistemi elektrozhivlennja z ponovljuvanimi dzherelami energii [Combined power systems with renewable energy]. Kiev: CTI "Agrar Media Grup", 2011. 330 p.
3. Solnechnye batarei dlja doma. [Solar battery for house] [Electronic resource]. <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/>.
4. BEKAR. Vetro-solnechnaja sistema [BEKAR. Wind-solar system]. [Electronic resource]. <http://www.ra-energo.ru/vetro/>
5. IEEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Jun. 1992. (In English).
6. Kaplun V.V., Shav`olkin O.O. Udoskonalennja peretvoryuval`nogo

- agregatu kombinovanoyi systemy elektrozhivlennya zponovlyuvalnyu dzherelamy energiyi [Improvement of converting unit of combined power system with renewable energy sources] "Elektrotekhnichni ta komp'yuterni systemy" № 22 (98), Nauka i tekhnika, 2016. P. 165-169.
7. *Tsao-Tsung Ma*. Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2012 Vol II, IMECS 2012, March 14 - 16, 2012, Hong Kong. pp. 996-1001.
 8. Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control. IEEE Transactions, 2006. pp. 5203-5208.
 9. Shav'olkin O. O. Silovi napivprovodnikoviy peretvorjuvachi energiyi : navch. posibnik [Power semiconductor converters of energy : teach. manual]. Harkiv. nac. un-t. mis'k. gosp-va im. O.M. Beketova. Kharkov : HNUMG im. O. M. Beketova, 2015. 403 p.

Поступила (received) 28.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Удосконалення мережевого інвертора комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами енергії / О. О. Шавьолкін, С. М. Кожем'якін // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 42-47. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

Совершенствование сетевого инвертора комбинированной системы электропитания с возобновляемыми источниками энергии / А. А. Шавёлкин, С. М. Кожемякин // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 42-47. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

Improvement of main inverter of combined power system with renewable energy sources / A. A. Shavelkin, S. M. Kozhemyakin // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 42-47. Bibliography: 9. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шавьолкін Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроніки та електротехніки, Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ; тел.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.

Шавёлкин Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроники и электротехники, Киевский национальный университет технологий и дизайна, г. Киев; тел.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.

Shavelkin Alexander Alexeevych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, professor at the Department of Electronics and Electrical Engineering, Kiev National University of Technologies and Design, Kiev; tel.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.

Кожем'якін Сергій Михайлович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри "Загальна електротехніка"; м. Харків; тел.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.

Кожемякин Сергей Михайлович – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", старший преподаватель кафедры "Общая электротехника"; г. Харьков; тел.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.

Kozhemyakin Sergei Mikhailovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of General electrical engineering; Kharkov; tel.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.