

¹О. О. ШАВЬОЛКІН (д-р техн. наук, проф.), Є.Ю. СТАНОВСЬКИЙ,²Н.Л. ТЮТЮННИК¹Державний вищий навчальний заклад

«Київський національний університет технологій та дизайну»

shavolkin@gmail.com²Державний вищий навчальний заклад

«Донецький національний технічний університет»

natalia.tiutiunnyk@donntu.edu.ua

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ СТАНДАРТАМ ЯКОСТІ СТРУМУ В ТОЧЦІ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО МЕРЕЖІ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ БАТАРЕЄЮ

Розглянуто питання забезпечення відповідності стандарту якості струму мережі змінного струму в точці підключення локального об'єкта з фотоелектричною системою у разі нелінійного навантаження та несинусоїдальної напруги мережі за використання багатофункціонального мережевого інвертора. Це досягається компенсацією вищих гармонік струму конденсатору фільтру в точці підключення до мережі. Обґрунтовано структуру фільтру та визначення параметрів силових кіл і напруги на вході інвертора за несинусоїдальної напруги мережі. Удосконалено структуру системи керування з введенням зв'язку за струмом конденсатора фільтру в канал формування завдання струму інвертора та визначення параметрів контуру регулювання струму інвертора. Виконано моделювання в системі «мережа - інвертор - навантаження» з оцінкою втрат потужності в ключах інвертору у разі синусоїдальної та несинусоїдальної напруги мережі.

Ключові слова: комбінована система електроживлення, фотоелектрична сонячна батарея, перетворювальний агрегат, мережевий інвертор, контур регулювання струму, коефіцієнт гармонік, моделювання.

Постановка проблеми. В альтернативній енергетиці з розподіленими поновлюваними джерелами електроенергії (ПДЕ) широко застосовуються комбіновані системи електроживлення (КСЕ) локальних об'єктів з підключенням до централізованої мережі змінного струму (ЦМ) з напругою 0.4 кВ. За цього достатньо дорогі перетворювальні агрегати (ПА) з фотоелектричними сонячними батареями (СБ) використовуються тільки в денний час і завантажені по максимуму тільки в години найбільшої сонячної активності. Згідно [1] загальна ефективність використання обладнання такої установки не перевищує 20%. І це стосується умов Азії.

В КСЕ навантаження локального об'єкта і вихід ПА підключаються до ЦМ. За цього коефіцієнт гармонік (THD_{i1}) струму ЦМ i_1 згідно стандартам МЕК для об'єктів з джерелами розподіленої генерації [2, 3] повинен не перевищувати 5%. З іншого боку щодо якості напруги u_1 для ЦМ загального призначення діє стандарт [4], що припускає несинусоїдальність напруги ($\text{THD}_{u1} \leq 8\%$) і нормує її гармонійний склад (до 40-ї гармоніки). І тут виникає певне протиріччя, яке потрібно розв'язати, оскільки це не може не впливати на якість струму i_1 . Так, за активного навантаження об'єкта у разі $\text{THD}_{u1} = 8\%$ маємо для струму $\text{THD}_{i1} = 8\%$. Нескладно розрахувати коефіцієнт гармонік струму і за активно-індуктивного навантаження. Так, наприклад, за $\cos\varphi = 0.9$ у разі наявності в напрузі u_1 лише 3-ї та 5-ї гармонік з амплітудами згідно [4] маємо для напруги $\text{THD}_{u1} = 7.81\%$ та струму $\text{THD}_{i1} = 4.05\%$. За наявності нелінійного навантаження, зазвичай, це випрямлячі у складі побутової техніки, оргтехніки, приладів промислового призначення і, навіть, світлодіодні системи освітлення, має місце генерація вищих гармонік у струм ЦМ. Отже виникає питання виключення вищих гармонік струму в точці підключення локального об'єкта до ЦМ. Перспективним рішенням, що розв'язує проблему, є використання в ПА багатофункціональних мережевих інверторів [5, 6] з суміщенням функції силового активного фільтру (САФ). Це забезпечує близьке до 1 значення коефіцієнта потужності при обмеженні вищих гармонік струму за цілодобового використання ПА та інші функції [7].

Аналіз попередніх досліджень. Поєднання мережевим автономним інвертором напруги (АІН) функції САФ для компенсації впливу на ЦМ власного навантаження локального об'єкта в КСЕ розглядається в [5, 6, 7, 8] для «денного» та «нічного» режимів. «Денний» режим має місце за генерації енергії СБ, «нічний» - за відсутності генерації. Реалізація функції САФ, а також передачі енергії в ЦМ найбільш просто реалізується при використанні АІН в режимі джерела струму. За цього контур регулювання струму (КРС) мережевого АІН повинен забезпечувати мінімальну похибку відпрацьовування струму довільної форми. І в цьому плані досягнуті достатньо хороші показники практично у всьому діапазоні змінювання струму ЦМ [6].

Проте за цього, здебільшого, як і в [6] не враховується вплив несинусоїдальності напруги РМ, що обумовлює додаткове спотворення струму навантаження та впливає на налаштування КРС і визначення параметрів силових кіл мережевого інвертора. У разі використання в точці підключення до РМ конденсатора фільтра за несинусоїдальної напруги він також обумовлює вищі гармоніки струму РМ. Це унеможливує забезпечення $THD_{i1} \leq 5\%$ із зменшенням значення першої гармоніки струму i_1 , що генерується в РМ або споживається з неї. Разом з тим, є певні можливості компенсації гармонік струму конденсатора фільтра.

Отже, питання щодо реалізації багатофункціональних мережевих АІН у складі ПА КСЕ вивчено недостатньо і потребує додаткового дослідження. Перспективним за цього виглядає удосконалення принципів усунення похибки КРС і компенсації вищих гармонік струму конденсатора фільтра у разі використання ШІМ.

Мета роботи. Забезпечення відповідності міжнародним стандартам показників якості струму в точці підключення ПА КСЕ локального об'єкту з фотоелектричною батареєю до ЦМ у всьому діапазоні змінювання струму шляхом удосконалення структури контуру регулювання струму мережевого АІН.

Задачі, що потребують вирішення:

- вивчити вплив несинусоїдальності напруги ЦМ на визначення параметрів мережевого АІН;
- розробити структуру силових кіл та системи керування, що забезпечить компенсацію вищих гармонік в точці підключення до мережі;
- розробити математичну модель на ПК системи: «ЦМ - ПА з СБ - навантаження».

Викладення основного матеріалу. Загальні принципи реалізації однофазних і трифазних ПА КСЕ в цілому подібні. Розглянемо «класичну» структуру однофазного ПА (рис.1), що містить: мостовий АІН з вихідним реактором $L1$ та сонячну батарею СБ з перетворювачем напруги ПН (СБ+ПН), що підтримує задане значення напруги U на вході АІН. АІН підключений до ЦМ з напругою $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ (U_{1m} – амплітуда напруги ЦМ, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, $f = 50$ Гц) і навантаження. Навантаження активно-індуктивне і нелінійне (некерований випрямляч). Для придушення вищих гармонік у спільній точці підключення до ЦМ використовується ємнісний фільтр (C_ϕ з незначним R_ϕ). Отже маємо LC – фільтр, а з урахуванням індуктивності ЦМ L_M фактично LCL-фільтр. Резистор R_ϕ призначений для зниження добротності фільтра (зменшення коливальності). Для вимірювання струмів та напруги передбачені відповідні датчики (ДС і ДН).

Робота АІН паралельно з ЦМ в режимі джерела струму передбачає, що напруга в ланці постійного струму

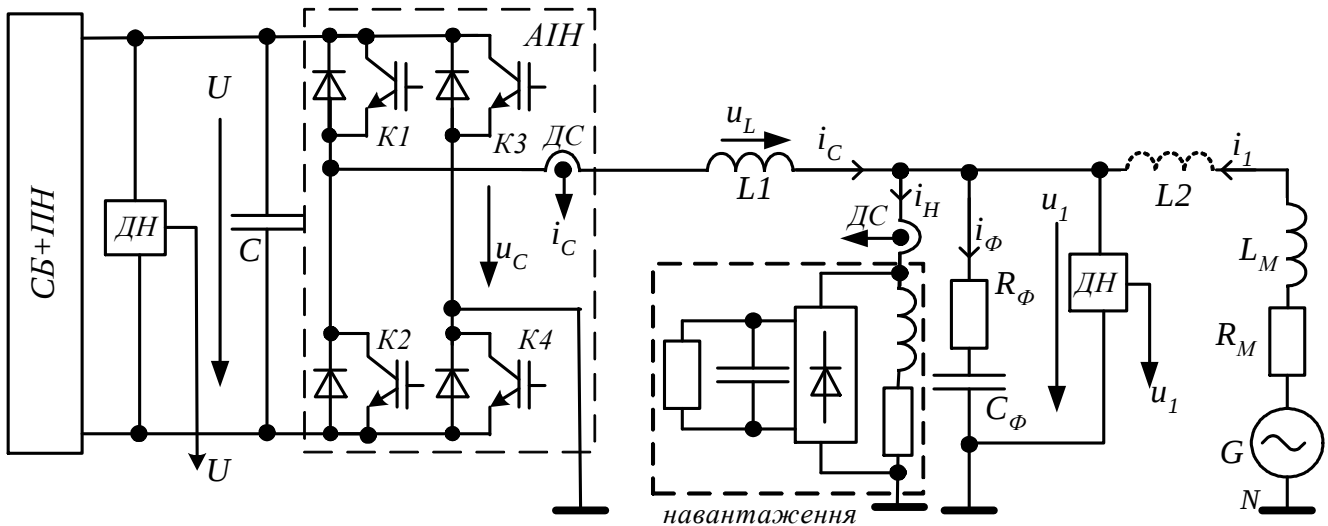


Рисунок 1 - Структура силових кіл однофазного ПА КСЕ

$U = aU_{gm}$ ($a > 1$) [6, 7]. За цього швидкість змінювання (похідна) вихідного струму АІН di_C/dt повинна перевищувати максимальне значення відносно завдання струму di^*_C/dt . У разі формування синусоїдального струму максимальне значення $(di^*_C/dt)_{MAX} = \omega I_{CmMAX}$ (I_{CmMAX} – амплітуда для максимального значення струму АІН). Вважаємо, що значення індуктивності L вихідного реактора не залежить від струму і є постійним. Значення di_C/dt можна визначити згідно напрузі на вихідному реакторі АІН

$$u_L = u_C - u_1 = L \frac{di_C}{dt}.$$

Розглянемо випадок, коли $u_1 = U_{1m}$. За цього u_L і, відповідно, di_C/dt мають найменші значення. Гранична умова $di_C/dt = \omega I_{CmMAX}$, тоді $U_L = U - U_{gm} = L(\omega I_{CmMAX})$. Звідси

$$a > 1 + \frac{L \cdot \omega \cdot I_{CmMAX}}{U_{gm}}.$$

Відповідно, мінімальне значення $(\frac{di_C}{dt})_{MIN} = \frac{(a-1)U_{gm}}{L}$, а максимальне (за $u_g=0$) $(\frac{di_C}{dt})_{MAX} = \frac{aU_{gm}}{L}$.

При суміщенні АІН функції САФ і роботі на нелінійне навантаження форма струму АІН спотворюється при стрибкоподібній зміні di_C/dt . В умовах невизначеності моменту часу (зсуву фази відносно напруги u_g), коли здійснюється ця зміна, слід орієнтуватись на мінімальне значення похідної струму. Коректне визначення a сприятиме усуненню похибки формування струму. Надлишкове значення a призводить збільшення втрат енергії на перемикання ключів АІН. За несинусоїдального струму навантаження i_H отримуємо для i_C додаткові гармоніки з кратністю $n=1, 3, 5, \dots$ та амплітудою $I_{m(n)}=I_{m(1)}/n$. В роботі [6] запропоновано умову

$$a \geq 1 + 2 \frac{L \cdot \omega \cdot I_{CmMAX}}{U_{1m}}.$$

Індуктивність реактора АІН, виходячи з відносного до напруги ЦМ значення напруги реактору U_L (за першою гармонікою) для максимального струму АІН I_{CmMAX} (діюче значення)

$$L = \frac{bU_{gm}}{\omega \sqrt{2} I_{CmMAX}},$$

$$\text{де } b = \frac{U_L}{U_g} = \frac{\omega L \cdot I_{CmMAX}}{U_g} \quad (U_g - \text{діюче значення напруги ЦМ}).$$

За цього, наприклад, для $a=1.3$, $U_L=220$ В, $I_{CmMAX}=25$ А значення $\omega I_{CmMAX}=11100$ А/с, di_C/dt змінюється від 22285.7 А/с до 96571.4 А/с.

Наявність вищих гармонік напруги ЦМ призводить до додаткового спотворення форми струму навантаження, навіть за відсутності нелінійного навантаження. Відповідне збільшення di_C/dt для різних гармонік є різним і потребує підвищення напруги U (значення a). Аналітичне визначення di_C/dt за цього є складним, але можливо шляхом моделювання (табл.1).

Так, якщо потрібно збільшити мінімальне значення швидкості вдвічі $(\frac{di_C}{dt})_{MIN} = \frac{(a-1)U_{gm}}{L}$ відносно значення, що відповідає $a=1.3$, то відповідне значення a становитиме $a=1.6$.

Вплив вихідного фільтру АІН. За несинусоїдальної напруги ЦМ відносно значення гармонік струму конденсатора $i_{C\phi}$ (до 1-ї гармоніки)

$$I_{C\phi(n)}=n \cdot \omega \cdot C_{\phi} U_{1(1)} \cdot u_{1(n)}= n \cdot I_{Cf(1)} \cdot u_{1(n)},$$

де $u_{1(n)}$ – відносне значення відповідної гармоніки напруги ЦМ.

Так, для 13-ї гармоніки з $u_{1(13)}=0.03$ [6] маємо відносне значення амплітуди 13-ї гармоніки $I_{mC\phi(13)}=13 \cdot 0.03 \cdot I_{mC\phi(1)}=0.39 \cdot I_{mCf(1)}$. Якщо $C_{\phi}=60$ мкФ [6] у разі $f=50$ Гц та $U_g=220$ В маємо $I_{mC\phi(1)}=5.88$ А і $I_{mC\phi(13)}=2.29$ А. Очевидно, що за незначних значень 1-ї гармоніки струму це унеможливило забезпечення якості струму ($THDi \leq 5\%$).

Певне послаблення впливу струму конденсатора досягається зменшенням C_{ϕ} . Але можливості цього обмежені, оскільки це призведе до збільшення рівня модуляційних гармонік струму ЦМ.

Певні можливості, щодо підвищення ефективності придушення модуляційних гармонік за відповідного зменшення ємності конденсатору дає використання LCL – фільтру. До того ж, за певного значення індуктивності ЦМ (L_M), це не потребує використання додаткових реакторів. Значення L_M може змінюватися в широких межах залежно від відстані об'єкта до трансформатору розподільчого пункту. Тому в загальному випадку слід передбачити реактор L_2 (на рис.1 показано пунктиром). Слід враховувати, що в цьому разі слід забезпечити стійкість системи. Це досягається збільшенням (на порядок) опору R_{ϕ} . Так в [6, 7] за $C_{\phi}=60$ мкФ значення $R_{\phi}=0.3$ Ом. Отже можна прийняти $R_{\phi} \geq 3$ Ом.

Проте, навіть за значення $C_{\phi}=10$ мкФ отримуємо $I_{mC\phi(13)}=2.29/6=0.382$ А. У разі амплітуди струму ЦМ $I_{1m(1)}=10$ А відносне значення цієї гармоніки становить 3.82%. За меншого значення $I_{1m(1)}$ відносне значення гармоніки буде зростати, що унеможливило виконання умови $THDi \leq 5\%$.

Для підтримання близького до 1 коефіцієнта потужності в завданні струму для КРС слід враховувати 1-шу гармоніку струму фільтру $I_{mCf(1)}$. В [6, 7] це значення задається відповідно значенню напруги і C_{ϕ} . Що стосується вищих гармонік, виникає питання щодо їхньої компенсації для забезпечення $THDi \leq 5\%$.

Як варіант, можливо введення сигналу $i_{C\phi}$ в канал формування завдання струму АІН, як це здійснюється в КРС відносно до струму навантаження. Для виключення впливу модуляційних гармонік струму АІН, що замикаються через конденсатор C_{ϕ} , слід використовувати фільтр. Внаслідок фазового зсуву фільтру компенсація буде дійсно ефективною лише для гармонік низького порядку.

Структура системи керування. Структура блока завдання струму АІН і контуру регулювання струму (рис.2) містить підсумкові пристрої, пропорційну ланку з коефіцієнтом k , інтегруючу ланку $\frac{g}{p}$, ланку динамічної компенсації ДК, блок множника, блок компараторів БК з розподільвачем імпульсів керування ключами АІН, генератор модулюючої напруги ГМН u_{TP} (трикутної форми симетричної відносно нуля), блок фазового автопідстроювання частоти ФАПЧ, диференціюючу ланку ($i_\phi = C_\phi \frac{du_1}{dt}$), фільтр Φ , вузол компенсації зсуву за фазою сигналу струму $C_\phi \delta \cos \omega t$. БК шляхом порівняння за рівнем сигналу з виходу пропорційної ланки та u_{TP} реалізує однополярну модуляцію (ШІМ) вихідної напруги АІН. Ланка динамічної компенсації ДК має передавальну функцію $\frac{L}{j} p$. За наявності датчика струму C_ϕ , його сигнал подається до Φ .

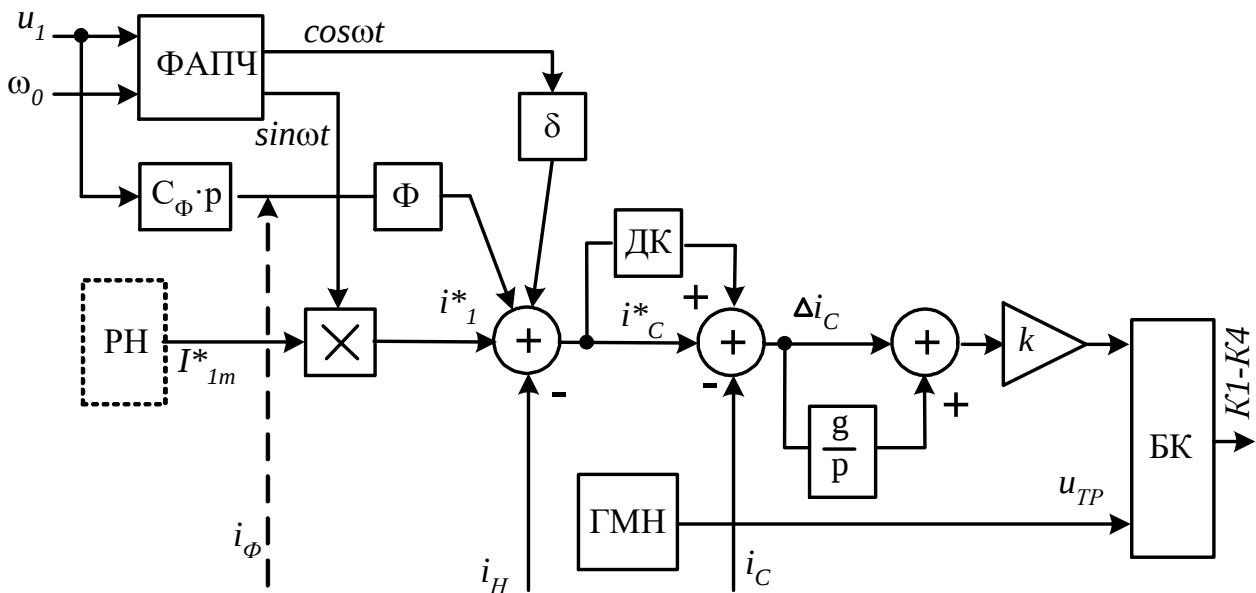


Рисунок 2 - Структура блока завдання струму АІН і КРС

Коефіцієнт пропорційної ланки без урахування коефіцієнтів передавання датчиків за одиничної амплітуди модулюючої напруги $u_{TPm}=1$ згідно [9]

$$k \leq \frac{1}{4 \cdot \Delta I_{CmMAX}}.$$

Коефіцієнт $j = U / u_{TPm}$.

Коефіцієнт інтегрувальної ланки $g = \frac{f_M}{k} (f_M - \text{частота модуляції})$.

Згідно сигналу завдання амплітуди струму мережі I_{1m}^* з виходу зовнішнього регулятора напруги РН (підтримує напругу на вході АІН на заданому рівні $U=U^*$) формується синусоїдальний сигнал завдання струму мережі i_{1c}^* , що за генерації енергії СБ у мережу зсунутий по відношенню до напруги u_g на 180° , а у разі споживання енергії з мережі співпадає за фазою. Завдання струму мережевого АІН визначається з урахуванням струму навантаження i_H , струму конденсатору C_ϕ , що подається через фільтр Φ і сигналу $\delta \cos \omega t$, який компенсує зсув фази фільтром Φ за 1-ю гармонікою. ФАПЧ згідно напрузі ЦМ u_1 і заданому значенню кутової частоти ω_0 формує сигнал $\sin \omega t, \cos \omega t$.

Імітаційне моделювання в Matlab та його результати. Структура моделі (рис.3) містить АІН з системою керування СК, джерело постійного струму ДПС, навантаження з комбінуванням постійного нелінійного навантаження (некерований випрямляч з вихідним ємнісним фільтром і потужністю навантаження 900 Вт) та RL навантаження. Загальна потужність навантаження за $I_{Hm(1)}=19.7$ А, $\varphi_{(1)}=27^\circ$ $P_H=2745$ Вт і становить близько 0.5 від максимальної потужності АІН. Спектр струму навантаження за синусоїдальною напругою u_1 наведено на рис.4. Модель ЦМ (220 В, $f=50$ Гц) містить опори $R_M=0.1$ Ом, $X_{LM}=0.06$ Ом, $X_{L2}=0.04$ Ом, параметри фільтра $R_f=5$ Ом,

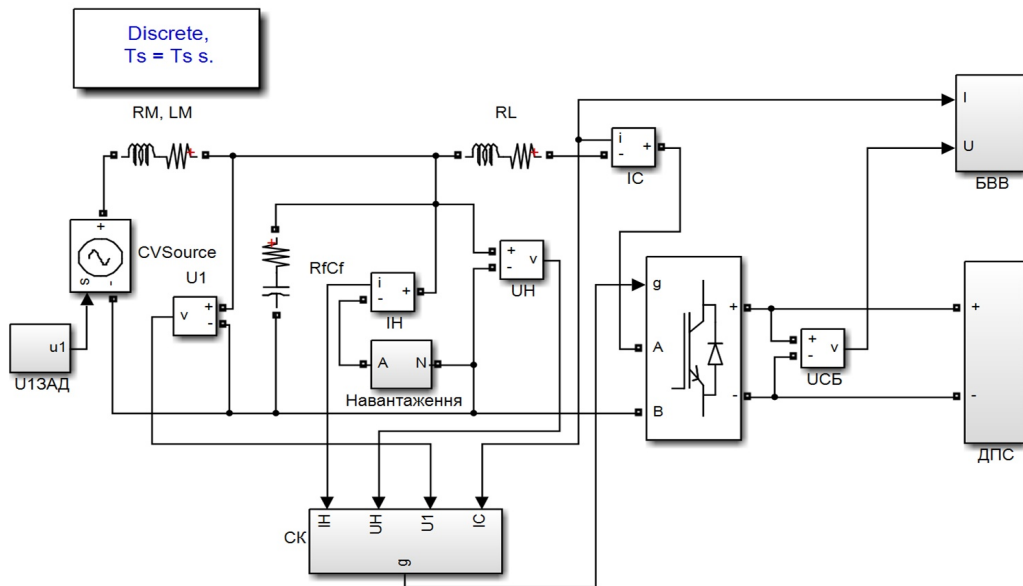


Рисунок 3 - Структура моделі системи

$C_f=10$ мкФ. В якості джерела напруги використано кероване за напругою джерело CV Source, до входу завдання напруги якого підключено блок, що визначає u_1 , як суму гармонік заданої амплітуди. Струм мережевого АІН $I_{CMAX}=25$ А ($I_{CmMAX}=35.35$ А). Параметри вхідного кола випрямляча обрані за умови обмеження швидкості змінювання вхідного струму значенням $di_{VD}/dt \approx 2\omega I_{CmMAX}$, що відповідає значенню $a=1.3$.

Для спрощення аналізу роботи КРС здійснювалось безпосереднє завдання амплітуди струму ЦМ I_{1m}^* (без використання зовнішнього РН) за постійного заданого значення напруги ДПС. Також в моделі використано блок визначення втрат потужності БВВ в ключах АІН, що побудовано за відомими принципами [10].

Розглянуто роботу системи за синусоїдальної та несинусоїдальної напруги РМ.

В табл.1 наведені значення максимальної швидкості змінювання струму завдання АІН $(di^*/dt)^*$ за наявності в напрузі ЦМ окремих гармонік з кратністю n до основної та всіх одночасно (all – до 17-ї) до $di^*/dt=29000$ А/с (за даних параметрів навантаження) при синусоїдальній напрузі РМ ($n=1$). Значення гармонік обрані відповідно з [4]. Дослідження показали, що достатнім можна вважати $a=1.6$ ($U=500$ В).

За прийнятих параметрів схеми та частоти модуляції $f_m \geq 8$ кГц мінімальне значення сталої часу фільтру (першого порядку) Φ становить $1 \cdot 10^{-4}$ с. В цьому разі система є стійкою до збурень.

В табл.2 наведені значення $THDi_1$ за наявності в напрузі ЦМ однієї вищої гармоніки з порядком n у разі використання компенсації за струмом $i_{C\Phi}$ для мінімальних значень I_{1m}^* , коли $THDi_g \leq 5\%$. Також в табл.2 для цих же значень струму наведені значення THD^*i_1 за відсутності компенсації.

Аналогічні данні наведені в табл.3 у разі комбінації декількох гармонік напруги ЦМ. Значення гармонік напруги ЦМ задавались згідно стандарту [4].

Спектри струму мережі за синусоїдальної і несинусоїдальної напруги з компенсацією за струмом $i_{C\Phi}$ наведені на рис.5. Неважко побачити, що компенсація вищих гармонік залежить від порядку

гармоніки (n) і зі збільшенням n погіршується. Так за однакового значення $u_{1(3)}=u_{1(7)}=5\%$ значення відповідних гармонік струму ЦМ суттєво відрізняються (рис.5,б). Осцилограми напруги u_1 , u_C , струмів i_1 , i_C , i_N та $(di^*/dt)10^4$ за відсутності та наявності компенсації за $I_{1m}^*=3$ А наведені на рис. 6.

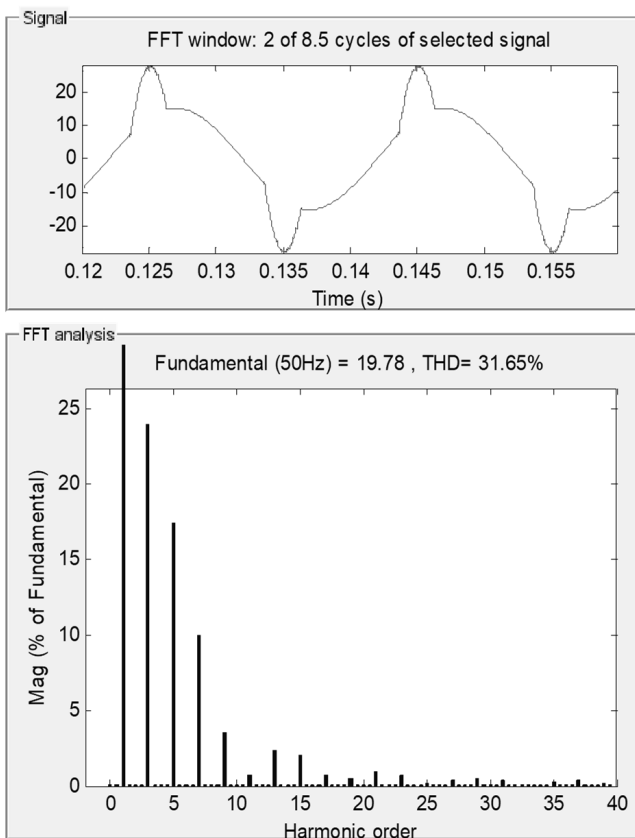


Рисунок 4 - Спектр струму навантаження

Збільшення напруги на вході АІН до $U=500$ В призводить до зростання втрат потужності в ключах АІН порівняно з $U=405$ В. Так, за синусоїдальної напруги ЦМ у разі $I_{1m}^*=3$ А зростання втрат порівняно з випадком, коли $U=405$ В ($a=1.3$) становить 18% (ККД=0.968, THDi=4.22%).

Таблиця1 – Відносне значення максимальної швидкості змінювання струму завдання АІН

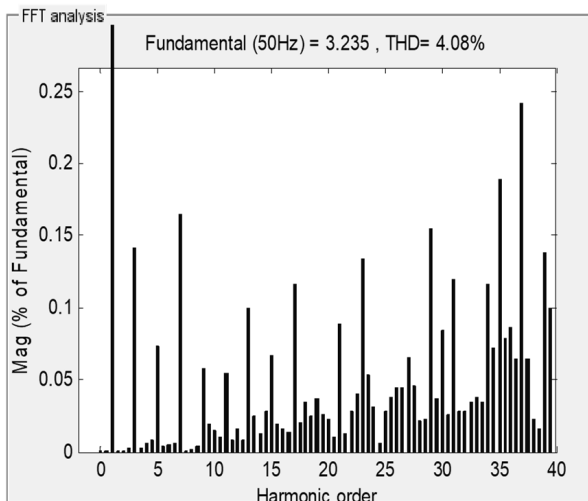
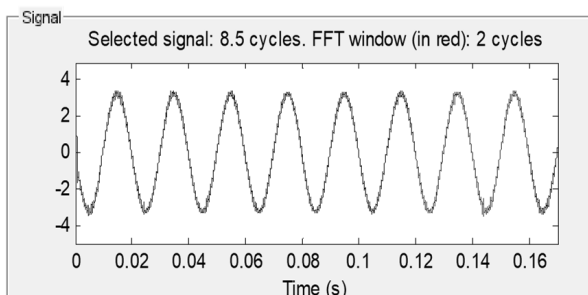
n	1	3	5	7	9	11	13	all
$(di^*/dt)^*$, в.о.	1	0.82	1.5	1.41	0.93	1.59	1.26	2.24

Таблиця.2 – Коефіцієнт гармонік (THD) струму ЦМ за наявності одної гармоніки u_1

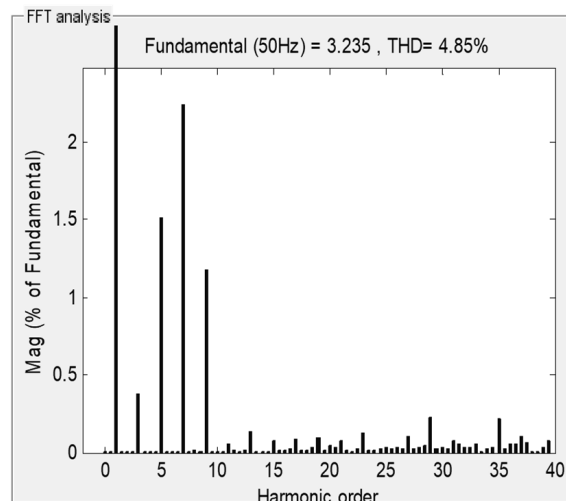
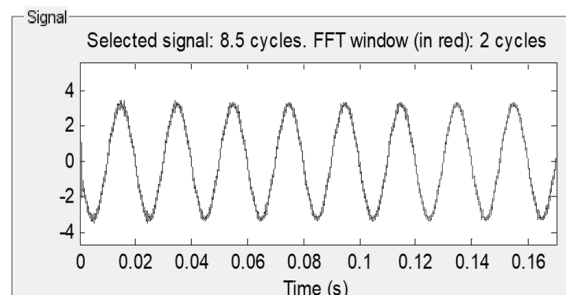
n	1	3	5	7	9	11	13	17
I_{1m}^* , А	3.2	2.6	2.7	2.9	2.6	3.7	4	4.2
THDi1, %	4.08	7.21	12	12.9	6.87	11.2	10.6	9.14
THD*i1, %	4.08	4.69	4.84	4.88	4.73	4.8	4.79	4.89

Таблиця 3 – Коефіцієнт гармонік (THD) струму ЦМ за комбінації гармонік u_1

n	3+5	3+5+7	3+5+7+9	3+5+7+9+11	3+5+7+9+11+13	3+5+7+9+11+13+17
I_{1m}^* , А	2.8	3.2	3.2	4.2	5	7
THDi1, %	12.78	15.76	16.31	15.63	15.42	12.33
THD*i1, %	4.79	4.67	4.85	4.91	4.96	4.74



а)



б)

Рисунок 5 - Спектр струму i_1 :

а) за синусоїдальної напруги u_1 ; б) за наявності 3-ї, 5-ї, 7-ї, 9-ї гармонік u_1

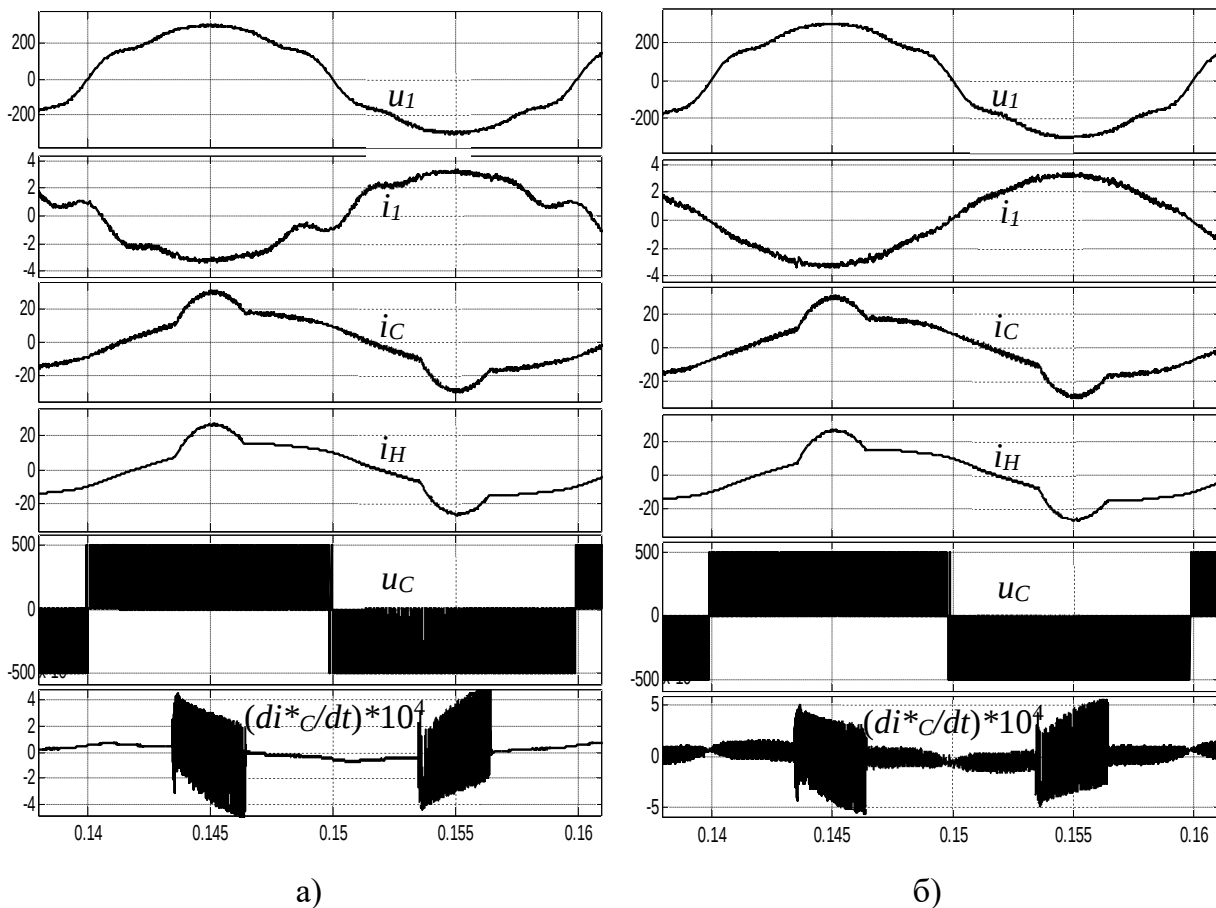


Рисунок 6 - Осцилограми напруги та струмів i $(di^*/dt) \cdot 10^4$ за наявності в напрузі u_1 3-ї та 5-ї гармонік: а) за відсутності компенсації; б) у разі компенсації

Висновки. Обґрунтовано визначення параметрів силових кіл та напруги на вході мережевого інвертора з урахуванням припустимих значень вищих гармонік напруги мережі, визначених стандартом. Забезпечення відповідної стандартам МЕК якості струму в точці підключення локального об'єкту до мережі потребує компенсації вищих гармонік, обумовлених відповідними гармоніками напруги мережі. Це досягається зміною структури вихідного фільтру мережевого інвертора за відповідних параметрів його елементів в поєднанні з компенсуючим зв'язком за струмом фільтру в контурі регулювання струму. Запропонована структура контуру регулювання струму інвертора з введенням до блоку завдання струму сигналу струму конденсатора фільтру. Це забезпечує компенсацію гармонік струму навантаження поряд з гармоніками струму фільтру, що дозволяє підтримувати якість струму мережі за значення $THDi_1 \leq 5\%$ практично у всьому діапазоні його змінювання. З урахуванням отриманих рішень розроблена математична модель на ПК для системи «мережа – ПА – навантаження». Результати моделювання використані під час визначення параметрів ПА і підтверджують працездатність запропонованих рішень. Подальший напрямок досліджень – дослідження можливостей зниження втрат енергії в силових колах перетворювального агрегату.

Стаття підготовлена на кафедрі «енергоменеджменту та прикладної електроніки» КНУТД в рамках науково-дослідної роботи «Принципи створення енергоефективних перетворювальних агрегатів комбінованих систем електроживлення з поновлювальними джерелами». Фінансування роботи здійснюється за кошти гранту, наданого міністерством освіти й науки України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. IEEE Std 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. <http://www.ieee.org>.
3. 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Date of Publication: 6 April 2018. Electronic ISBN: 978-1-5044-4639-6. DOI: [10.1109/IEEESTD.2018.8332112](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112).
4. IEEE Std EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
5. Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng. Topologies and control strategies of multi-functional

grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013), pp.223–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033>.

6. Шавьолкін О.О. Удосконалення структури контура регулювання струму з використанням ШІМ для мережевого інвертора комбінованої системи електроживлення/ О. О. Шавьолкін// Технічна електродинаміка 3, 2019, с.37–45, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.037>

7. Shavelkin A. Multifunctional converter for single-phase combined power supply systems for local objects with a photovoltaic solar battery/ A. Shavelkin, I. Shvedchykova // *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2018, no.5, pp. 92-95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.092>

8. S. A. O. da Silva, L. P. Sampaio, and L. B. G. Campanhol, “Single-phase grid-tied photovoltaic system with boost converter and active filtering,” in 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 2502–2507, Istanbul, Turkey, June 2014. DOI: [10.1109/ISIE.2014.6865013](https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6865013).

9. Шавьолкін О.О. Усунення похибки контуру регулювання струму багатофункціонального однофазного мережевого інвертора/ О.О. Шавьолкін, В.В. Каплун, І.О. Шведчикова// Електротехніка і Електромеханіка. - 2019.- №4, с.35-40. doi: [10.20998/2074-272X.2019.4.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.05).

10. Шавьолкін О.О. Моделювання комбінованої системи електроживлення локального об'єкту з багатофункціональним перетворювальним агрегатом фотоелектричної батареї/ О.О.Шавьолкін, Є.Ю.Становський, М.О.Підгайний// Вісник КНУТД №4 (136), 2019.- с.20-33. <https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2019.4.2>.

REFERENCES

1. Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar (2006), "A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control", *IEEE Transactions*, pp.5203-5208.

2. IEEE Std 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. <http://www.ieee.org>.

3. 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Date of Publication: 6 April 2018. Electronic ISBN: 978-1-5044-4639-6. DOI: [10.1109/IEEESTD.2018.8332112](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112).

4. IEEE Std EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.

5. Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013), pp.223–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033>.

6. Shavolkin O.O. (2019) Udoshkonalennya struktury kontura rehulyuvannya strumu z vykorystannyam SHIM dlya merezhevoho invertora kombinovanoi systemy elektrozhyvlennya [Improvement of the structure of the current control loop using PWM for the network inverter of the combined power supply system] *Tekhnichna elektrodynamika IED NAN Ukrainy - Technical electrodynamics IED of NAS of Ukraine*, 3, 37–45 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.037>

7. Shavelkin A., Shvedchykova I. (2018) Multifunctional converter for single-phase combined power supply systems for local objects with a photovoltaic solar battery. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2018, no.5, pp. 92-95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.092>

8. S. A. O. da Silva, L. P. Sampaio, and L. B. G. Campanhol, “Single-phase grid-tied photovoltaic system with boost converter and active filtering,” in 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 2502–2507, Istanbul, Turkey, June 2014. DOI: [10.1109/ISIE.2014.6865013](https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6865013).

9. Shavolkin O.O., Kaplun V.V., Shvedchykova I.O. (2019) Usunennya pokhybky konturu rehulyuvannya strumu bahatofunktsional'noho odnofaznoho merezhevoho invertora [Elimination of the error of the current control circuit of the multipurpose single-phase network inverter]. *Elektrotekhnika i Elektromekhanik - Electrical Engineering and Electromechanics*, 4, 35-40. [in Ukrainian] DOI: [10.20998/2074-272X.2019.4.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.05).

10. Shavolkin O.O., Stanovskiy Ye.Yu., Pidhainyi M.O. (2019) Modeliuvannya kombinovanoi systemy elektrozhyvlennia lokalnoho ob'ektu z bahatofunktsionalnym peretvoriuvальnym ahrehatom fotoelektrychnoi bateriei [Modeling of the combined electric power system of a local object with a multifunctional converter unit of photovoltaic battery] *Visnyk KNUVD - Bulletin of KNUVD* 4(136), 20-33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2019.4.2>.

Надійшла до редколегії

Рецензент: д.т.н. Нікіфоров А. П.

O. O. SHAVOLKIN, YE. YU. STANOVSKYI, N. TIUTIUNNYK

State Institution of Higher Education «Kiev National University of Technologies and Design»

Ensuring compliance with standards for current at the point of connection to the network of a combined electric power system with a photovoltaic battery. The issue of ensuring compliance with the AC network current quality standard at the point of connecting a local object with a photovoltaic system in the case of non-linear load and non-

sinusoidal voltage when using a multifunctional grid inverter is considered. In this case, the values of higher harmonics allowed by the standard for the voltage quality of general-purpose networks were taken into account. To reduce the corresponding current harmonics generated by the filter capacitor at the point of connection to the network, the use of an output LCL filter is considered, which allows to reduce the capacitance of the capacitor. It is proposed to implement this in combination with the compensation of the higher harmonics of the capacitor current by an inverter. The structure and definition of the parameters of power circuits and voltage at the inverter input with non-sinusoidal grid voltage are substantiated. The structure of the control system has been improved with the introduction of a communication line for the current of the capacitor of the output filter into the channel for forming the inverter current reference, and the parameters of the inverter current control loop are determined. At the same time, a filter is introduced into the circuit of the capacitor current signal to suppress currents of modulation harmonics generated by the inverter. A model of the system "network - inverter - load" with the definition of power losses in the inverter keys in the case of sinusoidal and non-sinusoidal voltage is developed. This made it possible to clarify the parameters of the grid inverter. The simulation results confirm the possibility of providing a THD value of $\leq 5\%$ in almost the entire range of the grid current change in the presence of one voltage harmonic, as well as a combination of voltage harmonics.

Keywords: *combined electric power system, photovoltaic battery, converter unit, grid inverter, current control loop, THD, modeling.*