

УДК 621.314

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ****С. М. Левицький, В. С. Бомбик**

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021 Україна. E-mail: bombikvs@gmail.com

Синтезовано закон керування мережесим багаторівневим інвертором сонячного модуля, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області точки відбору максимальної потужності, що збільшує його продуктивність. Запропоновано вдосконалену модель регулятора поздовжньої складової струму інвертора, яка враховує поточну та задану напругу мережі й напругу сонячного модуля, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора як зі сторони сонячного модуля, так і з боку мережі за напругою. Запропоновано вдосконалену модель регулятора поперечної складової струму інвертора, що враховує задане значення активної потужності з вузла мережі та задане значення поперечної складової струму, яка необхідна для роботи інвертора в області точки відбору максимальної потужності, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора за частотою.

**Ключові слова:** багаторівневий інвертор напруги, керування, сонячний модуль.

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМ МНОГОУРОВНЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ****С. М. Левицкий, В. С. Бомбик**

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021 Украина. E-mail: bombikvs@gmail.com

Синтезирован закон управления сетевым многоуровневым инвертором солнечного модуля, который позволяет удерживать режим работы солнечного модуля в области точки отбора максимальной мощности, что увеличивает его производительность. Предложена усовершенствованная модель регулятора продольной составляющей тока инвертора, которая учитывает текущее и заданное напряжение сети и напряжение солнечного модуля, что позволяет оптимизировать работу инвертора как со стороны солнечного модуля, так и со стороны сети по напряжению. Предложена усовершенствованная модель регулятора поперечной составляющей тока инвертора, учитывающая заданное значение активной мощности из узла сети и заданное значение поперечной составляющей тока, которая необходима для работы инвертора в области точки отбора максимальной мощности, что позволяет оптимизировать работу инвертора по частоте.

**Ключевые слова:** многоуровневый инвертор напряжения, управление, солнечный модуль.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** За останні роки використання відновлюваних джерел електроенергії значно зросло, зокрема все більшу популярність здобувають сонячні електростанції. Як наслідок зросло виробництво тонкопліткових сонячних модулів [1]. Для формування вихідної змінної напруги у функції узгоджувальних пристроїв значну популярність здобули багаторівневі мережесим інвертори напруги, що виготовляються серійно [2]. Основною перевагою багаторівневих інверторів перед однорівневими є покращена форма вихідної напруги, менші втрати в силовій частині та покращена електромагнітна сумісність [3]. Але є також певні недоліки, а саме збільшення кількості силових ключів та відповідного ускладнення системи керування комутацією, а при використанні їх у межах сонячних електростанцій вимагає ще й додаткової адаптації до вимог існуючої електроенергетичної системи.

У роботах [3, 4] розглядаються моделі багаторівневих інверторів, які застосовуються у функції перетворювальних агрегатів регульованих асинхронних електроприводів. Указані моделі досліджені для двигунного режиму електроприводу з традиційною для багаторівневих інверторів векторною системою керування, проте в них відсутній аналіз роботи інверторів у генераторному режимі роботи електроприводу, аналіз паралельної роботи на електричну мережу, що підтверджує необхідність проведення досліджень у напрямку синтезу систем керування

багаторівневими інверторами, орієнтованими на застосування в сонячних електростанціях.

Результати роботи [5] орієнтовані на впровадження системи керування інвертором на рівні сонячної електростанції й загалом узгодження балансів активної та реактивної потужностей, що актуально для розподільчих електромереж і на практиці не використовується для низьковольтних мереж 0,4 кВ, які наближені до споживача. Тому така система потребує адаптації до вимог, більш актуальних для споживача, а це підтримання необхідних графіків напруги та частоти, тобто параметрів якості електроенергії.

Метою роботи є синтез закону керування мережесим багаторівневим інвертором напруги при роботі із сонячним модулем та пристроєм для реалізації даного закону, який враховує параметри інвертора, мережі, сонячного модуля, що дозволяє оптимізувати роботу останнього.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Значення напруги на виході фотоелектричних елементів сонячного модуля постійно змінюється внаслідок певних факторів, а саме: погодні умови, час доби та температура панелей [6]. Стан конденсатора батареї сонячних елементів також змінюється залежно від того, заряджений він чи розряджений. Важливим чинником з точки зору розробки системи керування інвертором є забезпечення роботи сонячного модуля в районі точки відбору максимальної потужності. Алгоритм пошуку такого режиму роботи повинен

передбачати пошук цієї точки в широкому діапазоні напруги для того, щоб уникнути попадання на локальні максимуми, що виникають унаслідок короточасних змін зовнішнього середовища (наприклад, попадання панелі в тінь невеликої хмари). Перевагою такого алгоритму є те, що пристрій буде знаходитись постійно в пошуку стану для роботи з максимальною продуктивністю. Даний алгоритм, який закладений у сонячних однорівневих інверторах напруги, які випускаються серійно, комбінується з обчисленням похідної потужності сонячного модуля від напруги на вході інвертора, яка прирівнюється до нуля, що надає системі керування значення шуканого квазіекстремуму або екстремумів у межах визначеного робочого діапазону напруг.

Відомо, що кожен сонячний модуль складається з набору сонячних батарей, які підключені одна до одної послідовно та/або паралельно. Сонячну батарею можна надати еквівалентним електричним колом, що показано на рис. 1 [7].

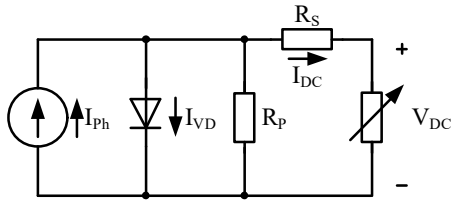


Рисунок 1 – Еквівалентна електрична схема сонячної батареї

Дану елементарну сонячну батарею можна описати рівняннями

$$I_{DC} = I_{ph} - I_{VD} - \frac{V_{DC} + I_{DC}R_s}{R_p}, \quad (1)$$

де  $I_{DC}$  і  $U_{DC}$  – вихідний струм і напруга сонячної батареї;  $I_{ph}$  – фотонний струм батареї;  $I_{VD}$  – струм діода;  $R_s$  і  $R_p$  – послідовно ввімкнений та шунтовий опори.

З урахуванням попереднього виразу, вихідна напруга сонячної батареї буде визначатись:

$$V_{DC} = (I_{ph} - I_{VD} - I_{DC})R_p - I_{DC}R_s. \quad (2)$$

Фотонний струм та струм діода залежать від освітленості та температури. Для заданої температури панелі  $T$  (Кельвін) та рівня освітленості  $G$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $I_{ph}$  та  $I_{VD}$  будуть обчислюватись згідно з виразом (3), де  $T_{ref}$  та  $G_{ref}$  є різницею температури ( $T_{ref} = 25^\circ\text{C} = 298\text{ K}$ ) і різницею рівня освітленості ( $G_{ref} = 1000\text{ Вт}/\text{м}^2$ ) при стандартних умовах;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт;  $I_{SC}$  – струм короткого замикання сонячної батареї;  $I_{0|T,G}$  – зворотній струм насичення діода;  $n$  – коефіцієнт ідеальності діода;  $q$  – стала Кулона ( $q=1,602\cdot 10^{-19}$  Кл);  $k$  – стала Больцмана ( $k=1,38\cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $E_g$  – область енергії, яка знаходиться між потоком валентної зони і дном зони провідності ( $E_g = 1,16 - 0,000702 \cdot T^2 / (T - 1108)$ );  $V_{OC}$  – напруга холостого ходу сонячної батареї. Значення  $\alpha$  та  $I_{SC}$  можна взяти з документації виробника.

$$\left\{ \begin{aligned} I_{ph|T,G} &= \frac{G}{G_{ref}} I_{ph|T,G_{ref}} = \\ &= \frac{G}{G_{ref}} I_{SC|T_{ref},G_{ref}} [1 + \alpha(T - T_{ref})]; \\ I_{VD|T,G} &= I_{0|T,G} \left[ e^{\frac{q(V+I\cdot R_s)}{nkT}} - 1 \right]; \\ I_{0|T,G} &= I_{0|T_{ref},G} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \times \\ &\times e^{\left( \frac{-qE_g}{nk} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)}; \\ I_{0|T_{ref},G} &= \frac{I_{SC|T_{ref},G_{ref}}}{e^{\left( \frac{qV_{OC_{ref}}}{nkT_{ref}} - 1 \right)}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Послідовний опір визначається за допомогою висловлених параметрів при нормальній температурі та рівні освітленості:

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{OC_{ref}}} - \frac{nkT_{ref}}{I_{0|T_{ref},G} q e^{\frac{qV_{OC_{ref}}}{nkT_{ref}}}}, \quad (4)$$

де  $\frac{dV}{dt} \Big|_{V_{OC_{ref}}}$  можна взяти з документації виробника сонячної батареї.

Графік залежності потужності, яку може видати сонячний модуль на мережевий інвертор при роботі із фактичною вихідною напругою, може бути отриманий шляхом моделювання системи рівнянь (3) та їх підстановки у вираз (2). Результат моделювання наведено на рис. 2.

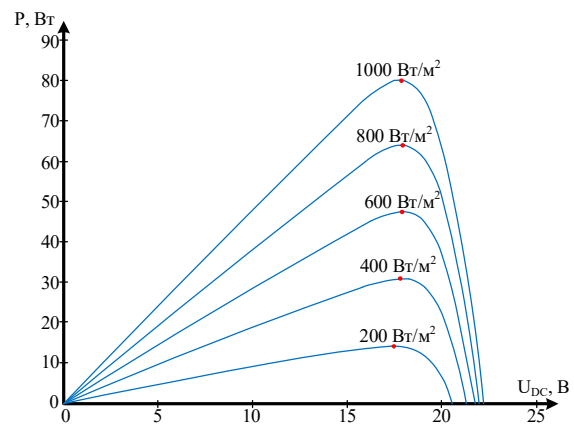


Рисунок 2 – Графік залежності потужності, яку може видати сонячний модуль на мережевий інвертор при роботі із фактичною вихідною напругою

У системах векторного керування інверторами використовується приведення трифазної системи струмів інвертора до ортогональної d-q системи координат. При цьому вихідна напруга на виході інвертора, відповідно, встановлюється пропорційною до поздовжньої складової струму  $I_d$ , а вихідна

потужність забезпечується відповідним значенням поперечної складової  $I_q$ . При узгодженні роботи багаторівневого інвертора з мережею для відслідковування точки квазіекстремуму вольт-амперної характеристики сонячного модуля поздовжня та поперечна складові струму багаторівневого інвертора будуть забезпечувати напругу та потужність, яка зі сторони входу інвертора зніматиметься із сонячного модуля, а зі сторони виходу буде віддаватись в ме-

режу. У роботі [8] зазначено, що гармоніки нижчого порядку сильно впливають на роботу інвертора, тому є сенс встановити L-фільтр між виходом інвертора напруги та мережею. З урахуванням вищеприданого та структури системи керування, яка надана в роботі [9], структура внутрішнього контуру системи керування багаторівневим інвертором та його силова частина матиме вигляд, наведений на рис. 3 (на прикладі тривірневого інвертора).

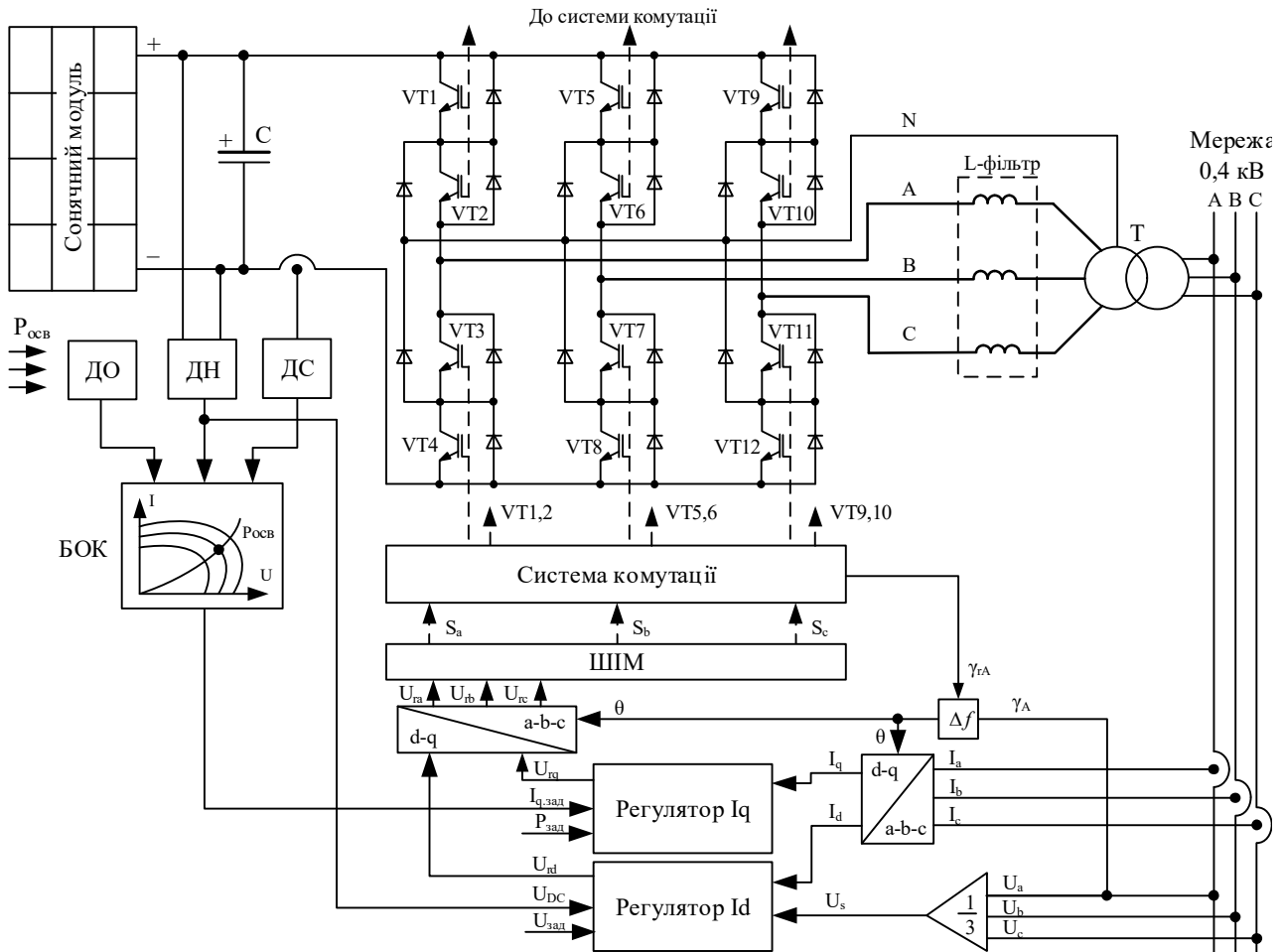


Рисунок 3 – Функціональна схема тривірневого мережевого інвертора з внутрішніми контурами регулювання струмів  $I_d$  та  $I_q$

Блок обчислення квазіекстремуму (БОК) обчислює координати області точки відбору максимальної потужності та формує сигнал завдання за струмом  $I_{q,зад}$  для регулятора поперечної складової  $I_q$  струму інвертора. Датчик вихідної напруги сонячного модуля формує сигнал завдання за напругою  $U_{DC}$  для регулятора поздовжньої складової  $I_d$  струму інвертора. Зворотні зв'язки вказаних регуляторів реалізуються шляхом переводу трифазної системи струмів  $I_a, I_b$  та  $I_c$  до ортогональної  $I_d$  та  $I_q$ . Таке перетворення здійснюється відповідно до кута електромагнітного навантаження інвертора  $\theta$ .

Кут електромагнітного навантаження інвертора  $\theta$  обчислюється системою в часовому інтервалі як

різниця частот напруги мережі та інвертора відповідно до

$$\theta = \int_0^{\pi} \Delta f dt. \quad (5)$$

Різниця частот визначається в часовому інтервалі на відповідному проміжку як час від моменту видачі команди системою комутації на вмикання ключа VT1 до моменту переходження через 0 кривої напруги мережі (по фазі A) в додатному напрямку (сигнал  $\gamma$ ).

Блок перетворення трифазної системи струмів “a-b-c” до ортогональної “d-q” описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} I_d = \frac{2}{3} \left( \begin{aligned} & i_a \cos \theta + \\ & + i_b \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ & + i_c \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right); \end{aligned} \right) \\ I_q = \frac{2}{3} \left( \begin{aligned} & i_a \sin \theta + \\ & + i_b \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ & + i_c \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Згідно з [10, 11], у синхронній системі координат  $dq$  можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} I_e^d r_2 + \frac{d\Psi_e^d}{dt} + j\Omega_e \Psi_e^d = 0; \\ I_e^q r_2 + \frac{d\Psi_e^q}{dt} + j\Omega_e \Psi_e^q = 0; \\ \frac{L_m r_2}{L_2} I = \frac{d\Psi_e}{dt} + \left( \frac{r_2}{L_2} + j\Omega_e \right) \Psi_2; \\ I = \frac{\Psi_e}{L_m} (1 + T_e p + jT_e \Omega_e), \end{cases} \quad (7)$$

де  $I_e^d$  та  $I_e^q$  – еквівалентні значення повздовжньої та поперечної складових струмів відповідно;  $r_2$  – опір вторинної обмотки трансформатора;  $\Psi_e^d$  та  $\Psi_e^q$  – еквівалентні значення потокозчеплень по поперечній та повздовжній осях;  $\Omega_e$  – еквівалентна частота;  $\Psi_e$  – еквівалентне значення потокозчеплення трансформатора;  $L_m$  – взаємна індукція первинної та вторинної обмоток;  $T_e$  – електромагнітна стала часу опору короткого замикання трансформатора ( $T_e = L_m / R_k$ );  $I$  – вихідний струм інвертора (геометрична сума струмів повздовжньої та поперечної складових).

Повздовжню складову струму можна записати:

$$I_d = \frac{\Psi_e}{L_m} (1 + T_e p) = \frac{w_e \Phi_e}{L_m} (1 + T_e p), \quad (8)$$

де  $w_e$  – еквівалентна кількість витків обмоток трансформатора;  $\Phi_e$  – еквівалентне значення магнітного потоку в магнітопроводі.

Рівняння (8) можна переписати наступним чином:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{w_e}{L_m} \frac{E}{4,44 w_e f \sqrt{2}} (1 + T_e p) \approx \\ &\approx \frac{U}{4,44 L_m f \sqrt{2}} (1 + T_e p). \end{aligned} \quad (9)$$

Як видно із залежності (8), за допомогою повздовжньої складової струму  $I_d$  регулюється магнітний потік трансформатора, а, відповідно, з (9) – напруга мережі.

У мережах змінного струму частота значною мірою залежить від дотримання балансу активної потужності. Тому як регульований критерій частоти можна вибрати непряме регулювання активної потужності. Активна потужність може перетворюватись в енергію іншого виду, тому в закон керування багаторівневим інвертором напруги слід закласти не тільки потужність, яка видається (або споживається) в мережу, але й потужність, яка поступає з боку сонця на сонячний модуль.

Фактично активна потужність, яка віддається в мережу через трансформатор, матиме свій механічний еквівалент, що може бути виражений через відповідну частоту та момент:

$$P_e = M_e \Omega_e. \quad (10)$$

Частота  $\Omega_e$  визначатиметься як

$$\Omega_e = \frac{2\pi f}{p_e}, \quad (11)$$

де  $f$  – частота напруги мережі та інвертора після синхронізації.

Еквівалентний момент, згідно з [11], буде:

$$M_e = \frac{3}{2} p_e \frac{L_m}{L_2} \Psi_e I_q. \quad (12)$$

Поперечну складову струму можна надати:

$$I_q = \frac{\Psi_e}{L_m} T_e \Omega_e. \quad (13)$$

Домножимо ліву й праву частину (12) на  $\Omega_e$ :

$$M_e \Omega_e = \frac{3}{2} p_e \frac{L_m}{L_2} \Psi_e I_q \Omega_e. \quad (14)$$

З урахуванням (5) запишемо:

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{3}{2} p_e \frac{L_m}{L_2} \Psi_e I_q \frac{2\pi f}{p_e}; \\ P_e &= 3\pi f \frac{L_m}{L_2} \Psi_e I_q. \end{aligned}$$

Виразимо поперечну складову струму  $I_q$ :

$$I_q = \frac{P_e L_2}{3\pi f L_m \Psi_e}. \quad (15)$$

Отже, як видно з (15), поперечною складовою встановлюється відповідний баланс активної потужності з виходу сонячного модуля та потужності, яка відбирається мережею.

З урахуванням вищесказаного, для забезпечення режиму утримання сонячного модуля в точці максимальної потужності автоматичні регулятори напруги (повздовжньої складової струму інвертора  $I_d$ ) та потужності (поперечної складової струму інвертора  $I_q$ ) будуть функціонувати відповідно до ПІД-закону регулювання та описуються системою рівнянь

$$\begin{cases}
 I_{q.zad} = k_p k_{\theta.osv} P_{osv} + k_p P_{zad} + \\
 \quad + k_u U_{DC} - k_i I_{DC}; \\
 U_{rq} = k_{pq} \left( \begin{aligned}
 &k_{rq.nid} (I_{q.zad} - I_q) + \\
 &+ \frac{1}{T_{iq}} \int_0^t (I_{q.zad} - I_q) dt + \\
 &+ T_{dq} \frac{d(I_{q.zad} - I_q)}{dt}; \end{aligned} \right) \\
 I_{d.zad} = k_{ni} \left( \begin{aligned}
 &(U_{zad} + U_{DC} k_{DC.nid} - \\
 &- U_s k_{s.nid}); \end{aligned} \right) \\
 U_{rd} = k_{pd} \left( \begin{aligned}
 &k_{rd.nid} (I_{d.zad} - I_d) + \\
 &+ \frac{1}{T_{id}} \int_0^t (I_{d.zad} - I_d) dt + \\
 &+ T_{dd} \frac{d(I_{d.zad} - I_d)}{dt}, \end{aligned} \right)
 \end{cases} \quad (16)$$

де  $k_{pd}$  і  $k_{pq}$  – коефіцієнти підсилення регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора відповідно;  $T_{id}$  та  $T_{iq}$  – постійні часу інтегрування регуляторів;  $T_{dd}$  – стала часу диференціювання каналу регулювання  $I_d$ ;  $U_{rd}$  та  $U_{rq}$  – вихідні сигнали регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора;  $k_p$  – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення потужності до відповідного значення струму;  $k_{\theta.osv}$  – ваговий коефіцієнт підсилення значення потужності, що поступає на датчик освітлення;  $P_{zad}$  – задане значення потужності сонячного модуля;  $k_u$  – коефіцієнт із розмірністю провідності для приведення напруги в каналі задання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора;  $U_{DC}$  – напруга на виході датчика напруги сонячного модуля;  $k_i$  – коефіцієнт нахилу регульовальної характеристики;  $I_{DC}$  – значення струму, яке поступає на БОК з виходу датчика струму;  $k_{rq.nid}$  – коефіцієнт підсилення П-складової вихідної напруги  $U_{rq}$ ;  $k_{ni}$  – коефіцієнт приведення сигналу напруги до струму;  $U_{zad}$  – задане значення напруги, яке повинен підтримувати сонячний модуль;  $U_{DC}$  – значення напруги на виході датчика напруги;  $k_{DC.nid}$  – коефіцієнт підсилення напруги з виходу датчика напруги;  $U_s$  – середнє значення напруги мережі;  $k_{s.nid}$  – коефіцієнт підсилення значення напруги мережі;  $k_{rd.nid}$  – коефіцієнт підсилення П-складової напруги  $U_{rd}$ .

Блок зворотного перетворення ортогональної системи обчислених оптимальних значень струмів  $I_{rd}$  та  $I_{rq}$  до трифазної системи напруг керування плечами моста інвертора  $U_{ra}$ - $U_{rb}$ - $U_{rc}$  працює відповідно до системи

$$\begin{cases}
 U_{ra} = I_{rd} \sin \theta + I_{rq} \cos \theta; \\
 U_{rb} = \frac{1}{2} \left( \begin{aligned}
 &(\sqrt{3} \sin \theta - \cos \theta) I_{rq} - \\
 &-(\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) I_{rd} \end{aligned} \right); \\
 U_{rc} = -U_{ra} - U_{rb}.
 \end{cases} \quad (17)$$

Необхідно провести дослідження моделей регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора та перевірити на стійкість. Також із метою встановлення оптимальних параметрів складових струму інвертора складемо комп'ютерну модель (рис. 4), яка побудована відповідно до синтезованого закону (16).

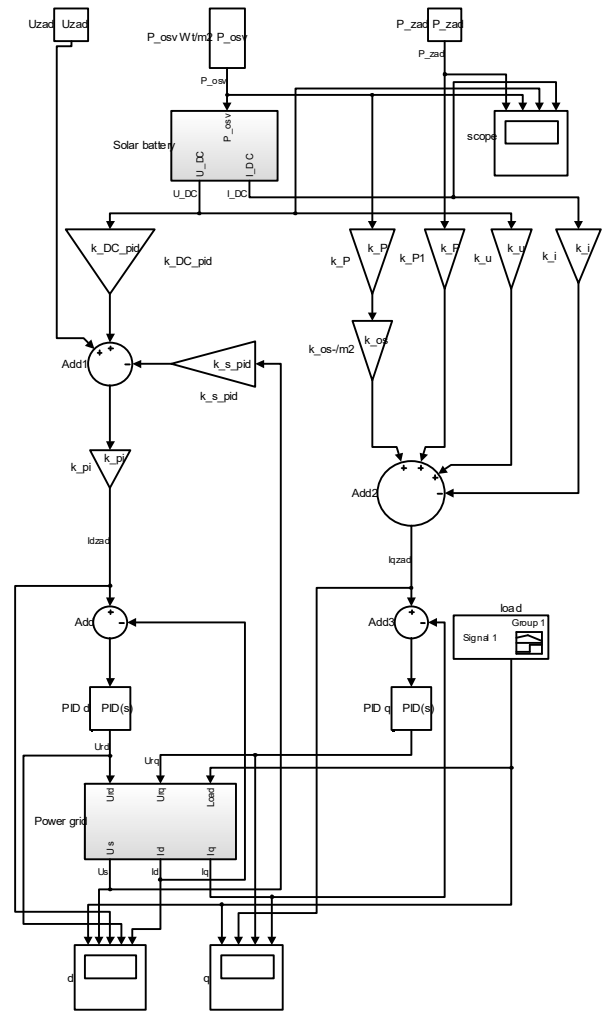


Рисунок 4 – Комп'ютерна модель для перевірки адекватності роботи регуляторів d та q складових струму інвертора

У даній моделі:  $U_{zad}$  – задане значення напруги мережі;  $P_{osv}$  – значення потужності, яка сприймається від освітлення;  $P_{zad}$  – задане значення потужності сонячного модуля;  $Solar\ battery$  – модель сонячної батареї;  $PID\ d$  – ПІД-регулятор поздовжньої складової струму інвертора;  $PID\ q$  – ПІД-регулятор поперечної складової струму інвертора;  $load$  – заданий графік навантаження;  $Power\ grid$  – модель мережі.

У моделі сонячної батареї (*Solar battery*) передбачається функціонування об'єкта відповідно до системи рівнянь (3).

У моделі мережі (*Power grid*) враховується взаємний вплив потужності й частоти, а також напруги навантаження на поперечну та повздовжню складові струму інвертора.

Результати моделювання для ПІД-регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора зображено на рис. 5.

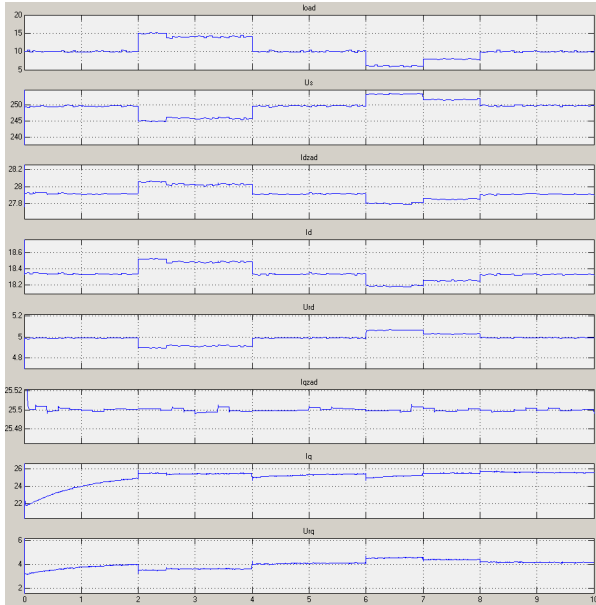


Рисунок 5 – Результати моделювання для ПІД-регулятора повздовжньої складової струму інвертора

Задане та фактичне значення рівня освітленості, вихідний струм та напруга сонячної батареї показані на рис. 6.

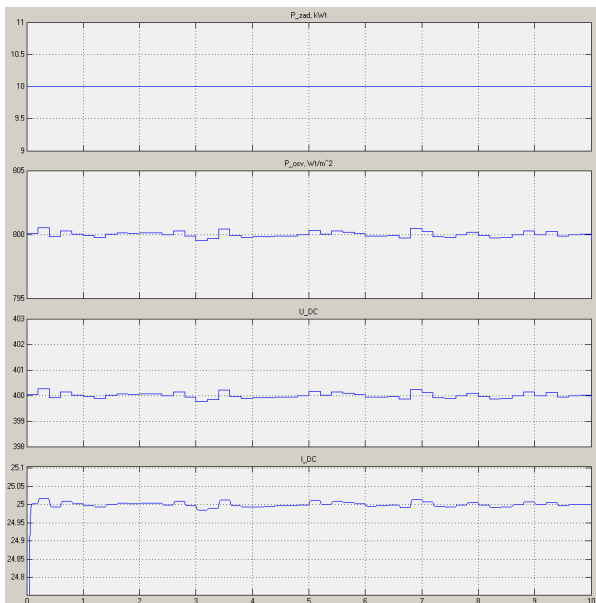


Рисунок 6 – Задане та фактичне значення рівня освітленості, вихідний струм і напруга сонячної батареї

**ВИСНОВКИ.** Синтезовано закон керування багаторівневим мережним інвертором сонячної електростанції та удосконалено структуру для його реалізації, що поєднує задачі утримання режиму роботи сонячного модуля в точці відбору максимальної потужності, що дозволяє збільшити продуктивність сонячного модуля, привести у відповідність баланс згенерованої сонячним модулем та спожитої електричної потужності в режимі реального часу. Побудовано комп'ютерну модель, в яку закладено синтезований закон керування та перевірено систему на стійкість.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Rekinger. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014–2018 // European Photovoltaic Industry Association. – Belgium: Brussels, 2014. – 57 p.
2. Corzine K.A. Operation and design of multilevel inverters. – University of Missouri: Rolla, 2005. – 79 p.
3. Волков А.В., Скалько Ю.С. Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – Вип. 4/2008 (51), част. 1. – С. 14–17.
4. Жемеров Г.Г. Тугай Д.В., Титаренко И.Г. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения // Электротехника и электромеханика. – 2013. – Вып. 2. – С. 40–47.
5. Охоткин Г.П., Серебренников А.Г. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/106-7345>.
6. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Собчук Д.С. Оцінювання впливу джерел відновлювальної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – Вип. 6. – С. 45–47.
7. Meng Yue and Xiaoyu Wang. A Revised Incremental Conductance MPPT Algorithm for Solar PV Generation Systems // Sustainable Energy Technologies Department Brookhaven National Laboratory Upton. – NY 11973. – USA, 2015.
8. Simeen S. Mujawar, Karve G.M. Control of grid connected inverter system for sinusoidal current injection with improved performance // Novateur publications international journal of innovations in engineering research and technology [IJERT]. – ISSN: 2394-3696. – Iss. 2 (1). – 2014.
9. Левицький С.М. Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції. // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – Вип. 5.
10. FR-A700 Преобразователь частоты. Руководство по эксплуатации. – С. 246–249. – Режим доступа: <http://mitsubishi.drives-ua.com/pdf/fr-a700-operating-instructions.pdf>
11. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

## THE CONTROL SYSTEM FOR MULTILEVEL VOLTAGE INVERTOR

S. Levitsky, V. Bombyk

Vinnytsia National Technical University

vul. Khmelnytske shose, 95, Vinnytsia, 21021, Ukraine. E-mail: bombikvs@gmail.com

**Purpose.** To synthesize a law of control of multilevel voltage inverter at work with the solar module and device for the implementation of this law, which consider parameters of the voltage inverter, a power grid and solar module that allows to optimize a workflow of inverter. Improve the regulator model of longitudinal component of inverter current, which consider actual current, a given value of power grid voltage and voltage of the solar modules. Improve the regulator model of transversal component of inverter current, which consider a given value of grid active power and given value of transversal component of inverter current, which is necessary for work of inverter at the point of area of maximum power selection. To build a computer model to check the adequacy of the model. **Methodology.** We have applied the mathematical simulation of multilevel voltage inverter at work with the solar module and power grid. **Results:** We have improved the regulator models of longitudinal and transversal components of inverter current. We have developed a mathematical model of automatic voltage regulators (longitudinal component of the inverter current  $I_d$ ) and power (transversal component of the inverter current  $I_q$ ), which operate according to the law PID control. This law provides hold the solar module at the point of area of maximum power selection. **Originality.** For the first time, we have synthesized mathematic model for regulators of  $d$  and  $q$  components of inverter current at work with the solar module and power grid. **Practical value.** We checked the adequacy of the mathematical model by the computer simulation. References 12, figures 7.

**Key words:** multilevel voltage inverter, control, solar module, PID regulator.

## REFERENCES

1. Gaëtan, Masson, Sinead, Orlandi and Manoël, Rekinger (2014), "Global Market Outlook For Photovoltaics", *European Photovoltaic Industry Association*, Brussels, Belgium.
2. Corzine, K.A. (2005), "Operation and design of multilevel inverters", *University of Missouri, Rolla*, 79 p.
3. Volkov, A.V. and Skalko, Yu.S. (2008), "High-voltage asynchronous electric drive with three-level autonomous voltage inverter", *Novosty KDPU imeni Mikhaila Ostrogradskogo*, Vol. 4, no. 1, part 1, pp. 14–17. (in Russian)
4. Zhemerov, G.G. (2013), "The modeling of AC electric drive with cascade multi-level voltage inverter", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, Vol. 2, pp. 40–47. (in Russian)
5. Ohotkin, G.P. and Serebrenikov, A.G. (2012), "The basic principles of construction of stand alone solar power station", *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, Vol. 6, Available at: <http://www.science-education.ru/106-7345>. (in Russian)
6. Lezhniuk, P.D., Komar, V.O. and Sobchuk, D.S. (2013), "The evaluating of influence of renewable energy source on balance reliability providing in power network", *Visnyk Vinnytskoho Politechnichnoho Institutu*, Vol. 6, pp. 45–47. (in Ukrainian)
7. Meng, Yue and Xiaoyu, Wang (2015), "A Revised Incremental Conductance MPPT Algorithm for Solar PV Generation Systems", *Sustainable Energy Technologies Department Brookhaven National Laboratory Upton, NY 11973, USA*.
8. Simeen, S. Mujawar and Karve, G.M. (2014), "Control of grid connected inverter system for sinusoidal current injection with improved performance", *Novateur publications international journal of innovations in engineering research and technology [IJERT]*, ISSN 2394-3696, Vol. 1, no. 2.
9. Levitsky, S.M. (2015), "The Control System for Multilevel Invertor of Solar Power Station", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, Vol. 5. (in Ukrainian)
10. FR–A700. Frequency inverter. Manual (2012), pp. 246–249, Available at: <http://mitsubishi.drives-ua.com/pdf/fr-a700-operating-instructions.pdf> (in Russian)
11. Usoltsev, A.A. (2006), *Chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigateljami* [Frequency control of asynchronous motors], ITMO, St. Petersburg. (in Russian)

Стаття надійшла 28.01.2016.