

**МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ**

Розроблено мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області відбору максимальної потужності, що збільшує його продуктивність. В розроблений пристрій закладено математичну модель регулятора поздовжньої складової струму інвертора, яка враховує поточну та задану напругу мережі та напругу сонячного модуля, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора як зі сторони сонячного модуля, так і з боку мережі за напругою, а також закладено модель регулятора поперечної складової струму інвертора, яка 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, мікроконтролер, математична модель.

S.M. LEVITSKIY, V.S. BOMBYK
Vinnitsya National Technical University, Ukraine

MICROPROCESSOR DEVICE OF CONTROL SYSTEM OF GRID MULTILEVEL VOLTAGE INVERTER

Abstract - Have been developed microprocessor device of system of grid multilevel voltage inverter of solar module that allows to hold the solar module operation in terms of selection of the maximum power, which increases productivity. In developed device laid mathematical model of the longitudinal component of the inverter current, which considers current and desired grid voltage and voltage of the solar module, which allow to optimize inverter as the part of the solar module and from the network voltage, and laid a model of regulator of transverse component of inverter current, which allows for a given value of active power and grid node set to transverse component of the current, which is necessary for the inverter selection in terms of maximum power that allows to optimize work of inverter for frequency.

Keywords: multilevel voltage inverter, control, solar module, microcontroller, mathematical model.

Вступ

В складі будь-якої сонячної електростанції для формування вихідної змінної напруги в якості узгоджувальних пристроїв використовуються багаторівневі мережеві інвертори напруги [1]. Основною перевагою багаторівневих інверторів перед однорівневими є покращена форма вихідної напруги, менші втрати в силовій частині та покращена електромагнітна сумісність [2]. Але є також певні недоліки, а саме збільшення кількості силових ключів та відповідного ускладнення системи керування комутацією, а при використанні їх в межах сонячних електростанцій вимагає ще й додаткової адаптації до вимог існуючої електроенергетичної системи.

В роботах [3, 4] розглядаються моделі багаторівневих інверторів, які застосовуються в якості перетворювальних агрегатів регульованих асинхронних електроприводів. Вказані моделі досліджені для двигунного режиму електроприводу з традиційною для багаторівневих інверторів векторною системою керування, однак в них відсутній аналіз роботи інверторів в генераторному режимі роботи електроприводу, аналіз паралельної роботи на електричну мережу, що підтверджує необхідність проведення досліджень в 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 і 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. В роботах [6-8] запропоновані схемотехнічні рішення для побудови мікропроцесорної системи керування багаторівневим інвертором напруги, однак, вони не враховують узгодження роботи багаторівневого інвертора з мережею для відслідковування точки квазіекстремуму вольт-амперної характеристики сонячного модуля.

Метою роботи є підвищення надійності функціонування системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, за рахунок розробки мікропроцесорного пристрою, який враховує параметри інвертора, мережі, сонячного модуля, що дозволяє оптимізувати роботу останнього.

Результати дослідження

В роботі [9] запропоновано математичну модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, яка враховує параметри інвертора, мережі та сонячного модуля. Для забезпечення режиму утримання сонячного модуля в точці максимальної потужності автоматичні регулятори напруги (поздовжньої складової струму інвертора I_d) та потужності (поперечної складової

струму інвертора I_q) описуються системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{q,зад} = k_p \cdot k_{в.осв} \cdot P_{осв} + k_p \cdot P_{зад} + k_u \cdot U_{DC} - k_i \cdot I_{DC}, \\ U_{rq} = k_{pq} \cdot \left(k_{rq,під} \cdot (I_{q,зад} - I_q) + \frac{1}{T_{iq}} \cdot \int_0^t (I_{q,зад} - I_q) dt + \right. \\ \left. + T_{dq} \cdot \frac{d(I_{q,зад} - I_q)}{dt} \right), \\ I_{d,зад} = k_{п.і} \cdot (U_{зад} + U_{DC} \cdot k_{DC,під} - U_s \cdot k_{s,під}), \\ U_{rd} = k_{pd} \cdot \left(k_{rd,під} \cdot (I_{d,зад} - I_d) + \frac{1}{T_{id}} \cdot \int_0^t (I_{d,зад} - I_d) dt + \right. \\ \left. + T_{dd} \cdot \frac{d(I_{d,зад} - I_d)}{dt} \right), \end{array} \right. \quad (1)$$

де k_{pd} та 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; $k_{в.осв}$ – ваговий коефіцієнт підсилення значення потужності, що поступає на датчик освітлення; $P_{зад}$ – задане значення потужності сонячного модуля; k_u – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення напруги в каналі завдання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора; U_{DC} – напруга на виході датчика напруги сонячного модуля; k_i – коефіцієнт нахилу регулювальної характеристики; I_{DC} – значення струму яке поступає на БОК з виходу датчика струму; $k_{rq,під}$ – коефіцієнт підсилення П-складової вихідної напруги U_{rq} ; $k_{п.і}$ – коефіцієнт приведення сигналу напруги до струму; $U_{зад}$ – задане значення напруги, яке повинен підтримувати сонячний модуль; U_{DC} – значення напруги на виході датчика напруги; $k_{DC,під}$ – коефіцієнт підсилення напруги з виходу датчика напруги; U_s – середнє значення напруги мережі; $k_{s,під}$ – коефіцієнт підсилення значення напруги мережі; $k_{rd,під}$ – коефіцієнт підсилення П-складової напруги U_{rd} .

Запропоновано структурну схему мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги (рис. 1), який функціонує згідно із рівняннями системи (1). На рис.1: 1.1-1.3 – датчики для вимірювання струмів в трифазній мережі (Ia, Ib, Ic); 2.1-2.3 – датчики для вимірювання напруг в трифазній мережі (Ua, Ub, Uc); 3 – датчик освітленості (IS); 4 – датчик струму сонячного модуля (CS); 5 – датчик напруги сонячного модуля (VS); 6.1-6.3 – комутатори; 7.1-7.3 – пристрої вибірки і запам'ятовування; 8 – цифровий сигнальний процесор; 9 – блок вибору режиму роботи; 10 – перетворювач сигналу.

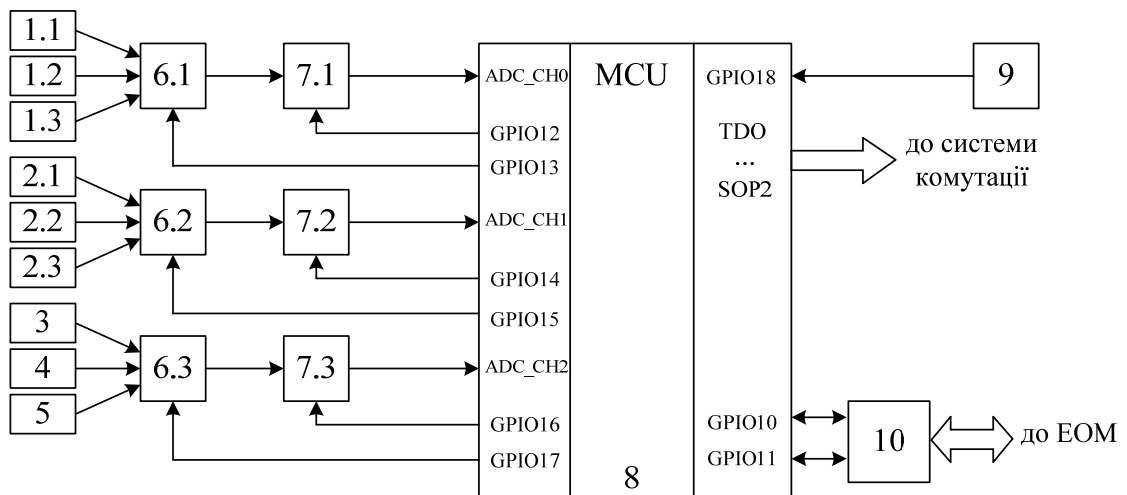


Рис. 1. Структурна схема мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги

Реалізувати запропоновану систему керування мережевим багаторівневим інвертором сонячного модуля, можна використовуючи наприклад 32-розрядний цифровий сигнальний процесор CC3200 виробництва фірми Texas Instruments, який для вирішення поставленої задачі має в своєму складі 64 програмованих канали портів вводу/виводу, модуль 12-розрядного АЦП з чотирма мультиплексованими входами та іншою периферією. Процесор має оптимізовану структуру команд.

Датчики освітленості 3, струму 4 та напруги 5 підключені до входів комутатора 6.3, вихід якого

підключений до входу пристрою вибірки і запам'ятовування 7.3, вихід якого підключений безпосередньо до входу цифрового сигнального процесора ADC_CH2. Датчики напруги 5 та струму 4 призначені для вимірювання вихідної напруги та струму сонячного модуля. Датчик освітленості 3 призначений для вимірювання рівня освітленості сонячного модуля.

Датчики струму 1.1-1.3 та датчики напруги 2.1-2.3 призначені для вимірювання значень струму та напруги у відповідних фазах трифазної мережі, та підключені до входів комутаторів 6.1 та 6.2, виходи яких підключені до входів пристроїв вибірки та запам'ятовування 7.1 та 7.2, виходи яких підключені до входів цифрового сигнального процесора ADC_CH0 та ADC_CH1 відповідно.

Блок вибору режиму роботи 9 дозволяє вибрати один з чотирьох можливих режимів роботи мікропроцесорного пристрою, а саме:

- 1) напряму з мережею;
- 2) з врахуванням параметрів сонячного модуля (напруги, струму, рівня освітленості);
- 3) з врахуванням параметрів мережі;
- 4) з врахуванням параметрів сонячного модуля та мережі.

Перетворювач сигналу 10 призначений для перетворення сигналу для передачі даних з мікропроцесорного пристрою до ЕОМ.

Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою наведений на рис. 2.

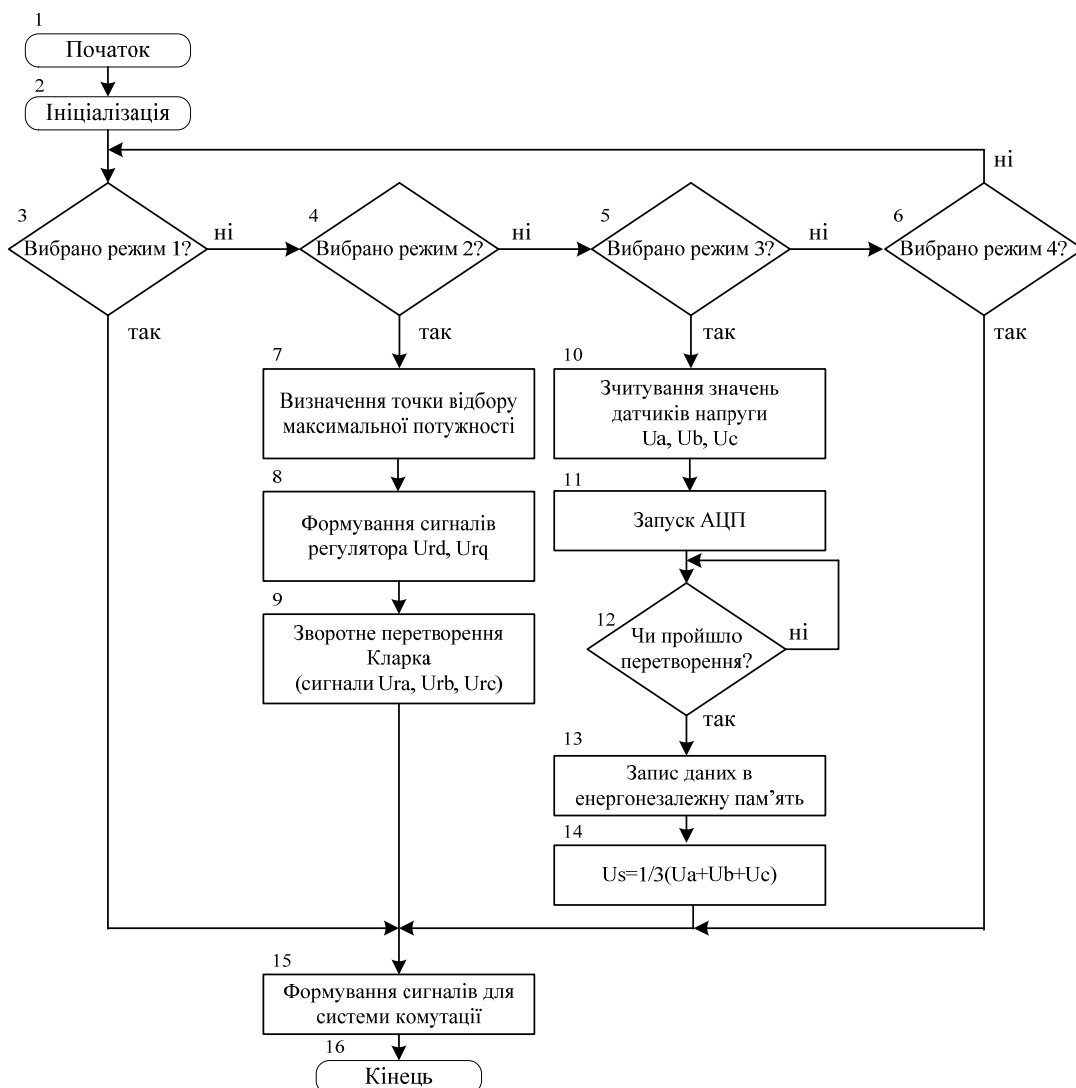


Рис. 2. Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою

Алгоритм роботи пристрою містить такі складові:

- 1) в блоках 3-6 реалізована перевірка, який обрано режим роботи пристрою;
- 2) в блоці 7 реалізований алгоритм визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем (представлений на рис. 3) [10];
- 3) в блоках 8-9 відбувається формування вихідних сигналів регуляторів поперечної та повздожньої складових струму інвертора та сигналів, які необхідні для проведення векторної ШІМ;
- 4) в блоці 10 відбувається зчитування значень датчиків напруги трифазної мережі;

- 5) в блоках 11-13 відбувається перетворення аналогових сигналів в цифрову форму, перевірка чи відбулось перетворення та запис даних в енергонезалежну пам'ять;
 6) в блоці 14 визначається середнє значення напруги мережі;
 7) в 15 блоці реалізований алгоритм формування сигналів для системи комутації, який представлений на рис. 4.

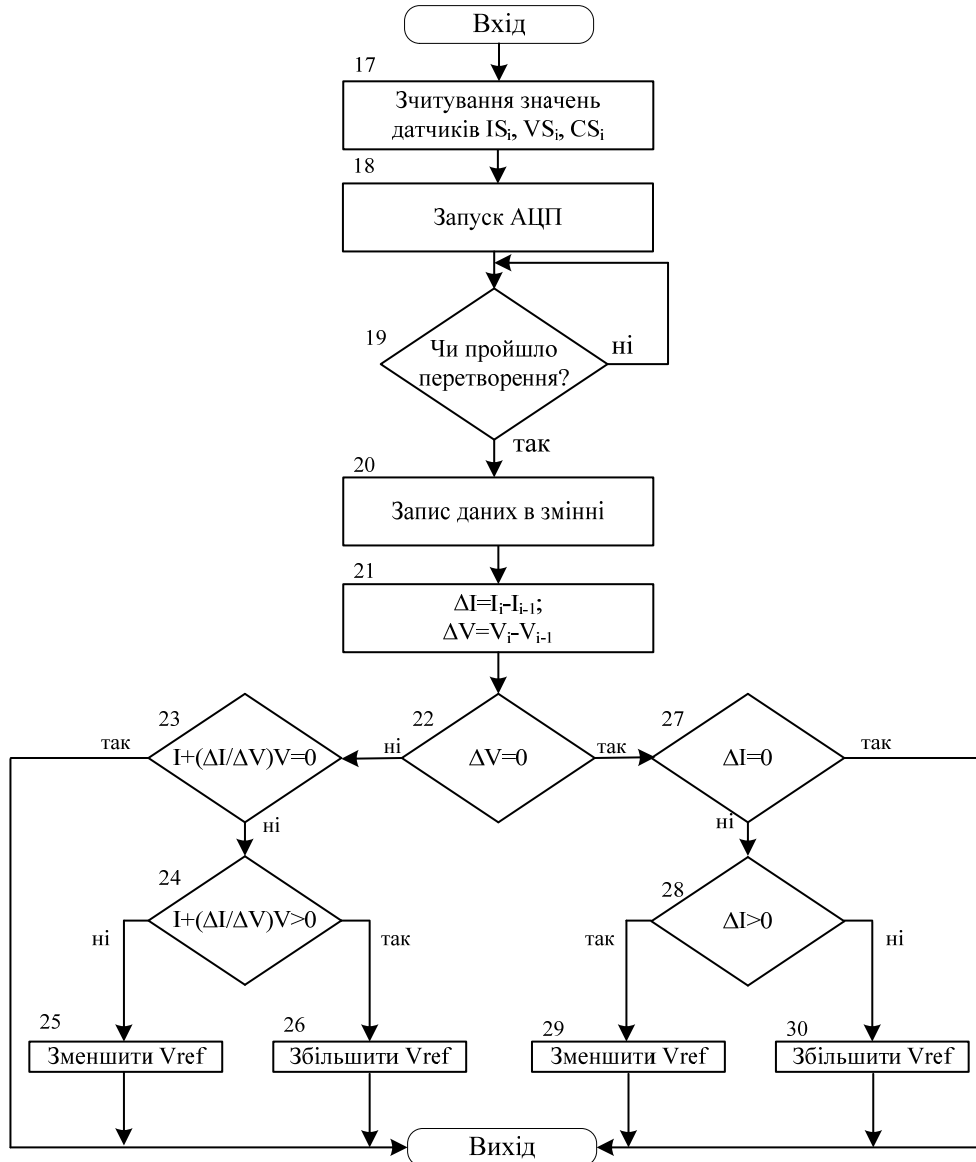


Рис. 3. Алгоритм визначення точки максимального відбору потужності сонячним модулем

В блоках 17-20 відбувається зчитування значень датчиків освітленості, напруги та струму сонячного модуля, перетворення цих сигналів в цифрову форму та збереження в змінні.

В блоках 21-30 реалізований алгоритм інкрементної провідності для визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем. Даний алгоритм працює в режимі пошуку точки робочої напруги, в якій провідність рівна інкрементній провідності. В цій точці система зупиняє збурення в робочій точці. Перевага цього алгоритму полягає в тому, що він дозволяє встановити відносну «відстань» до точки відбору максимальної потужності, тому він дозволяє точно визначити коли система знаходиться в точці квазіекстремуму. Крім цього даний алгоритм пристосований для роботи системи в сильно мінливих погодних умовах та має менш коливальну поведінку навколо точки квазіекстремуму порівняно із іншими алгоритмами [11].

Алгоритм, який показаний на рисунку 4, є комбінацією алгоритму формування сигналів для системи комутації для режимів 3 та 4. В блоках 31-34 відбувається зчитування значень струму трифазної мережі та їх перетворення в цифрову форму, а також зберігання даних в енергонезалежну пам'ять. В блоці 35 відбувається перетворення Кларка, яке описується системою рівнянь:

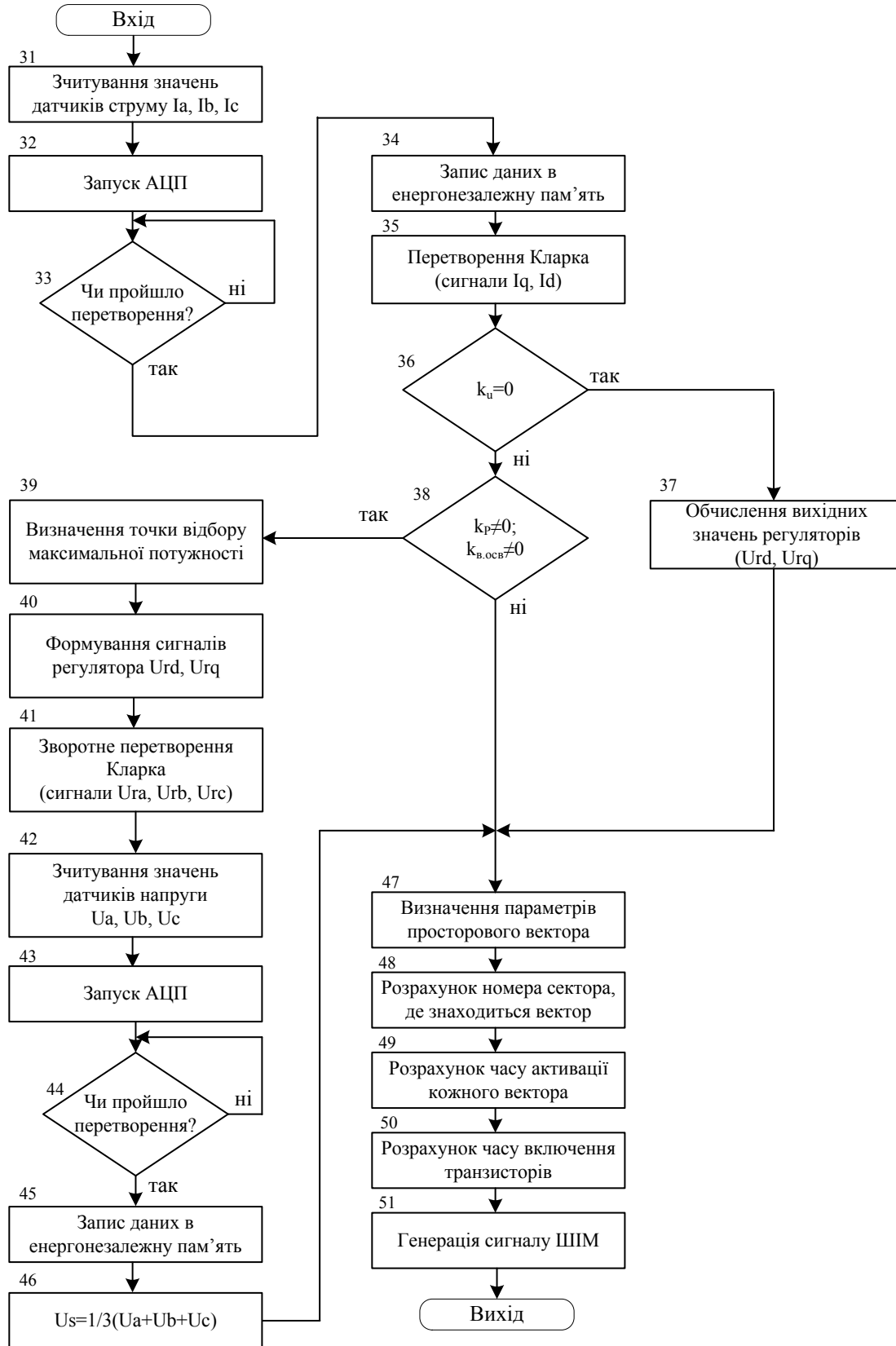


Рис. 4. Алгоритм формування сигналів для системи комутації

$$\begin{cases} I_d = \frac{2}{3} \left(i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\ I_q = \frac{2}{3} \left(i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \end{cases}, \quad (2)$$

де θ – кут електромагнітного навантаження інвертора та обчислюється системою в часовому інтервалі

як різниця частот напруги мережі та інвертора відповідно

$$\theta = \int_0^{\pi} \Delta f dt. \tag{3}$$

Блоки 39-46 описують режим роботи 3 мікропроцесорного пристрою. Зокрема блок 39 працює за алгоритмом показаним на рисунку 3. В блоці 41 відбувається зворотне перетворення Кларка, яке описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} U_{ra} = I_{rd} \cdot \sin \theta + I_{rq} \cdot \cos \theta, \\ U_{rb} = \frac{1}{2} \cdot ((\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) \cdot I_{rq} - (\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) \cdot I_{rd}), \\ U_{rc} = -U_{ra} - U_{rb}. \end{cases} \tag{4}$$

В блоці 46 відбувається визначення середнього значення напруги мережі.

Блоки 47-51 відповідають за векторну широтно-імпульсну модуляцію для керування багаторівневим мережевим інвертором напруги.

Блоки 47-51 можуть реалізовувати стандартну або модифіковану векторну ШПМ [12], параметри якої приведені в таблиці 1. В таблиці приведено параметри запропонованого способу модуляції, який забезпечує синхронізацію вихідної напруги інвертора з мережею, де β_1 – характеризує загальну тривалість ввімкненого стану ключів всередині тактового сигналу τ ; λ – характеризує тривалість пауз нульового рівня всередині тактових інтервалів; γ – сигнали, які формуються по краях або в центрі відповідного β_k сигналу.

Однією з базових особливостей методу синхронної ШПМ є те, що положення центральних активних β_1 -сигналів жорстко фіксується в середині відповідних 120-градусних тактових інтервалів, а формування інших керуючих сигналів і пауз нульового рівня здійснюється симетрично відносно вказаних центральних сигналів. При цьому спеціальні сигнали λ разом із сусідніми сигналами β формуються в тактових точках періоду вихідної напруги інвертора ($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ \dots$) і тривалість цих сигналів зменшується до значення близького до нуля на граничних частотах між піддіапазонами керування, забезпечуючи симетрію кривої вихідної напруги інвертора.

Запропонований метод добре підходить для контролю вихідних напруг інвертора в зоні надмодуляції. Основні кореляції керування в цьому методі включають дві лінійні функції (коефіцієнти) надмодуляції K_{ov1} та K_{ov2} , що забезпечують плавні імпульси процесу спаду в цій зоні. Дані коефіцієнти описуються виразами:

$$K_{ov1} = 1 - \frac{F - F_{ov1}}{F_{ov2} - F_{ov1}}, \tag{5}$$

$$K_{ov2} = 1 - \frac{F - F_{ov2}}{F_m - F_{ov2}}. \tag{6}$$

Таблиця 1

Основні параметри методів ШПМ

Керуючий (модулюючий параметр)	Традиційні схеми векторної ШПМ	Запропонований спосіб модуляції	
Експлуатаційний та максимальні параметри	Експлуатаційна V та максимальна Vm напруги	Експлуатаційна F та максимальна Fm частоти	
Індекс модуляції m	V/Vm	F/Fm	
Тривалість підциклів	T	τ	
Центр k-сигналу	α_k , град.	$\tau(k-1)$, с	
Тривалість включень	$T_{ak} = 1.1 mT(\sin(120^\circ - \alpha_k) + \sin \alpha_k)$ $t_{ak} = 1.1 mT \sin \alpha_k$ $t_{bk} = 1.1 mT \sin(120^\circ - \alpha_k)$	Алгебраїчна ШПМ	Тригонометрична ШПМ
		$\beta_k = \beta_1(1 - A(k-1)\tau FK_{ov1})$ $\gamma_k = \beta_{i-k+1}(0.5 - 6(i-k)\tau F)K_{ov2}$ $\beta_k - \gamma_k$	$\beta_k = \beta_1 \cos((k-1)\tau FK_{ov1})$ $\gamma_k = \beta_{i-k+1}(0.5 - 0.9 \ln(i-k)\tau)K_{ov2}$ $\beta_k - \gamma_k$
Стани відключень (нульова напруга)	$t_{0k} = T - t_{ak} - t_{bk}$	$\lambda_k = \tau - \beta_k$	
Спеціальні параметри, що забезпечують синхронізацію процесу ШПМ		$\beta'' = \beta_1(1 - A(k-1)\tau FK_{ov1})K_s$ $\lambda' = (\tau - \beta'')K_{ov1}K_s$	$\beta'' = \beta_1 \cos((k-1)\tau FK_{ov1})K_s$ $\lambda' = (\tau - \beta'')K_{ov1}K_s$

Висновки

Було розроблено структуру мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області відбору максимальної потужності. Розроблено алгоритм роботи даного пристрою. Запропоновано алгоритм пошуку точки відбору максимальної потужності. Здійснено синтез апаратного та програмного забезпечення необхідного для побудови системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги.

Література

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Rekinger. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018.–European Photovoltaic Industry Association. Brussels,Belgium, 2014–57p.
2. Corzine K. A. Operation and design of multilevel inverters. – University of Missouri: Rolla,2005. – 79
3. Волков А. В., Скалько Ю. С. Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения // А. В. Волков, Ю. С. Скалько -- Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2008 (51). Частина 1. – С. 14-17.
4. Жемеров Г. Г. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, И. Г. Титаренко // Электротехника и Электромеханика. – 2013. – № 2. – С. 40-47.
5. Охоткин Г. П., Серебренников А. Г. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций [Электронный ресурс] // Г. П. Охоткин, А. Г. Серебренников. – Современные проблемы науки и образования– 2012. – №6. –URL: <http://www.science-education.ru/106-7345>.
6. О.И. Григорьев, А.С. Какурин, А.А. Фёдоров. Цифровая система управления автономного инвертора напряжения с широтноимпульсной модуляцией. Труды Псковского политехнического института. 2010, № 13, С. 284 -286.
7. Preeti V. Kapoor, Mamta N. Kokate. Comparison of simulation results three level and five level h-bridge inverter and hardware implementation of single leg h-bridge three level inverter. International journal of innovative research & studies. 2013, Vol.2 Issue 4, p. 388 – 403.
8. Гайтова Т.Б., Кашин Я.М., Белов А.А. Моделирование ступенчато-модулированного инвертора со стабилизацией выходного напряжения при работе от модулей фотоэлектрических элементов. Расчет характеристик и исследование работы. Рецензируемый, реферированный научный журнал «Вестник АГУ». Выход 3 (122) 2013. С. 74-89.
9. С.М. Левицкий, В.С. Бомбик. Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Випуск 1/2016 (33). С. 75-81.
10. Saleh Elkelani Babaa, Matthew Armstrong, Volker Pickert. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems. Journal of Power and Energy Engineering, 2014, 2, p. 59-72
11. Salas, V., Olias, E., Barrado, A. and Lazaro, A. (2006) Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems. Solar Energy Materials and Solar Cells, 90, p. 1555-1578.
12. V. Oleschuk, A. Sizov. Synchronous pwm control of symmetrical dual threephase drive in the overmodulation zone. Problemele energeticii regionale. Electroenergetică 1(21) 2013, p.19-27.

References

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Rekinger. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018.–European Photovoltaic Industry Association. Brussels,Belgium, 2014–57p.
2. Corzine K. A. Operation and design of multilevel inverters. – University of Missouri: Rolla,2005. – 79
3. Volkov A.V., Skalko YU.S. (2008) Vysokovoltnyj asinhronnyj jelektroprivod s trehurovnevym avtonomnym invertorom napryazhenija. - Visnyk KDPU imeni Mikhailo Ostrogradskogo. Vypusk 4/2008 (51). Chastyna 1. - P. 14-17
4. Zhemerov G. G. (2013) “Modelirovanie electroprivoda peremennogo toka s kaskadnym mnogourovnevym invertorom napryazheniya”, Elektrotehnika i elektromekhanika – № 2. – P. 40-47.
5. Ohotkin G. P., Serebrennikov A. G. Osnovnyie printsipy postroeniya avtonomnyih solnechnyih elektrostantsiy [Elektronnyy resurs] // G. P. Ohotkin, A. G. Serebrennikov. – Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya– 2012. – №6. –URL: <http://www.science-education.ru/106-7345>.
6. O.I. Grigorev, A.S. Kakurin, A.A. FYodorov. Tsifrovaya sistema upravleniya avtonomnogo invertora napryazheniya s shirotnoimpulsnoy modulyatsiyey. Trudy Pskovskogo politehnicheskogo instituta. 2010, № 13, 3. 284 -286.
7. Preeti V. Kapoor, Mamta N. Kokate. Comparison of simulation results three level and five level h-bridge inverter and hardware implementation of single leg h-bridge three level inverter. International journal of innovative research & studies. 2013, Vol.2 Issue 4, p. 388 – 403.
8. Gaytova T.B., Kashin Ya.M., Belov A.A. Modelirovanie stupenchato-modulirovannogo invertora so stabilizatsiyey vyihodnogo napryazheniya pri rabote ot moduley fotoelektricheskikh elementov. Raschet karakteristik i issledovanie raboty. Retsenziruemyiy, referiruemyiy nauchnyiy zhurnal «Vestnik AGU». Vyipusk 3 (122) 2013. P. 74-89.
9. S.M. Levitsky, V.S. Bombyk (2016) “Systema keruvannya bagatorivnevym invertorom naprugy” // ISSN 2072–2052. Electromechanichni i energozberigauchi systemy. Vypusk 1/2016 (33) p. 75.
10. Saleh Elkelani Babaa, Matthew Armstrong, Volker Pickert. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems. Journal of Power and Energy Engineering, 2014, 2, p. 59-72
11. Salas, V., Olias, E., Barrado, A. and Lazaro, A. (2006) Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems. Solar Energy Materials and Solar Cells, 90, p. 1555-1578.
12. V. Oleschuk, A. Sizov. Synchronous pwm control of symmetrical dual threephase drive in the overmodulation zone. Problemele energeticii regionale. Electroenergetică 1(21) 2013, p.19-27.

Рецензія/Peer review : 8.11.2016 p.

Надрукована/Printed : 8.11.2016 p.

Стаття рецензована редакційною колегією