УДК 621.314.572(043.3)

**В. С. Бомбик**[1]

# МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМУ НАМАГНІЧУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

[1]Вінницький національний технічний університет

*Розроблено мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області відбору максимальної потужності. В розроблений пристрій закладено математичну модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з урахуванням значення рівня освітленості, температури сонячного модуля та обмеження струму намагнічування трансформатора. Запропоновано алгоритм роботи розробленого мікропроцесорного пристрою.*

**Ключові слова:** мережевий багаторівневий інвертор напруги, мікропроцесорний пристрій, струм намагнічування трансформатора.

## Вступ

Мережеві багаторівневі інвертори напруги широко використовуються в сонячних електростанціях [1, 2]. Це пояснюється тим, що в них малі втрати в силовій частині та покращена електромагнітна сумісність, а також покращена форма вихідної напруги. Результати роботи [3] орієнтовані на застосування системи керування інвертором на сонячній електростанції і загалом узгодженні балансів активної та реактивної потужностей, що актуально для розподільчих електромереж і на практиці майже не використовується для низьковольтних мереж 0,4 кВ, які наближені до споживача. Тому така система потребує адаптації до вимог, актуальніших для споживача, а це зумовлює необхідність підтримання відповідних графіків напруги та частоти. В роботах [4—6] 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, а також параметрів сонячного модуля та мережі.

*Метою роботи* є підвищення надійності функціонування системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля за рахунок розробки мікропроцесорного пристрою, який враховує параметри мережі (струм, напруга), сонячного модуля (струм, напруга, рівень сонячної освітленості, температура), а також обмеження струму намагнічування трансформатора.

## Результати дослідження

Однією з проблем сонячних електростанції є те, що електроенергія, яка виробляється сонячним модулем, має нестабільні показники, оскільки останні залежать від низки факторів, таких як температура навколишнього середовища, рівень освітленості та інші [7], а це, в свою чергу, повинно враховуватись системою керування інвертором для правильного вибору його режиму роботи. На роботу системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги значний вплив має насичення магнітної системи трансформатора, зокрема у разі великих збурень за напругою в мережі (просідання, провали) регулятор поздовжнього струму намагатиметься компенсувати його, збільшуючи уставку інвертора по поздовжній складовій струму, що може стати причиною насичення магнітної системи трансформатора та різкого збільшення намагнічувального струму трансформатора, який до того ж має несинусоїдну форму. В роботі [8] запропоновано математичну модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, яка враховує параметри інвертора, мережі та сонячного модуля, а також обмеження струму намагнічування

© В. С. Бомбик, 2017

трансформатора. Забезпечення режиму утримання сонячного модуля в точці максимальної потужності автоматичних регуляторів напруги та потужності описується системою рівнянь

$$\begin{cases} I_{q.\text{зад}} = k_P \cdot k_{\text{в.осв}} \cdot P_{осв} + k_P \cdot P_{\text{зад}} + k_u \cdot U_{DC} - k_i \cdot I_{DC}; \\ I_{d.\text{зад}} = k_{n.i}\left( U_{\text{зад}} + U_{DC} \cdot k_{DC.\text{під}} - U_s \cdot k_{s.\text{під}} + k_t \left( T / T_{\text{різ}} \right)^2 - U_{Ф} \right); \\ U_{rq} = k_{pq}\left( k_{rq.\text{під}} \left( I_{q.\text{зад}} - I_q \right) + \dfrac{1}{T_{iq}} \int\limits_0^t \left( I_{q.\text{зад}} - I_q \right) dt + T_{dq} \dfrac{d\left( I_{q.\text{зад}} - I_q \right)}{dt} + k_t \dfrac{T}{T_{\text{різ}}} \right); \\ U_{rd} = k_{pd}\left( k_{rd.\text{під}} \left( I_{d.\text{зад}} - I_d \right) + \dfrac{1}{T_{id}} \int\limits_0^t \left( I_{d.\text{зад}} - I_d \right) dt + T_{dd} \dfrac{d\left( I_{d.\text{зад}} - I_d \right)}{dt} \right), \end{cases} \quad (1)$$

де $k_{pd}$ та $k_{pq}$ — коефіцієнти підсилення регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора, відповідно, Ом; $T_{id}$ та $T_{iq}$ — постійні часу інтегрування регуляторів, с; $T_{dd}$ — стала часу диференціювання каналу регулювання $I_d$, с; $U_{rd}$ та $U_{rq}$ — вихідні сигнали регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора, В; $k_P$ — коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення потужності до відповідного значення струму, См; $k_{\text{в.осв}}$ — ваговий коефіцієнт підсилення значення потужності, що надходить на датчик освітлення, в. о.; $P_{\text{зад}}$ — задане значення потужності сонячного модуля, Вт; $k_u$ — коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення напруги в каналі завдання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора, См; $U_{DC}$ — напруга на виході датчика напруги сонячного модуля, В; $k_i$ — коефіцієнт нахилу регулювальної характеристики, в.о.; $I_{DC}$ — значення струму, який надходить на блок обчислення квазіекстремуму з виходу датчика струму, А; $k_{rq.\text{під}}$ — коефіцієнт підсилення П-складової вихідної напруги $U_{rq}$, в.о.; $k_{n.i}$ — коефіцієнт приведення сигналу напруги до струму, См; $U_{\text{зад}}$ — задане значення напруги, яке повинен підтримувати сонячний модуль, В; $U_{DC}$ — значення напруги на виході датчика напруги, В; $k_{DC.\text{під}}$ — коефіцієнт підсилення напруги з виходу датчика напруги, в.о.; $U_s$ — середнє значення напруги мережі, В; $k_{s.\text{під}}$ — коефіцієнт підсилення значення напруги мережі, в.о.; $k_{rd.\text{під}}$ — коефіцієнт підсилення П-складової напруги $U_{rd}$, в.о.; $T$ — значення температури сонячної батареї; $T_{\text{різ}}$ — різниця температур між сонячної батареєю та навколишнім середовищем; $U_{Ф}$ — вихідна напруга датчика магнітного потоку трансформатора, яка обчислюється за формулою

$$U_{Ф} = k_{Ф} \cdot Ф, \quad (2)$$

де $k_{Ф}$ — коефіцієнт приведення магнітного потоку Ф до напруги.

Запропоновано структурну схему мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги (рис. 1), який функціонує згідно з математичною моделлю (1).

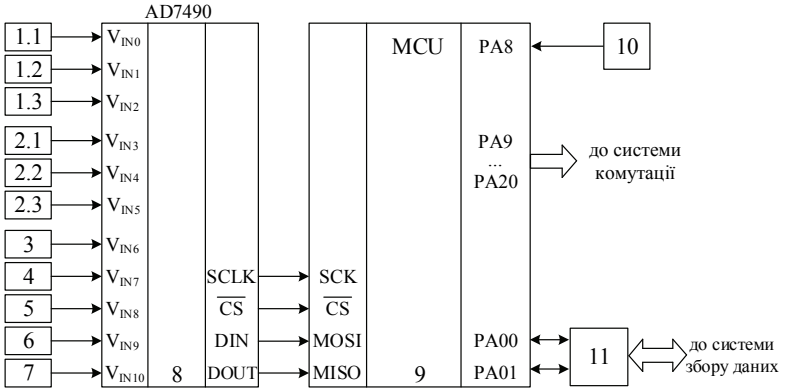


Рис. 1. Структурна схема мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги: 1.1...1.3 — датчики для вимірювання струмів в трифазній мережі; 2.1...2.3 — датчики для вимірювання напруг в трифазній мережі; 3 — датчик рівня освітленості; 4 — датчик струму сонячного модуля; 5 — датчик напруги сонячного модуля; 6 — датчик температури; 7 — датчик магнітного потоку трансформатора; 8 — зовнішній аналого-цифровий перетворювач; 9 — цифровий сигнальний процесор; 10 — блок вибору режиму роботи мікропроцесорного пристрою; 11 — перетворювач сигналу

Для реалізації запропонованої системи керування мережевим багаторівневим інвертором сонячного модуля використаємо, наприклад, 32-розрядний цифровий сигнальний процесор AT32UC3L032, який для розв'язання поставленої задачі має в своєму складі 48 програмованих каналів портів вводу/виводу та іншу периферію. Процесор має оптимізовану структуру команд. Для перетворення вихідних сигналів з усіх датчиків застосовано високошвидкісний аналого-цифровий перетворювач AD7490.

Блок вибору режиму роботи дозволяє вибрати один з п'ятьох можливих режимів роботи мікропроцесорного пристрою, а саме:

1) напряму з мережею;

2) з урахуванням параметрів сонячного модуля (напруги, струму, рівня освітленості, температури);

3) з урахуванням параметрів мережі;

4) з урахуванням параметрів сонячного модуля та мережі.

5) з урахуванням обмеження струму намагнічування трансформатора.

За допомогою перетворювача сигналу відбувається перетворення сигналу для передачі даних з мікропроцесорного пристрою до системи збору даних.

Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою показаний на рис. 2.

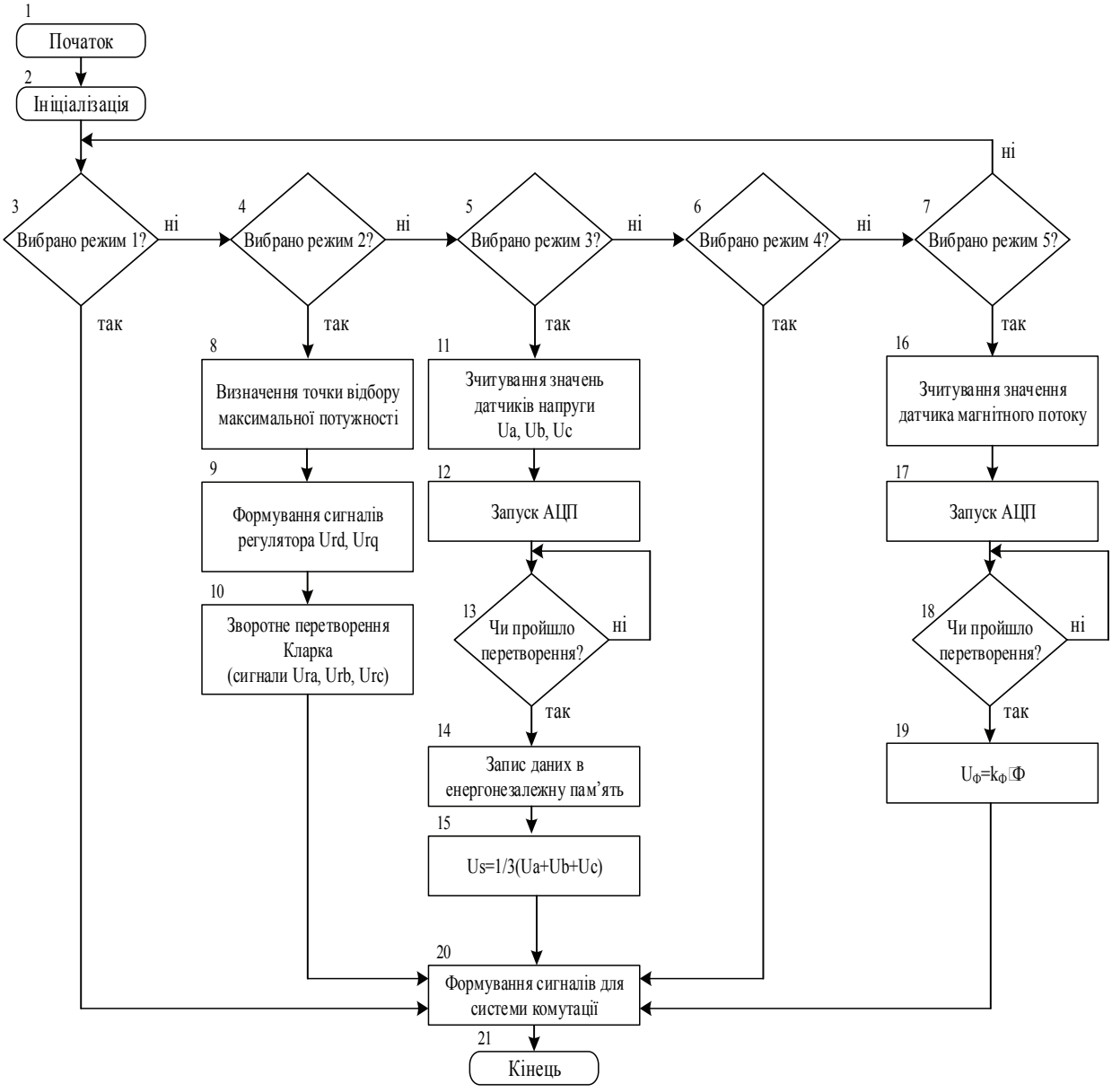


Рис. 2. Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою

Алгоритм роботи пристрою містить такі складові:

– в блоках 3...7 реалізована перевірка, який обрано режим роботи пристрою;

– в блоці 8 реалізований алгоритм визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем, показаний на рис. 3 [9];

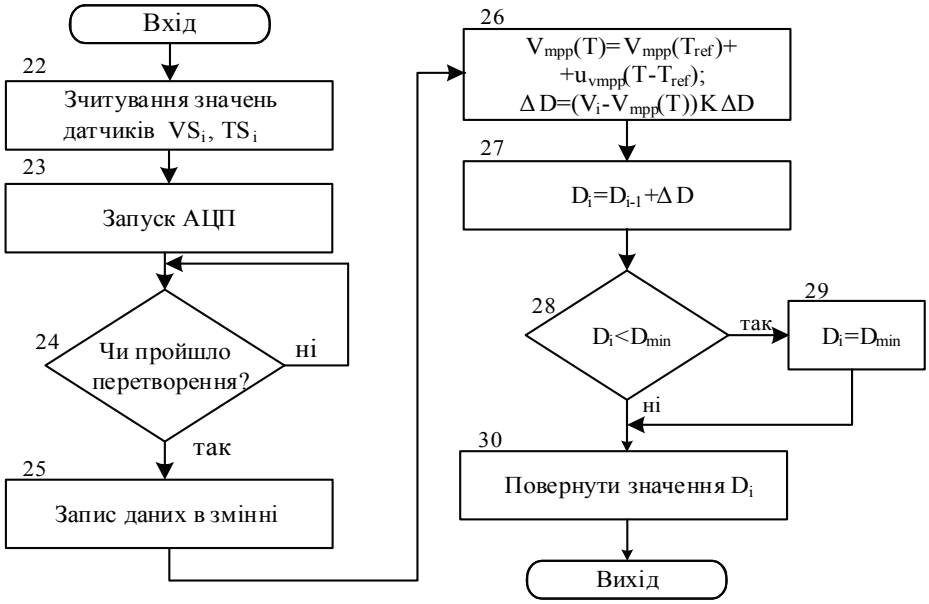


Рис. 3. Температурний алгоритм визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем

– в блоках 9...10 відбувається формування вихідних сигналів регуляторів поперечної та поздовжньої складових струму інвертора та сигналів, які необхідні для проведення векторної ШІМ;

– в блоці 11 відбувається зчитування значень датчиків напруги трифазної мережі;

– в блоках 12...14 відбувається перетворення аналогових сигналів в цифрову форму, здійснюється перевірка чи відбулось перетворення та запис даних в енергонезалежну пам'ять;

– в блоці 15 визначається середнє значення напруги мережі;

– в 16 блоці реалізований алгоритм формування сигналів для системи комутації, який представлений на рис. 4.

В блоках 22...25 відбувається зчитування значень датчиків напруги та температури сонячного модуля, перетворення цих сигналів в цифрову форму та запис даних в відповідні змінні.

В блоках 22...30 реалізований температурний алгоритм для визначення точки максимального відбору потужності сонячним модулем. Аналізуючи вольт-амперну характеристику, можна сказати, що струм короткого замикання пропорційний рівню освітленості і, як правило, стійкий у разі зміни температури комірки сонячного модуля, в той час як напруга сонячного модуля прямо пропорційна температурі. Алгоритм починається з вимірювання напруги та температури сонячного модуля. Значення точки максимальної напруги описується рівнянням

$$U_{mpp}(T)=U_{mpp}\left(T_{ref}\right)+u_{vmpp}\left(T-T_{ref}\right), \tag{3}$$

де $u_{vmpp}$ — температурний коефіцієнт напруги $V_{mpp}$; $T_{ref}$ — різниця температур.

Виходячи з цього, приріст $D$ визначається з різниці між бажаним значенням напруги $U_{mpp}$ та виміряним $U_{vp}$.

Алгоритм, показаний на рис. 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 енергонезалежній пам'яті. В блоці 35 відбувається перетворення Кларка [10], яке описується системою рівнянь

$$\begin{cases} I_d=\dfrac{2}{3}\left(i_a\cdot\cos\theta+i_b\cdot\cos\left(\theta-\dfrac{2\pi}{3}\right)+i_c\cdot\cos\left(\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right)\right); \\ I_q=\dfrac{2}{3}\left(i_a\cdot\sin\theta+i_b\cdot\sin\left(\theta-\dfrac{2\pi}{3}\right)+i_c\cdot\sin\left(\theta+\dfrac{2\pi}{3}\right)\right), \end{cases} \tag{4}$$

де θ — кут електромагнітного навантаження інвертора, що обчислюється системою в часовому інтервалі як різниця частот $\Delta f$ напруги мережі та інвертора за формулою

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

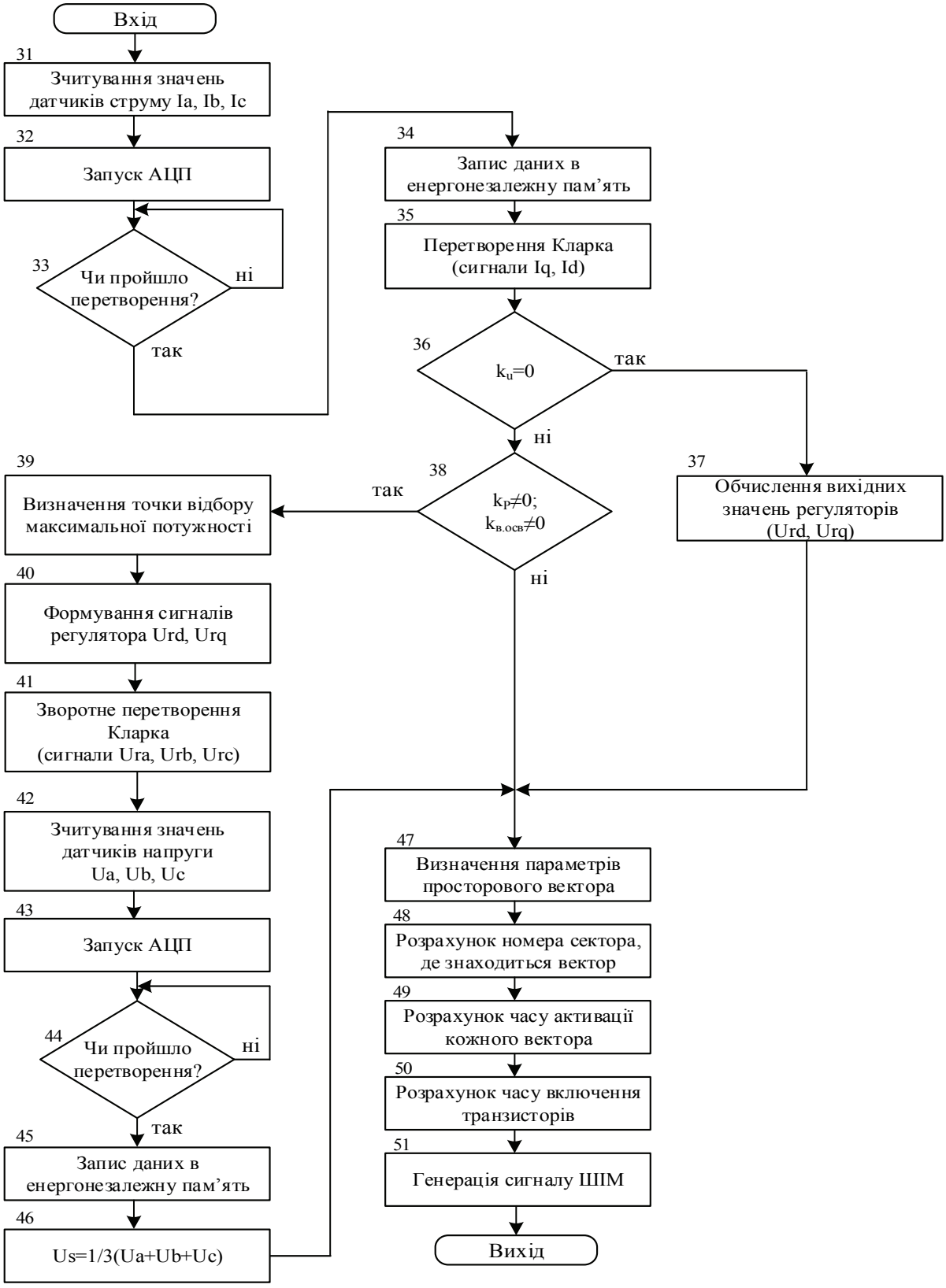


Рис. 4. Алгоритм формування сигналів для системи комутації

В блоках 39...46 описується 3-й режим роботи мікропроцесорного пристрою. Зокрема, блок 39 працює за алгоритмом, показаним на рис. 3. В блоці 41 відбувається зворотне перетворення Кларка [10], яке описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} U_{ra} = I_{rd} \cdot \sin\theta + I_{rq} \cdot \cos\theta; \\ U_{rb} = \frac{1}{2}\left(\left(\sqrt{3} \cdot \sin\theta - \cos\theta\right) I_{rq} - \left(\sin\theta + \sqrt{3} \cdot \cos\theta\right) I_{rd}\right); \\ U_{rc} = -U_{ra} - U_{rb}. \end{cases} \quad (6)$$

В блоці 46 відбувається визначення середнього значення напруги мережі.

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

## Висновки

В роботі розроблено структуру мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області відбору максимальної потужності та враховує параметри сонячного модуля (струм, напругу, рівень освітленості, температуру), мережі та обмеження струму намагнічування трансформатора. Розроблено алгоритм роботи цього пристрою.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Терещенко Т. О. Багаторівневий інвертор напруги з амплітудною широтно-імпульсною модуляцією / Т. О. Терещенко, В. О. Беженар, М. Ю. Білошицький // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 4. — С. 81—83.

2. Photovoltaic Stand-Alone Power Generation System with Multilevel Inverter / Desconzi M. I., Beltrame R. C., Rech C., Schuch L., Hey H. L. // International Conference on Renewable Energies and Power Quality. — 2011. — Vol. 1, No. 9. — Pp. 866—871.

3. Охоткин Г. П. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций [Электронный ресурс] / Г. П. Охоткин, А. Г. Серебреников // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — Режим доступа: http://www.science-education.ru/106-7345 .

4. Григорьев О. И. Цифровая система управления автономного инвертора напряжения с широтноимпульсной модуляцией / О. И. Григорьев, А. С. Какурин, А. А. Фёдоров // Труды Псковского политехнического института. — 2010. — № 13. — С. 284—286.

5. Preeti V. Kapoor. Comparison of simulation results three level and five level h-bridge inverter and hardware implementation of single leg h-bridge three level inverter / Preeti V. Kapoor, Mamta N. Kokate // International journal of innovative research & studies. — 2013. — Vol. 2, Issue 4. — Pp. 388—403.

6. Гайтова Т. Б. Моделирование ступенчато-модулированного инвертора со стабилизацией выходного напряжения при работе от модулей фотоэлектрических элементов / Т. Б. Гайтова, Я. М. Кашин, А. А. Белов // Расчет характеристик и исследование работы. Рецензируемый, реферируемый научный журнал «Вестник АГУ». — 2013. — Вып. 3 (122). — С. 74—89.

7. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method / [Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, Massimo Vitelli] // IEEE transactions on power electronics. — 2005. — Vol. 20, No. 4. — Pp. 963—973.

8. Грабко В. В. Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля / В. В. Грабко, С. М. Левицький, В. С. Бомбик // Екологічна безпека та відновлювальні джерела енергії : Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця. — 2017. — С. 41—45.

9. Saleh Elkelani Babaa. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems / Saleh Elkelani Babaa, Matthew Armstrong, Volker Pickert // Journal of Power and Energy Engineering. — 2014. — No. 2. — Pp. 59—72.

10. Левицький С. М. Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції / С. М. Левицький // Електротехніка і Електромеханіка. — 2015. — № 5. — С. 26—29.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла 12.10.2017

***Бомбик Вадим Сергійович*** — асистент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: bombikvs@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**V. S. Bombyk**[1]

# Microprocessor Device of Control System of Grid Multilevel Voltage Inverter with Limitation Transformers Magnetizing Current

[1]Vinnytsia National Technical University

*There has been developed the microprocessor device of the control system of grid multilevel voltage inverter of solar module that allows holding the solar module operation in terms of selection of the maximum power. In the developed device there has been laid the mathematical model of control system of grid-tied multilevel voltage inverter, which considers level of irradiation, temperature of solar module and limitation transformers magnetizing current. The algorithm of the developed microprocessor device has been proposed.*

**Keywords**: grid-tied multilevel voltage inverter, microprocessor device, transformers magnetizing current.

***Bombyk Vadym S***. — Assistant of the Chair of Electromechanical Systems Automation in Industry and Transport, e-mail: bombikvs@gmail.com

**В. С. Бомбик**[1]

# Микропроцессорное устройство системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения с учетом ограничения тока намагничивания трансформатора

[1]Винницький национальный технический университет

*Разработано микропроцессорное устройство системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения солнечного модуля, позволяющим удерживать режим работы солнечного модуля в области отбора максимальной мощности. В разработанное устройство заложена математическая модель системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения с учетом значения уровня освещенности, температуры солнечного модуля и ограничения тока намагничивания трансформатора. Предложен алгоритм работы разработанного микропроцессорного устройства.*

**Ключевые слова**: сетевой многоуровневый инвертор напряжения, микропроцессорное устройство, ток намагничивания трансформатора.

***Бомбик Вадим Сергеевич*** — ассистент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: bombikvs@gmail.com