

УДК 621.314

# Використання геометричного підходу для аналізу інвертора

Миколаєць Д. А., к.т.н., ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)

Кафедра промислової електроніки

Факультет електроніки

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Київ, Україна

DOI: [10.20535/2523-4445.2019.24.2.169796](https://doi.org/10.20535/2523-4445.2019.24.2.169796)

**Анотація**—Розглянуто використання геометричного підходу для аналізу однофазного інвертору напруги. Проаналізовані вектори вхідних і вихідних величин за напругою на навантаженні та струмом, що споживається з джерела. Запропонований спосіб формування необхідного значення вихідної напруги з забезпеченням постійного струму споживання. Побудована таблиця, в якій наведені сформовані напруги та струми, які відповідають конкретним станам ключів інвертора. Виведені матриці переходу від вхідних величин в двовимірному просторі до вихідних величин в одновимірному просторі.

Бібл. 10, рис. 3, табл. 1.

**Ключові слова** — однофазний інвертор напруги; геометричний підхід

## I. ВСТУП

В системах живлення електродвигунів, відбору енергії від відновлювальних джерел електроенергії та ін. широко використовуються однофазні інвертори, виконані за мостовою схемою [1-6]. В таких системах однією з вимог є забезпечення споживання постійного струму від джерела і таким чином, закони керування повинні поряд з формуванням змінної напруги з відповідними характеристиками, враховувати зміну вхідного струму. В роботі розглядається елементарна комірка інвертору без врахування втрат у колі перетворювача та внутрішнього опору (рис. 1).

Для оцінки можливості формування законів зміни вхідного струму та вихідної напруги і відповідно подальшому виборі законів керування ключами еквівалентної інверторної комірки доцільно використовувати раніше представлений геометричний підхід для аналізу перетворювачів [7-10]. З використанням такого підходу простір вихідних змінних перетворювачів має завжди на один ступінь волі більше, ніж простір вихідних змінних, що в свою чергу збільшить кількість каналів регулювання. При цьому, керування з забезпеченням протікання постійного струму вимагає побудови системи векторів з проекцією вхідних величин на одновимірний простір як для напруг, так і для струмів.

Метою даної статті є аналіз комірки однофазного інвертору для того, щоб показати, що вхідний струм можна сформулювати за законами, що визначають його рівень, а напругу – виходячи з необхідного середнього значення, з врахуванням взаємозв'язку обох величин.

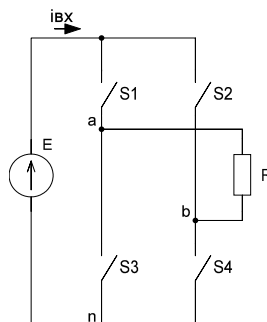


Рис. 1 Принципова схема інвертора напруги

## II. ОПИС ГЕОМЕТРИЧНОГО ПІДХОДУ

На рис. 2 представлені векторні діаграми та часова діаграма, що описують роботу комірки інвертору на рис. 1. За вхідні змінні взяті плечові напруги, що відповідають різниці потенціалів між точками a-n та b-n. Варто зазначити, що в одній стійці вентилів можливе включення лише одного з вентилів, оскільки одночасне ввімкнення обох призведе до наскрізних струмів. Такого режиму уникають, тому він і не розглядається.

Відповідно до вище сказаного, побудована табл. 1, яка описує роботу комірки. Перші два стовпчики відображають стани вентилів в стійці, причому одиниця відповідає замкненому верхньому вентилю в стійці, а нуль – нижньому. Наступні два стовпчики відповідають плечовим напругам комірки, які є вхідними величинами в двовимірному просторі на рис. 2. Ці напруги формують два ортогональні вектори, величина яких може змінюватися від 0 до +E. Таким



чином, два плеча інвертора формують систему з двома ступенями волі, оскільки кожним з них можна керувати незалежно. Стовпчик  $U_{ab}$  покаже напругу на навантаженні при відповідних станах ключів, яка є вихідною величиною в одновимірному просторі на рис. 2, а меандри нижче показують зміну напруги в часовій області. Варто відмітити, що стани з обома закритими і обома відкритими верхніми вентилями в обох стійках будуть давати нульові вектори, оскільки струм у такому випадку з джерела не протікає. Один з них знаходиться на початку векторів  $U_{an}$  та  $U_{bn}$ , інший – формує четвертий кут «квадрату» простору вхідних величин. Вектори на просторі вихідних

величин мають величину  $\frac{1}{\sqrt{2}R}E$  зі змінним знаком, що відповідає діючому значенню при формуванні синусоїдальної напруги навантаження. Стовпчик  $I_{ex}$  аналогічний попередньому і показує вхідний струм комірки, причому на відміну від векторів напруги  $U_{ab}$  вектори струму співпадають, тому доцільно розглядати, як один на обох півперіодах. Таким чином видно, що при переході від простору вхідних до простору вихідних величин втрачається одна ступінь волі.

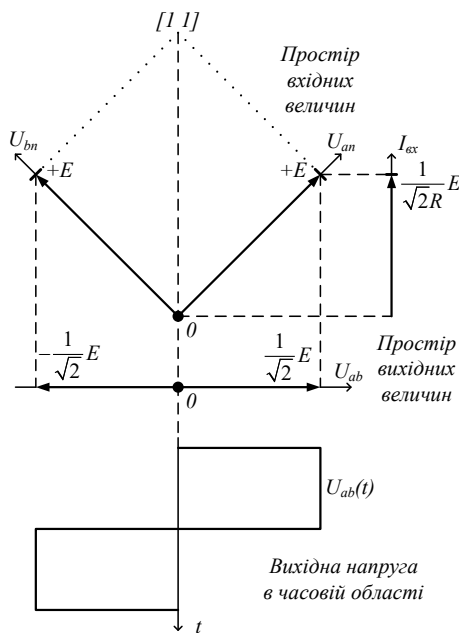


Рис. 2 Проекції вхідних величин на одновимірний простір вихідних величин

ТАБЛИЦЯ 1 СТАНИ ІНВЕРТОРА

S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	U <sub>an</sub>	U <sub>bn</sub>	U <sub>ab</sub>	I <sub>ex</sub>
0	0	0	0	0	0
0	1	0	E	$-\frac{1}{\sqrt{2}}E$	$\frac{1}{\sqrt{2}R}E$
1	0	E	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}E$	$\frac{1}{\sqrt{2}R}E$
1	1	E	E	0	0

З використанням зазначених в табл. 1 станів ключів, показана сформована синусоїдальна напруга навантаження з використанням паузи (рис. 3, а), де пунктиром позначене еквівалентне значення середньої напруги  $u_{сер}(t)$ . Як видно на рисунку, при формуванні вихідної напруги таким способом, споживаний струм матиме форму імпульсів, де пунктиром також показане еквівалентне середнє значення струму  $i_{сер}(t)$ . Такий струм може не задовольняти умовам, які висуваються до інвертору зі сторони джерела. Середні значення напруги навантаження та вхідного струму визначаються наступним чином:

$$U_{сер} = \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2} E, \text{ або } U_{сер} = \gamma E \quad (1)$$

$$I_{сер} = \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \frac{E}{R}, \text{ або } I_{сер} = \gamma \frac{E}{R} \quad (2)$$

де  $\tau_1$  – час паузи,  $\tau_2$  – час імпульсу,  $\gamma$  – значення коефіцієнту заповнення імпульсів за період комутації транзистору.

На рис. 3, б приведений спосіб формування синусоїдальної напруги навантаження, при якому на додатному півперіоді формується інтервал з негативною напругою, а на від'ємному – з позитивною. Таким чином, можливо сформувати необхідне значення середньої напруги, а значить і величини векторів  $U_{ab}$  при забезпеченні постійного струму споживання. Середні значення напруги навантаження та вхідного струму визначаються наступним чином:

$$U_{сер} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 + \tau_2} E \quad (3)$$

$$I_{сер} = \frac{\tau_1' + \tau_2}{\tau_1' + \tau_2} \frac{E}{R} \text{ або } I_{сер} = \frac{E}{R} \quad (4)$$

де  $\tau_1'$  – час зворотної напруги.

При цьому, варто зазначити, що використання джерела за потужністю у другому випадку гірше, оскільки в першому випадку середнє значення за півперіод і вхідної, і вихідної потужностей описуватиметься виразом:  $P = E \cdot I_{ex} \cdot \gamma_{сер}$ . При формуванні напруги методом, як на рис. 3, б, середнє значення споживаної потужності зростає до величини  $P = E \cdot I_{ex}$ , при незмінному значенні потужності навантаження. Варто зауважити, що ці розрахунки вірні при нехтуванні втрат в колі перетворювача.

На основі табл. 1 та рис. 2 побудовані матриці переходу від вхідних до вихідних параметрів для напруги, де плечові напруги формують вихідну напругу  $U_{ab}$ , а «заповнювач»  $U_0$  вказує на втрату одного ступеня волі і може бути розглянутим, як напруга нульової послідовності:

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{або } \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_0 \end{bmatrix} = T_k \times \begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $T_k$  – матриця переходу другого порядку.

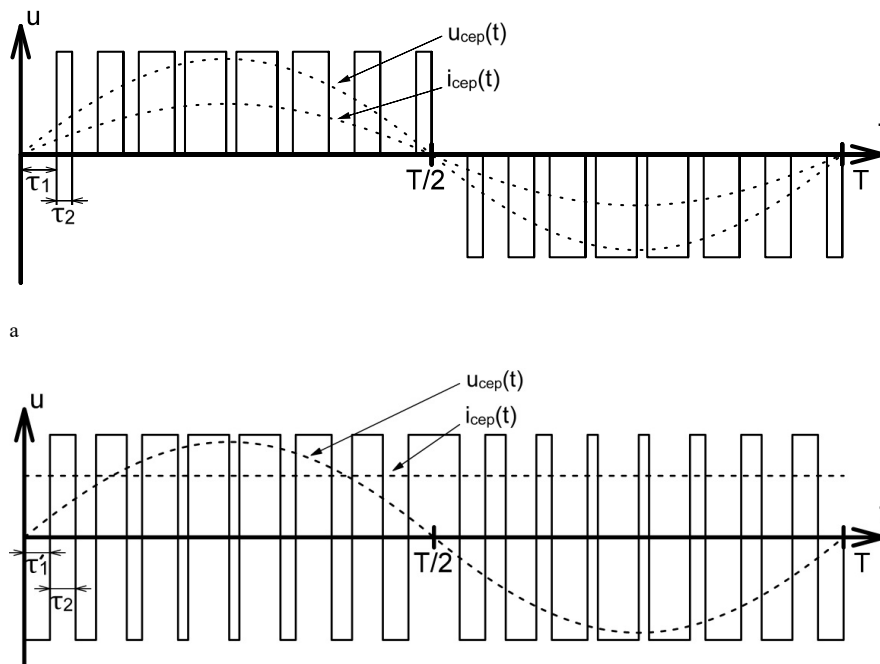


Рис. 3 Формування синусоїдальної напруги за допомогою ШІМ

Як вже описано раніше, вектори струму повторюються, тому варто розглянути, як один:

$$I_{\text{вх}} = \frac{1}{\sqrt{2}R} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Таким чином отримується вектор, що відповідає значенню струму на додатному і від'ємному півперіоді напруги за умови симетричності півхвиль.

#### ВИСНОВКИ

Таким чином за допомогою запропонованого геометричного підходу проаналізовано однофазний інвертор напруги, з використанням якого показано одночасне формування за окремими законами вхідного струму та вихідної напруги. Показано, що при використанні способу забезпечення необхідної напруги з використанням зміни полярності, забезпечується постійний струм споживання, проте знижується використання потужності джерела.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] I. V. Verbytskyi, "A Bipolar Voltage Modulation Spectrum Analysis," *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, no. 23 (1245), pp. 188-193, 2017, DOI: [10.20998/2413-4295.2017.23.30](https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.23.30).
- [2] Vladimir Bezhenar; Dmitry Mykolaets; Vitaly Mykytyuk; Tatiana Tereshchenko, "Multilevel inverter as var-compensator," 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) proceedings, pp. 370-372, 16-19 April 2013, DOI: [10.1109/ELNANO.2013.6552076](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2013.6552076).
- [3] Shavelkin, A.; Shvedchikova, I., «Multifunctional converter for single-phase combined power supply systems for local objects with a photovoltaic solar battery,» *Tekhnichna Elektrodynamika*, № 5, pp. 92-95, 2018, DOI: [10.15407/techned2018.05.092](https://doi.org/10.15407/techned2018.05.092).
- [4] Bozhko, S.; Kryzhanovskiy, T.; Popov, V.; Olefir, O., «Electromagnetic processes in the converter of energy for devices,» *Electronics and Communications*, т. 20, № 3(86), pp. 43-50, 2015, DOI: [10.20535/2312-1807.2015.20.3.53644](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2015.20.3.53644).
- [5] Zagranychnyi, A. V.; Rogal, V. V., «Methods of forming voltage probing for devices nuclear magnetic,» *Electronics and Communications*, т. 18, № 5(76), pp. 19-24, 2013, DOI: [10.20535/2312-1807.2013.18.5.142741](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2013.18.5.142741).
- [6] Artemenko, M. E.; Zhuykov, V. Ya.; Yakimenko, Yu. I., *Matrichno-topologicheskii sintez ventilynih preobrazovateley*, Kyiv: Politehnika, 2001, pp. 229, - ISBN 966-622-062-8 : 12 p.
- [7] Peterheria, Yu. S.; Soboliev, O. V., "Postroenie invariantnogo upravleniya sistemoy matrichniy preobrazovatel – asinhronniy dvigatel na osnove geometricheskogo podhoda," *Elektronika i svyaz*, vol. 10, pp. 140-143, 2001.
- [8] M. J. Ryan, R. D. Lorenz and R. W. De Doncker, "Modeling of sinewave inverters: a geometric approach," *IEEE Transactions on industrial electronics*, no. 46, pp. 1187-1198, December 1999, DOI: [10.1109/41.808008](https://doi.org/10.1109/41.808008).
- [9] Zhuykov, V. Ya.; Mykolaiets, D. A., "The use of a geometric approach for three-phase active power line conditioner," *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 5, pp. 35-38, September/October, 2018. DOI: [10.15407/techned2018.05.035](https://doi.org/10.15407/techned2018.05.035)
- [10] Peterheria, Yu. S.; Soboliev, O. V., «Primenenie geometricheskogo podhoda k analizu protsessov v matrichniy preobrazovatelyah,» *Tekhnichna Elektrodynamika*, № 5, pp. 33-36, 2001, URL: [http://www.techned.org.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=977&Itemid=77](http://www.techned.org.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=977&Itemid=77).

Надійшла до редакції 07 лютого 2019 р.



УДК 621.314

# Использование геометрического подхода для анализа инвертора

Миколаец Д. А., к.т.н., ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)

Кафедра промышленной электроники

Факультет электроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Киев, Украина

**Реферат**—Рассмотрено использование геометрического подхода для анализа однофазного инвертора напряжения. Проанализированы векторы входных и выходных величин по напряжению на нагрузке и по току, потребляемому из источника. Предложен способ формирования требуемого значения выходного напряжения с обеспечением постоянного тока потребления. Построена таблица, в которой приведены сформированные напряжения и токи, соответствующие конкретным состояниям ключей инвертора. Выведены матрицы перехода от входных величин в двумерном пространстве до выходных величин в одномерном пространстве.

Библ. 10, рис. 3, табл. 1.

**Ключевые слова** — однофазный инвертор напряжения; геометрический подход.

UDC 621.314

# The Use of a Geometric Approach for the Analysis of a Single-Phase Inverter

D. A. Mykolaiets, PhD, ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)

Department of Industrial Electronics

Faculty of Electronics

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"

Kyiv, Ukraine

**Abstract**—In this paper the elementary cell of the inverter is considered without taking into account losses in the converter circle and internal resistance. The use of a geometric approach for the analysis of a single-phase inverter voltage is considered. The vectors of input and output voltages on the load and current consumed from the source are analyzed. It can be seen that during the transition from the space of inputs to the space of output quantities one degree of freedom is lost. Using the cell states indicated in the table, the formation of a sinusoidal load voltage with the use of a pause is shown. In forming the output voltage in this way, the current consumed will be in the form of pulses and such a current may not satisfy the conditions that are pushed to the inverter from the source side. The given method of forming a sinusoidal load voltage, in which on the positive half-period is formed an interval with a negative voltage, and on the negative one - with a positive one. The expressions for calculating the average values of the load voltage and the supply current during the switching period of the transistor are given. Proposed the method of forming the necessary value of the output voltage with the provision of constant consumed current. In this case, the control with ensuring the flow of direct current requires the construction of a system of vectors with the projection of input values on the plane of the output quantities for both the voltage and the currents. It is shown that using the method of providing the necessary voltage using the change in polarity provides a constant current consumption, however, the use of power source is reduced. Vector diagrams are presented, and a timeline describing the work of the inverter cell. Constructed a table in which are formed the voltages and currents that correspond to the particular condition keys of the inverter. The matrices of the transition from the input values in a two-dimensional space to the initial quantities in a one-dimensional space are constructed. It is shown that, unlike voltage vectors, current vectors coincide, so it is expedient to consider them as one on both half-cycles. Thus the vector is obtained that corresponds to the value of the current in the positive and negative half-cycle of the voltage, provided that the half-waves of the voltage is symmetric. Using the data obtained in the article, based on the analysis of the scheme with the help of a geometric approach, it is possible to develop the rules of control of the cell of the inverter.

Ref. 10, fig. 3, tabl. 1.

**Keywords** - single-phase voltage inverter; geometric approach.

