УДК 621.314.632 **DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324270**

М. Островерхов[1], д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-7322-8052
О. Халімовський[1], канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-3672-8530
Б. Приймак[1], канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-7680-8565
В. Коротенко[1], магістрант, ORCID 0009-0006-5149-4946
[1]Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ ТА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ІНВЕРТОРА ПРИ ФОРМУВАННІ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Підвищення ефективності систем візуалізації для виконання завдань в умовах сучасних бойових дій є можливим при адекватній ситуаційній обізнаності завдяки використанню технологій автоматичного виявлення загроз. Важливим аспектом розробки таких систем візуалізації є дослідження впливу частоти ШІМ інвертора на якість формування його вихідної напруги. Внаслідок комутаційних процесів силових елементів інвертора виникають спотворення заданого гармонічного сигналу. Крім того, як відомо, цей процес, також, супроводжується тепловими втратами. Тому дослідження ступеню впливу спотворень гармонічного сигналу та теплових втрат на енергоефективність функціонування електротехнологічного комплексу візуалізації в залежності від частоти ШІМ є актуальними. Для кількісної оцінки ступеню впливу цих факторів проведено дослідження функціонування розробленої конструкції двошарової друкованої плати. Вибір і розташування елементів плати виконувався відповідно до технічних вимог з урахуванням умови щодо забезпечення у компактній конструкції таких пристроїв мінімізації електромагнітних перешкод. Розробка плати та дослідження її функціонування проводились з використанням програмного середовища Proteus. При розробці друкованої плати передбачено схемне рішення щодо згладжування можливої появи високочастотних коливань і короткочасних піків струму при підключенні силової частини інвертора до блоку живлення постійного струму. Для генерації сигналів керування драйверами затворів IR2104 силових MOSFET-транзисторів інвертора обрано мікроконтролер ATmega128-16AU. Результати досліджень свідчать про те, що при збільшенні частоти ШІМ інвертора відбувається зменшення гармонічних спотворень. Вигляд цієї залежності має гіперболічний характер. У той же час підвищення частоти ШІМ призводить до збільшення теплових втрат.

Ключові слова: *система візуалізації, комутація, інвертор, частота, широтно-імпульсна модуляція, система керування положенням, енергоефективність.*

Актуальність. Як відомо, при формуванні вихідної напруги інвертора виникають спотворення заданого гармонічного сигналу. Крім того, процес комутації силових елементів супроводжується утворенням теплових втрат. Обидва ці фактори необхідно враховувати при виборі “компромісного“ діапазону частоти ШІМ інвертора. Тому дослідження характеру гармонічних спотворень та теплових втрат на енергоефективність роботи інвертора в залежності від частоти ШІМ є актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних дослідженнях, присвячених широтно-імпульсній модуляції (ШІМ) для керування перетворювачами напруги, значна увага приділяється вибору ефективної частоти модуляції. Основними елементами аналізу є гармонічні спотворення, енергетичні втрати у силових ключах та електромагнітна сумісність (ЕМС) системи. Зокрема, у роботі [1] розглядаються вплив частоти ШІМ на якість вихідної напруги та рівень гармонічних спотворень. Дослідження показують, що збільшення частоти модуляції зменшує рівень нижчих гармонік, проте може призводити до зростання втрат у силових елементах перетворювача через часті перемикання. У роботі [2] проведено аналіз впливу гармонічних спотворень на функціонування електричних машин, що отримують живлення від інверторних перетворювачів. Дослідження вказують на необхідність балансу між частотою ШІМ інвертора та якістю сформованої напруги, оскільки надмірне зростання частоти може спричинити збільшення паразитних струмів у двигуні та перегрів обмоток. Таким чином, аналіз останніх досліджень вказує на необхідність комплексної оцінки щодо вибору ефективного діапазону частот ШІМ перетворювачів.

Мета дослідження. Показники вихідної напруги інверторів визначають енергоефективність їх застосування для живлення електродвигунів. В свою чергу цей показник залежить від частоти ШІМ інвертора. Метою досліджень є визначення “компромісного” діапазону частот ШІМ інвертора при формуванні його вихідної напруги. Для досягнення мети досліджень необхідно розробити апаратну частину інвертора та провести дослідження залежності впливу спотворень заданого гармонічного сигналу та очікуваних теплових втрат від частоти ШІМ щодо оцінки енергоефективності його використання.

Матеріали та методи дослідження. Матеріалом для виконання досліджень є створена віртуальна модель інвертора у програмному середовищі Proteus. Елементами моделі є розроблені електричні схеми. Дослідження функціонування віртуальної моделі інвертора виконувалось методом математичного моделювання. Для кількісної оцінки отриманих результатів використовувались методи аналітичного розрахунку.

Результати досліджень та їх обговорення. При проєктуванні перетворювального пристрою в системі керування положенням для живлення безколекторного двигуна постійного струму (БДПС) потужності 5 Вт враховувались критично важливі вимоги щодо застосування системи у специфічних умовах. Крім вимог щодо енергоефективності необхідно, також, врахувати вимоги щодо забезпечення у конструкції таких пристроїв мінімізації електромагнітних перешкод. З урахуванням цих вимог було розроблено друковану плату, що містить мікроконтролер ATmega128-16AU та драйвери IR2104. Загальний вигляд друкованої плати зображено на рис. 1.

Рисунок 1 - *Загальний вигляд друкованої плати*

Розробка плати відбувалось у три етапи. На першому етапі створюється схема синусоїдального генератора, який генерує 3-фазні сигнали з частотою, що відповідає частоті живлення двигуна.

На рис. 2 зображено електричну схему одної з фаз генератора. Електричні схеми інших двох фаз мають аналогічний вигляд.

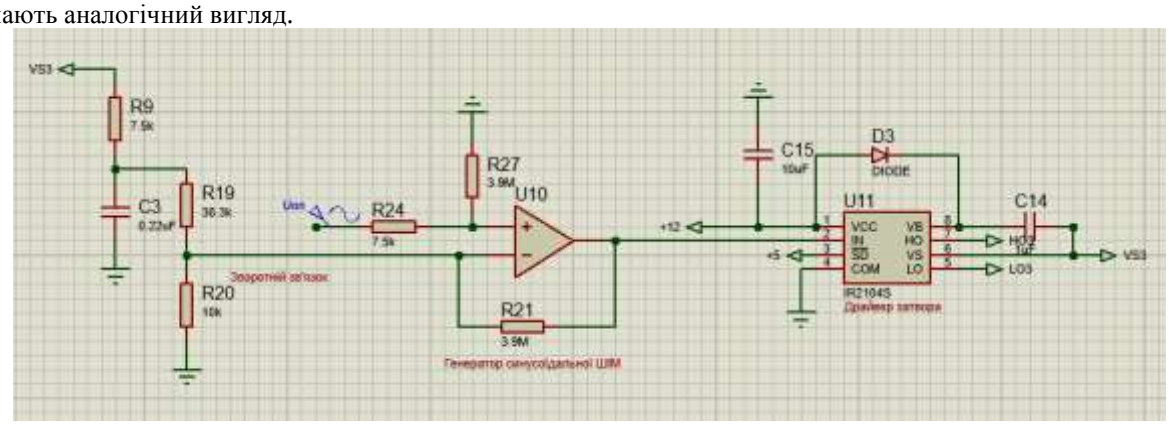

Рисунок 2 - *Електрична схему одної з фаз генератора*

Фазові сигнали мають зсув 120°, що є необхідною умовою для забезпечення симетричної трифазної системи живлення [4]. Побудова схеми трифазного інвертора виконувалась на другому етапі розробки.

Схема трифазного інвертора з шістьма MOSFET-транзисторами, що комутуються відповідно до сигналів ШІМ зображено на (рис. 3).

Використання драйверів *IR2104* дозволяє керувати як верхніми, так і нижніми транзисторами кожного плеча. Драйвери, також, формують необхідну напругу для забезпечення коректної роботи MOSFET-транзисторів [5].

Розробка генератора ШІМ-сигналів здійснювалась на третьому етапі. Сигнали широтно-імпульсної модуляції формуються на основі опорних синусоїдальних сигналів кожної фази $U_{оп}$. Підвищення частоти перемикання груп транзисторів дозволяє зменшити гармонічні спотворення вихідного сигналу [6]. Функціональна схема трифазного генератора ШІМ представлена на рис. 4.

Блок транзисторів Q1–Q6 формує напругу живлення на навантаженні у відповідності до сигналу завдання частоти. Опорні синусоїдальні сигнали ($U_{оп1}$, $U_{оп2}$, $U_{оп3}$) з виходу цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) з урахуванням сигналів зворотних зв'язків (ЗЗ) подаються на вхід блоку регуляторів і далі, драйвери блоку комутації забезпечують керування станом транзисторів. Використання П-регуляторів дозволяє практично без запізнення передавати сигнал керування до драйверів блоку комутації [7]. Мікроконтролер (МК) відповідно до сигналу завдання частоти через шину даних формує вхідний сигнал ЦАП.

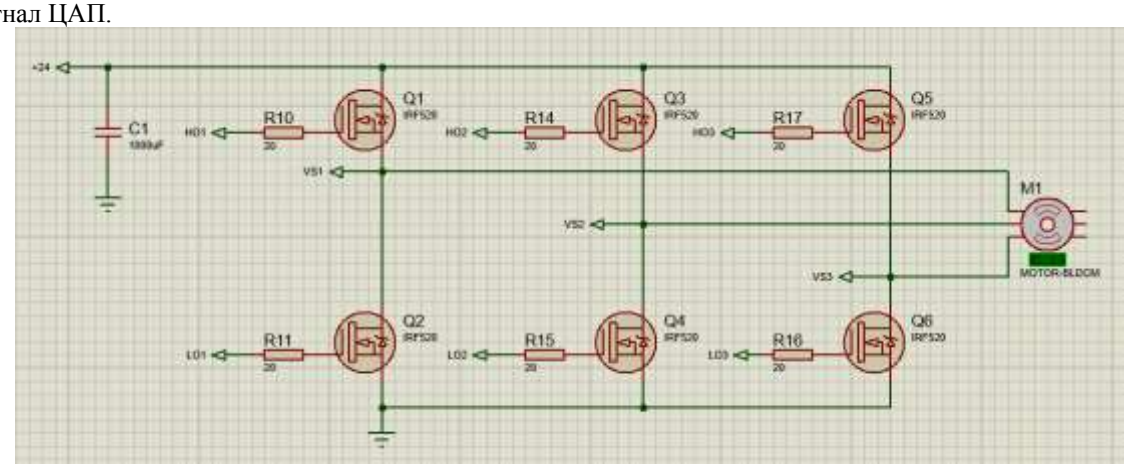

Рисунок 3 - *Схема трифазного інвертора з шістьма MOSFET-транзисторами*

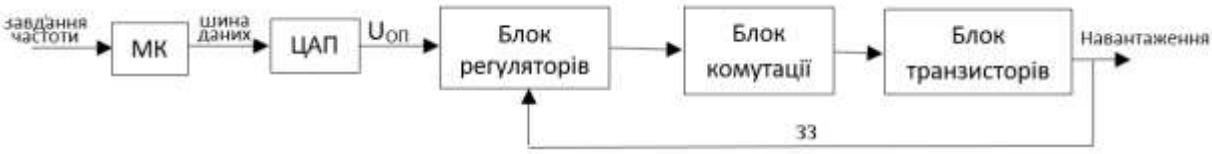

Рисунок 4 - *Функціональна схема трифазного генератора ШІМ*

Дослідження характеристик спроєктованого пристрою з використанням програмного середовища *Proteus*. дозволяє оцінити ступінь спотворення синусоїдального сигналу вихідних напруг для умов реальної його експлуатації. Характер залежності спотворень гармонічного сигналу вихідної напруги перетворювача в залежності від несучої частоти ШІМ зображено на рис. 5. Аналіз характеристики (рис. 5) свідчить про те, що із збільшенням частоти ШІМ зменшується коефіцієнт пульсації синусоїди вихідного сигналу напруги, тобто підвищується енергоефективність всього електротехнологічного комплексу.

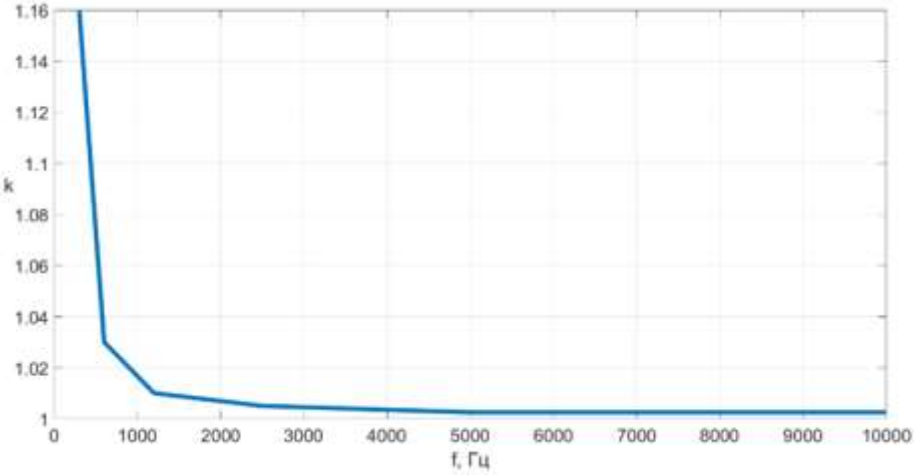

Рисунок 5 - *Графік залежності коефіцієнта пульсації синусоїди від частоти ШІМ*

При остаточному виборі частоти ШІМ необхідно приймати компромісне рішення враховуючи той факт, що рівень втрат у силових елементах перетворювача збільшується з підвищенням частоти [8]. Знаходження оптимального співвідношення між частотою ШІМ за показником спотворення гармонічного сигналу напруги на виході і рівнем втрат є доволі складною задачею для вирішення якої необхідно

проводити велику кількість досліджень [9]. Розрахункове значення величини втрат у силових елементах в залежності від частоти ШІМ визначалась за виразом:

$$P_з = I_{DS}^2 * R_{DS(on)} * D + \left(\frac{t_{on} + t_{off}}{2}\right) * U_{DS} * I_{DS} * f_s$$

де t_{on}, t_{off} – час включення і відключення транзистора;

I_{DS} – максимальний струм, що протікає через перехід стік-витік у режимі насичення, А;

U_{DS} – напруга стік-витік, В;

D – коефіцієнт заповнення ШІМ;

f_s – частота перемикання транзистора, Гц.

Час включення t_{on} транзистора:

$$t_{on} = \frac{U_{DS} * C_{RSS} * (R_{OR} + R_G)}{U_{GSF} - U_{GP}} + (R_{OR} + R_G) * C_{ISS} * \ln\left(\frac{U_{GSF} - U_{GS(TH)}}{U_{GSF} - U_{GP}}\right).$$

де C_{RSS} – зворотна перехідна ємність транзистора, Ф;

R_{OR} – опір на включення транзистора, Ом;

R_G – внутрішній опір затвора транзистора, Ом;

U_{GSF} – напруга затвор-витік, В;

U_{GP} – напруга при якій настає ефект Міллера, В;

C_{ISS} – вхідна ємність транзистора, Ф;

$U_{GS(TH)}$ – порогова напруга затвор-витік, В;

Час виключення t_{off} транзистора:

$$t_{off} = (R_{OF} + R_G) * \left(\frac{C_{RSS} * U_{DS}}{U_{GP}} + \frac{C_{ISS} * U_{GP}}{U_{GS(TH)}}\right)$$

де R_{OF} – опір на виключення транзистора, Ом;

C_{RSS} – зворотна перехідна ємність транзистора, Ф.

На рис. 6 зображено залежність втрат у силових транзисторах від частоти ШІМ. Ця залежність має практично лінійний характер.

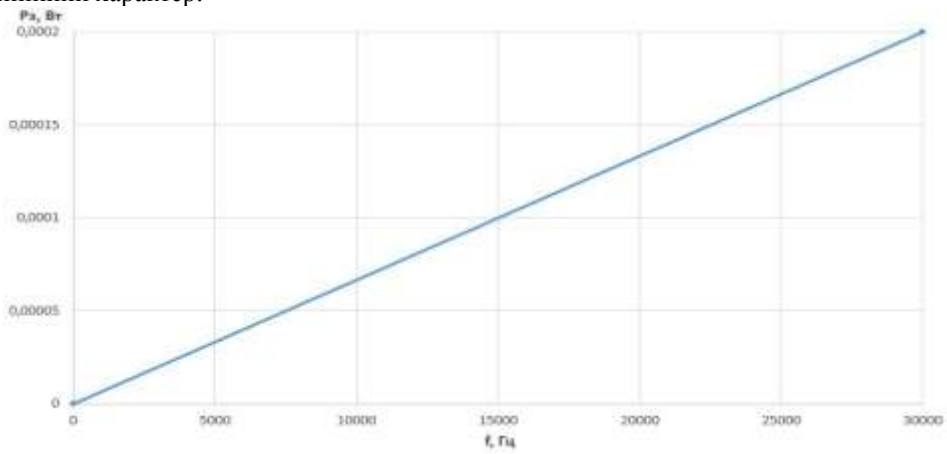

Рисунок 6 - *Графік залежності потужності, що виділяється на транзисторі від частоти перемикання транзистора*

У разі застосування джерела постійного струму для живлення схеми у силових ланцюгах з MOSFET-транзисторами можуть виникати високочастотні коливання і короткочасні піки струму. У схемній реалізації для їх згладжування передбачено конденсатор C1 (рис. 3) з ємністю, яка є достатньою для мінімізації перепадів напруги та забезпечення стабільного живлення силових компонентів [10]. Застосування електролітичного конденсатора передбачає реалізацію системи плавного заряду при підключенні його до джерела живлення задля компенсації стрибка струму. Використання такої системи дозволяє продовжити термін експлуатації конденсатора [11]. Схему системи плавного заряду конденсатора C1 в середовищі Proteus зображено на рис. 7.

Результат моделювання процесу заряду конденсатора представлено на рис. 8.

За результатами моделювання тривалість аперіодичного характеру зарядження конденсатора до величини напруги $0.95U_{ном}$ з дозарядженням до значення $U_{ном}$ (час повного зарядного стану) становить приблизно 600 мс. Такий час заряду конденсатора дозволяє забезпечити необхідну стартову готовність для функціонування інвертора та підвищити загальну надійність системи.

Висновки і перспективи.

За допомогою використання програмного середовища *Proteus* виконано розведення двошарової друкованої плати з урахуванням вимог щодо мінімізації електромагнітних завад та забезпечення належного охолодження силових компонентів.

Спроєктовано та обрано апаратну частину системи керування БДПС.

За результатами досліджень віртуальної моделі трифазного інвертора визначено, що використання драйверів *IR2104* для керування MOSFET-транзисторами забезпечує ефективну комутацію і стабільність форми його вихідної напруги.

Встановлено, що з підвищенням частоти перемикання транзисторів зменшуються гармонічні спотворення та одночасно збільшуються комутаційні втрати.

Рекомендовано для остаточного вибору робочого діапазону частот ШІМ інвертора враховувати не тільки ступінь спотворень заданого гармонічного сигналу, але й комутаційні втрати в його силових ключах.

Подальша розробка вузла відеоспостереження передбачає використання спроєктованого інвертора для живлення БДПС при дослідження функціонування системи автоматичного керування положенням.

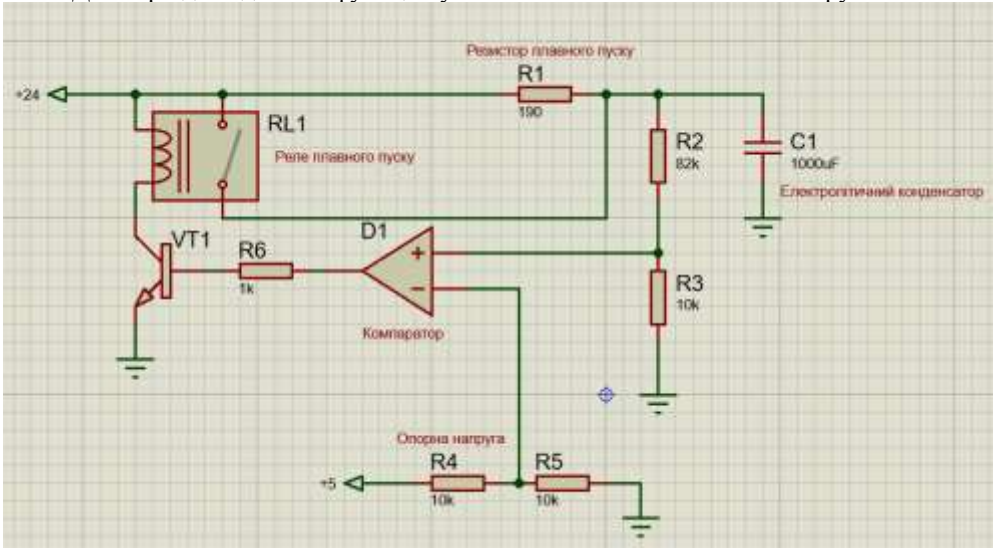

Рисунок 7 - *Схема плавного заряду конденсатора C1 в середовищі Proteus*

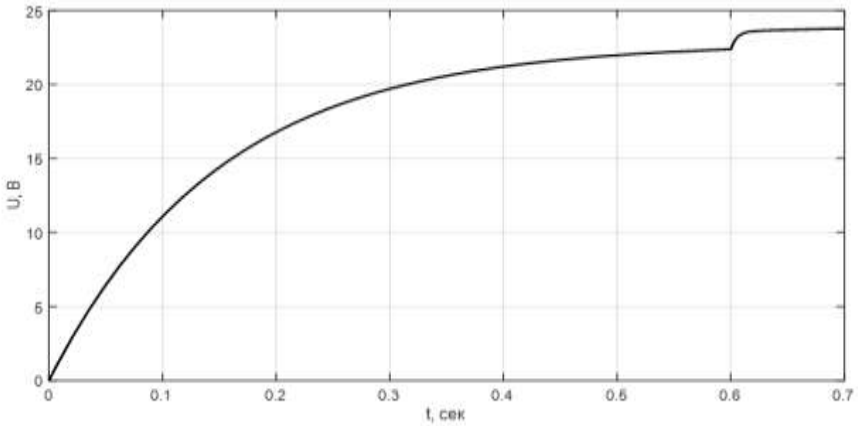

Рисунок 8 - *Напруга на конденсаторі*

Список використаної літератури

1. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley, 2002.

2. Rashid, M. H. "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications." Pearson, 2013.

3. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. "Control in Power Electronics: Selected Problems." Academic Press, 2002.

4. T.J.E. Miller, “ Brushless Permanent-Magnet and Reluctant Motor Drives,” Oxford, 1989.

5. International Rectifier Application Note AN-978. IR2104: Half-Bridge Driver IC

6. Design of FOC Brushless DC (BLDC) Motor Controller – Rohita Lokhande, Prof. Priyanka Dukre.

7. Speed Control Of Bldc Motor Using Sensorless Field Oriented Control By Svpwm Technique – Madhu A Karadi, Dr Balaji N.

8. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note - Prepared by Jian Zhao/Yangwei Yu July 2011.

9. Erickson, R. W., Maksimovic, D. Fundamentals of Power Electronics. – 2nd ed. – Boston: Springer, 2001.

10. Deboy, G., Treu, M. Switching Loss Analysis of Power MOSFETs: A New Insight // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015.

11. L. Umanand Power Electronics: Essentials & Applications Paperback – January 1, 2009

M. Ostroverkhov[1], Dr. Sc. (Eng.), Prof.,ORCID 0000-0002-7322-8052
O. Khalimovskyy[1], Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-3672-8530
B. Pryymak[1], Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-7680-8565
V. Korotenko[1], master student, ORCID 0009-0006-5149-4946
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

RESEARCH OF THE CHARACTER OF HARMONIC DISTORTIONS AND HEAT LOSSES OF THE INVERTER DURING OUTPUT VOLTAGE FORMATION

Increasing the effectiveness of visualization systems for performing tasks in modern combat operations is possible with adequate situational awareness through the use of automatic threat detection technologies. An important aspect of the development of such visualization systems is the study of the influence of the inverter's PWM frequency on the quality of its output voltage formation. As a result of the switching processes of the inverter's power elements, distortions of the given harmonic signal occur. In addition, as is known, this process is also accompanied by heat losses. Therefore, the study of the degree of influence of harmonic signal distortions and heat losses on the energy efficiency of the visualization electrotechnological complex depending on the PWM frequency is relevant. To quantitatively assess the degree of influence of these factors, a study of the functioning of the developed design of a two-layer printed circuit board was conducted. The selection and arrangement of the board elements were carried out in accordance with the technical requirements for the implementation of the inverter, taking into account the condition for ensuring the minimization of electromagnetic interference in the compact design of such devices. The development of the board and the study of its functioning were carried out using the Proteus software environment. When developing the printed circuit board, a circuit solution was provided to smooth out the possible occurrence of high-frequency oscillations and short-term current peaks when connecting the power part of the inverter to a DC power supply. The ATmega128-16AU microcontroller was selected to generate control signals for the IR2104 gate drivers of the inverter's power MOSFET transistors. The results of the research indicate that with an increase in the inverter's PWM frequency, harmonic distortion decreases. The shape of this dependence is hyperbolic. At the same time, an increase in the PWM frequency leads to an increase of heat losses.

Keywords: *visualization system, switching, inverter, frequency, pulse-width modulation, position control system, energy efficiency.*

References

1. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley, 2002.

2. Rashid, M. H. "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications." Pearson, 2013.

3. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. "Control in Power Electronics: Selected Problems." Academic Press, 2002.

4. T.J.E. Miller, " Brushless Permanent-Magnet and Reluctant Motor Drives," Oxford, 1989.

5. International Rectifier Application Note AN-978. IR2104: Half-Bridge Driver IC

6. Design of FOC Brushless DC (BLDC) Motor Controller – Rohita Lokhande, Prof. Priyanka Dukre.

7. Speed Control Of Bldc Motor Using Sensorless Field Oriented Control By Svpwm Technique – Madhu A Karadi, Dr Balaji N.

8. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note - Prepared by Jian Zhao/Yangwei Yu July 2011.

9. Erickson, R. W., Maksimovic, D. Fundamentals of Power Electronics. – 2nd ed. – Boston: Springer, 2001.

10. Deboy, G., Treu, M. Switching Loss Analysis of Power MOSFETs: A New Insight // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015.

11. L. Umanand Power Electronics: Essentials & Applications Paperback – January 1, 2009

Надійшла: 20.02.2025
Received: 20.02.2025