

ВИЗНАЧЕННЯ ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ ШІМ З МІНІМАЛЬНИМ РІВНЕМ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ PROTEUS

Коротенко В.В., студент, Халімовський О.М., к.т.н., доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Технологічний розвиток сучасної електроніки постійно стимулює інтерес до вдосконалення інверторних систем, які є ключовими компонентами для забезпечення живлення різних електродвигунів та інших споживачів енергії в промислових і побутових умовах. Трифазні інвертори забезпечують ефективне перетворення постійного струму в змінний, що дозволяє використовувати їх у системах електроприводу [1]. У сучасній електротехніці важливим аспектом є дослідження впливу параметрів інверторів на якість вихідних напруг та струмів, що подаються на трифазні двигуни. При роботі інвертора сигнал вихідної напруги має гармонічні спотворення, що знижує ефективність роботи вузла технологічного комплексу [2]. Тому задача визначення меж діапазону частот формування напруги інвертора з мінімальними спотвореннями є актуальною [3].

Постановка задачі дослідження. Метою дослідження є визначення діапазону частот ШІМ в межах якого формується вихідна напруга з мінімальним рівнем гармонічних спотворень.

Для досягнення цієї мети слід реалізувати в середовищі *Proteus* генератор синусоїдального сигналу, який забезпечуватиме трифазну систему напруг із фазовим зсувом у 120° . Генеровані сигнали будуть використані як опорні для формування керуючих сигналів ШІМ, що забезпечують комутацію ключів MOSFET. Крім того, інверторна схема має бути оснащена драйверами *IR2104*, які забезпечуватимуть стабільне керування комутацією транзисторів за допомогою ШІМ-сигналів [4].

Для оцінки ступеню гармонічних спотворень і характеру вихідної форми сигналу необхідно провести дослідження фазних напруг після фільтрації та порівняння їх з опорними значеннями. Використання в алгоритмах керування такої оцінки дозволить зменшити вплив вищих гармонік і оптимізувати роботу інвертора.

Коефіцієнт спотворення синусоїди визначається за формулою:

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n U_n}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%$$

де: U_n – номінальне значення n -ої гармоніки, В;

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга мережі, В.

На рис. 1 зображено структурну схему системи керування трифазним інвертором. Складовими схеми є: мікроконтролер (МК); цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП); П-регулятори та драйвери; блок транзисторів V1-V6 для формування напруги живлення на навантаженні.

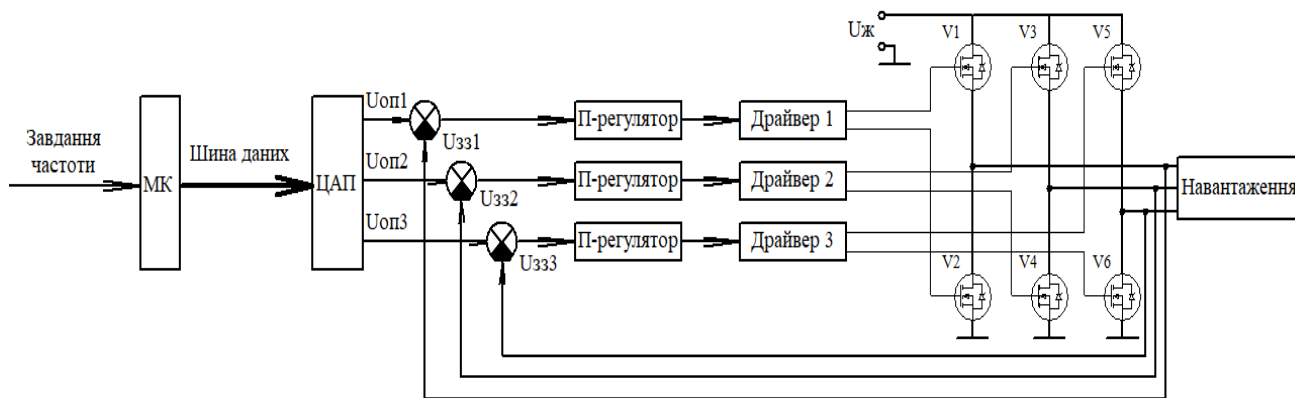


Рисунок 1 – Функціональна схема трифазного інвертора

Мікроконтролер генерує сигнал завдання частоти. ЦАП формує синусоїдальний сигнал для кожної фази ($U_{оп1}$, $U_{оп2}$, $U_{оп3}$). Наявність зворотних зв'язків дозволяє отримати сигнал помилки відпрацювання сигналу завдання.

Драйвери комутують MOSFET-транзистори та забезпечують високочастотне перемикання для формування трифазної напруги на навантаженні.

Методи досягнення мети дослідження. Використання програмного середовища *Proteus* надає можливість моделювання не тільки статичних, але й динамічних процесів, що дозволяє оцінити поведінку схеми у реальних умовах експлуатації. Зокрема, можна створювати та досліджувати синусоїдальні сигнали, імпульсні та широтно-імпульсні модульовані (ШІМ) сигнали, а також проводити тестування драйверів для MOSFET транзисторів, які є основою для комутації в інверторних системах [5].

Моделювання трифазного інвертора в середовищі *Proteus* передбачає кілька етапів. На першому етапі створюється схема синусоїдального генератора (рис. 2), який генерує 3-фазні сигнали з частотою, що відповідає частоті живлення двигуна. Сигнали мають фазовий зсув 120° , що є необхідною умовою для забезпечення симетричної трифазної системи живлення.

Другий етап включає побудову схеми трифазного інвертора з шістьма MOSFET-транзисторами (рис. 2), які комутуються відповідно до сигналів ШІМ. Використання драйверів *IR2104* дозволяє керувати як верхніми, так і нижніми транзисторами кожного плеча, забезпечуючи стабільне і ефективне комутаційне керування. Драйвери також забезпечують ізоляцію і необхідну напругу для коректної роботи MOSFET-транзисторів [6].

На третьому етапі здійснюється розробка генератора ШІМ-сигналів, який формує сигнали широтно-імпульсної модуляції на основі опорних синусоїдальних сигналів. ШІМ забезпечує поступове наближення вихідного сигналу до ідеальної синусоїди за допомогою високочастотного перемикання, що дозволяє зменшити гармонічні спотворення вихідного сигналу.

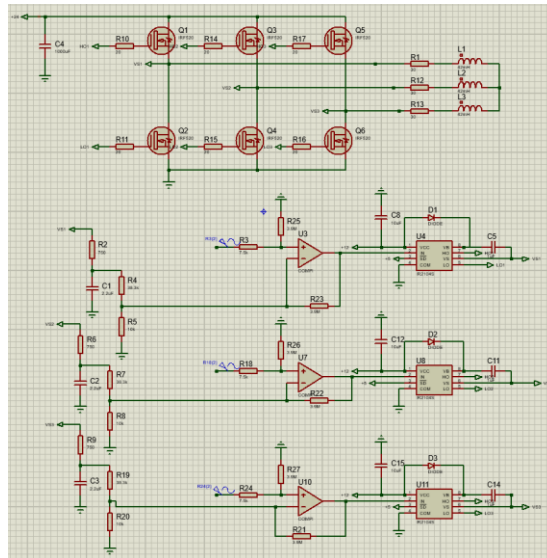
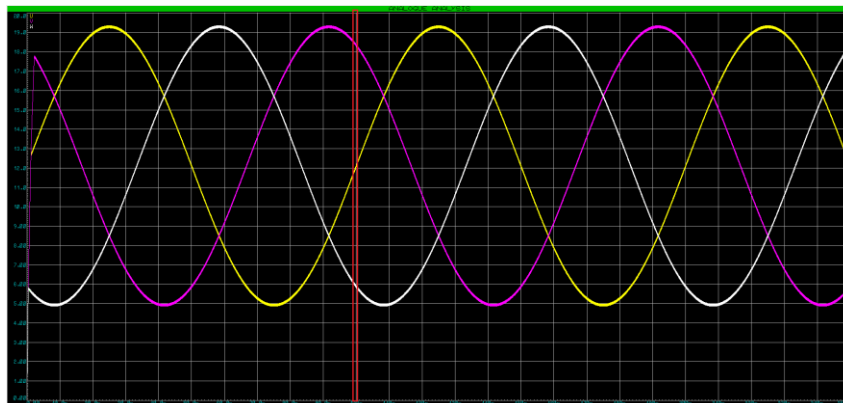
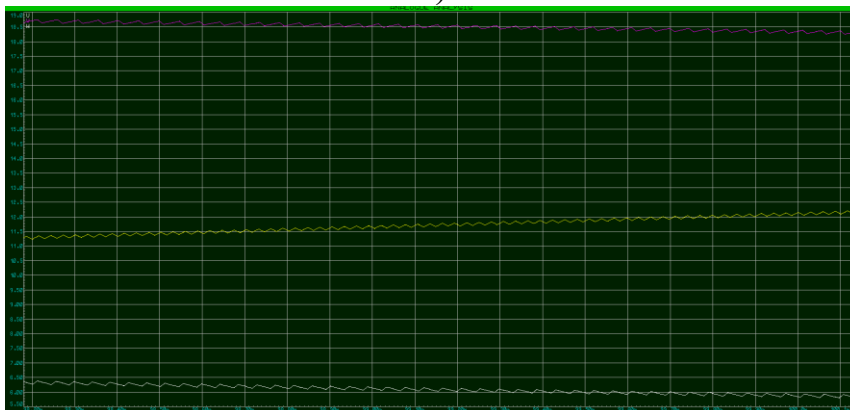


Рисунок 2 – Схема трифазного інвертора в середовищі *Proteus*

Результати дослідження. На рисунку 3 а) зображено вихідні напруги 3-и фазного інвертора з ШІМ модуляцією.



а)



б)

Рисунок 3 – Фазні напруги після фільтра: а) нормальна розгортка; б) широка розгортка (у межах червоного прямокутника).

При формуванні вихідної напруги інвертора утворюються гармонічні спотворення сигналу, які виникають внаслідок процесів комутації силових

елементів. Мінімізація цих спотворень. сприяє зменшенню електромагнітних завад [7].

На рисунку 3 б) наведено реальний вихідний сигнал інвертора, який складається з окремих ступінчастих змін, зумовлених процесом широтно-імпульсної модуляції. Чим вища частота ШІМ, тим більша кількість комутацій на один період синусоїди і більш гладка форма вихідної напруги. Збільшення частоти ШІМ знижує гармонічні спотворення і, також, підвищує тепловиділення в транзисторах.

На рис. 4 представлено при частоті ШІМ 30 кГц напруги: одної з фаз; сигналу завдання та сигналу зворотного зв'язку.

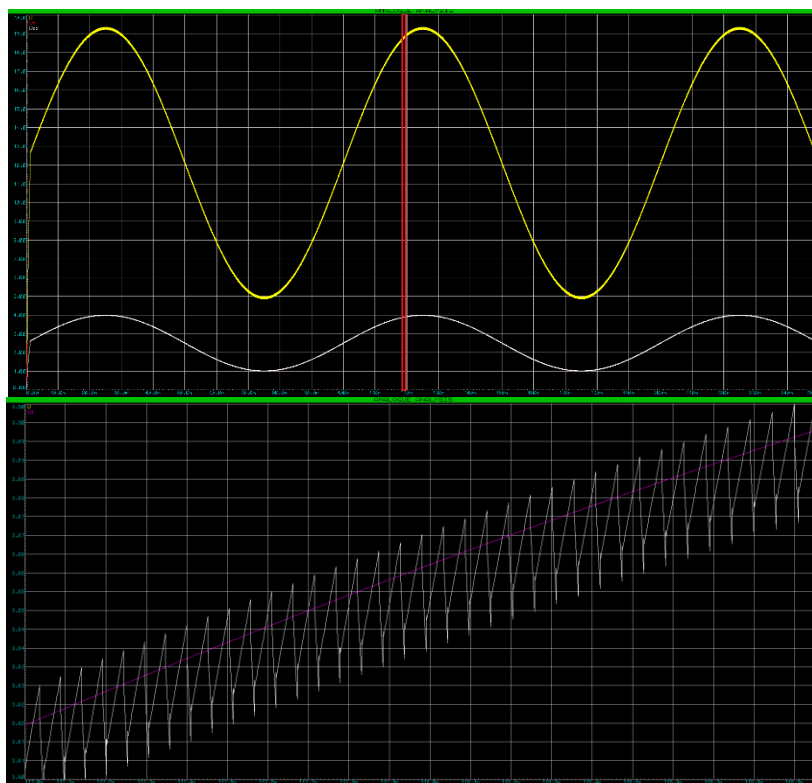


Рисунок 4 – Напруги при частоті ШІМ 30 кГц: фази інвертора – жовтий; завдання – фіолетовий; зворотного зв'язку – білий.

Така висока частота комутації дозволяє зменшити гармонічні викривлення та покращити якість вихідної напруги. Використання частоти понад 30 кГц супроводжується значними втратами в активній зоні силових транзисторів і, як наслідок, відбувається їх перегрів. В цьому випадку для забезпечення їх нормального режиму роботи потрібні додаткові заходи щодо охолодження та зменшення теплових навантажень.

Залежність загальних теплових втрат на транзисторі P_z від частоти ШІМ представлено на рис. 5.

При зниженні частоти ШІМ до 1,5 кГц вихідна напруга інвертора набуває більш ступінчастої форми, що свідчить про зменшення якості відтворення сигналу. Тобто, через зниження швидкості перемикання силових транзисторів з'являються значні гармонічні складові у вихідному сигналі. Одночасно, зі зниженням частоти ШІМ відбувається і зменшення втрат у транзисторах.

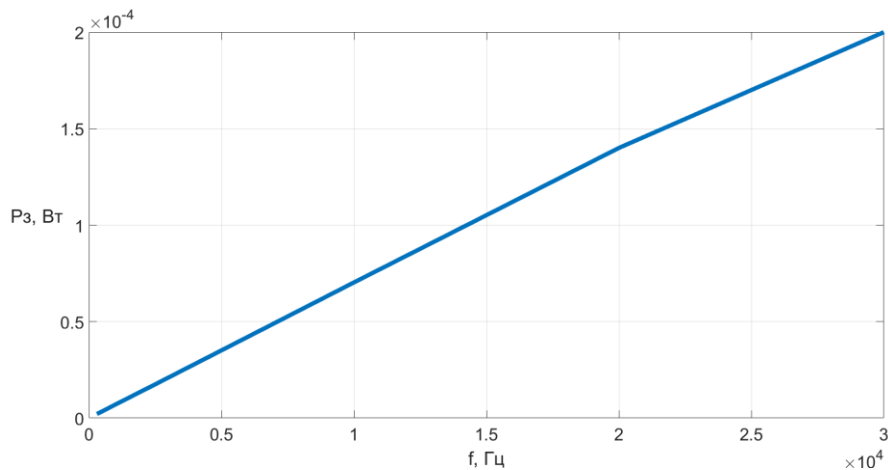


Рисунок 5 – Графік залежності потужності, що виділяється на транзисторі від частоти перемикання транзистора

При частоті ШІМ 10 кГц вихідна напруга інвертора набуває більш гладкої форми порівняно з частотою 1,5 кГц, але не досягає рівня гладкості, як у випадку для частоти 30 кГц. Така частота ШІМ є компромісом між зменшенням втрат у силових компонентах та забезпеченням достатньо високої якості вихідного сигналу. При цьому зменшуються гармонічні викривлення, але втрати в активних елементах залишаються на контрольованому рівні

Графік залежності коефіцієнта пульсації k синусоїди від частоти ШІМ представлено на рис 6. Для побудови залежності коефіцієнта пульсації k від частоти ШІМ його значення розраховувалось за виразом

$$k = \frac{U_{зз}}{U_{завд}}$$

де: $U_{зз}$ – діюче значення напруги зворотного зв'язку, В;
 $U_{завд}$ – діюче значення напруги заданої синусоїди, В.

Аналіз результатів проведених досліджень свідчить про те, що підвищення частоти ШІМ дозволяє досягти: більш якісного вихідного сигналу за рахунок збільшення частоти комутації; зниження гармонічних викривлень (рис. 6).

Однак підвищення частоти ШІМ супроводжується збільшенням втрат у силових елементах, що вимагає врахування розбіжності між якістю вихідного сигналу та тепловими характеристиками силових елементів комутації при проектуванні і розробці інвертора.

Зниження частоти ШІМ забезпечує менші втрати і стабільність у роботі транзисторів, але знижує якість відтворення сигналу, що може негативно вплинути на роботу систем чутливих до гармонічних спотворень.

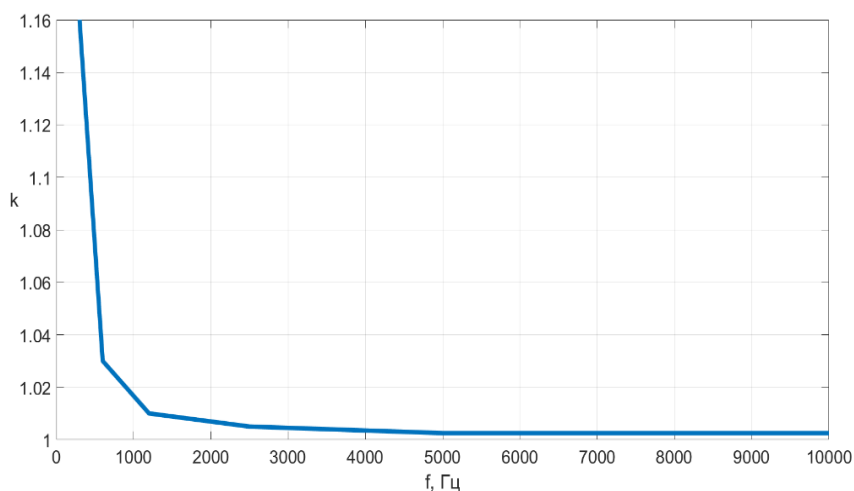


Рисунок 6 – Графік залежності коефіцієнта пульсації синусоїди від частоти ШІМ

Висновки. Підтверджено доцільність використання зворотного зв'язку за напругою в трифазних інверторах для підвищення точності і стабільності вихідних сигналів.

При моделюванні трифазного інвертора у спеціалізованому програмному середовищі *Proteus* визначено межі формування діапазону частот ШІМ, що забезпечують мінімальні спотворення у сигналі вихідної напруги інвертора.

Результати досліджень трифазного інвертора показали, що використання драйверів *IR2104* для керування MOSFET-транзисторами забезпечує ефективну комутацію і стабільність вихідної форми напруги.

Рекомендації щодо використання результатів дослідження. До початку технічної реалізації процес оптимізації вибору елементів (параметрів) електричної схеми можливо забезпечити моделюванням у спеціалізованому програмному середовищі *Proteus*.

Результати досліджень можуть бути використані для розробки промислових інверторних систем із зворотним зв'язком за напругою, призначених для живлення трифазних двигунів у промислових і побутових умовах.

Перелік посилань

1. Rashid, M. H. Power Electronics: Circuits, Devices & Applications. Pearson, 2013.
2. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley, 2002.
3. Luo, F. L., & Ye, H. Advanced DC/AC Inverters: Applications in Renewable Energy.
4. Proteus Design Suite Documentation. Labcenter Electronics Ltd.
5. Beig, A. R., Muniraj, N., & Singh, B. "Investigation on Three-Phase Inverter for AC Drives with Voltage Feedback Control.
6. International Rectifier Application Note AN-978. IR2104: Half-Bridge Driver IC.
7. Сенько, В. І. Інвертори і перетворювачі частоти [Електронний ресурс] : монографія /Сенько В. І., Трубіцин К. В., Чибеліс В. І. ; Видавництво Ліра-К. 2020. Режим доступу <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/51279>.