

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-61-65>

УДК 621.314.5

## УТОЧНЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЧАСТОТИ КОМУТАЦІЇ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ З ФІЛЬТРОМ

Стрункін Г.М.

## REFINEMENT OF THE OPTIMAL SWITCHING FREQUENCY OF A VOLTAGE-SOURCE INVERTER WITH A FILTER

Strunkin H.M.

*У статті зазначено про необхідність підвищення частоти комутації автономних інверторів напруги для мінімізації його сукупної маси разом з низькочастотним вихідним фільтром. Зменшення маси пасивних компонентів фільтра зі зростанням частоти комутації інвертора супроводжується зростанням потужності втрат у його транзисторах. Два взаємопротилежні напрями формують мінімум цільової функції залежності маси системи автономний інвертор напруги – фільтр від частоти комутації. Розглянуто попередні роботи по знаходженню маси системи інвертор – фільтр при використанні тиристорів, кремнієвих транзисторів, транзисторів на основі карбіду кремнію та нітриду галію, фільтрів з осердям з електротехнічної сталі, аморфного заліза, пермалою та фериту. Обґрунтовано узагальнити попередні дослідження, розділивши частотний діапазон на п'ять областей відповідно до використаних матеріалів осердя. Для побудови цільової функції залежності маси елементів системи автономний інвертор напруги – фільтр використано метод вагових коефіцієнтів, які являють собою питомі масові показники, відповідно для охолоджувачів транзисторів, дроселя та конденсатора фільтра. Наведено схему однофазного автономного інвертора напруги з низькочастотним фільтром. Описана цільова функція залежності маси елементів системи інвертор напруги – фільтр від частоти комутації. Використанням вагових коефіцієнтів для дроселів з різним матеріалом осердя вдається здійснити глобальну оптимізацію. Підтверджено раніше отримані показники оптимальної частоти для кремнієвих транзисторів та дроселя з осердям із електротехнічної сталі. Показано, що заміна матеріалу осердя не дозволяє суттєво зменшити масу системи інвертор-фільтр. Використовуючи транзистори на базі карбіду*

*кремнію та осердя дроселя з аморфного заліза вдається покращити масогабаритні показники інвертора з фільтром в три рази. Використання більш високочастотних матеріалів – пермалою, порошкового заліза та феритів у осерді дроселя не дає переваги за масою, як і використання більш швидких транзисторів на базі нітриду галію. Для більшої частини промислових інверторів оптимальна частота складає 3,2 кГц.*

**Ключові слова:** автономний інвертор напруги, низькочастотний фільтр, частота комутації, цільова функція, вагові коефіцієнти, маса.

**Вступ.** Проектування сучасних перетворювачів енергії для аерокосмічної галузі, електротранспорту та систем відновлюваної енергетики вимагає максимізації показника питомої потужності. Ключовим параметром оптимізації є частота комутації, яка визначає фундаментальний компроміс: підвищення частоти дозволяє зменшити масу пасивних компонентів фільтра (дроселя та конденсатора), але призводить до зростання динамічних втрат у напівпровідниках та магнітних осердях [1].

Скільки існує теорія автономних інверторів напруги (АІН), стільки часу і розвиваються підходи до їх оптимізації за різними показниками, насамперед масогабаритними [2]. Якщо перші дослідження орієнтувалися головним чином на використання тиристорних інверторів та дроселів із залізним осердям [3], то, з розвитком елементної бази, було розглянуто інвертори на IGBT [4], транзистори з карбіду кремнію [5], нітриду галію [6], ферити

[7], пермалой [8] тощо. За останні роки масогабаритні показники покращилися й у конденсаторів за рахунок використання нової плівкової технології [9]. На цей час для побудови дроселя фільтру використовуються щонайменше 5 матеріалів: електротехнічна сталь, аморфне залізо, пермалой, порошкове залізо та ферити [10]. Практичне використання цих матеріалів призвело до рекомендацій щодо раціональних частот обирання між ними [10]. У зв'язку з чим назріла необхідність провести глобальну оптимізацію з розділенням по регіонам використання матеріалів осердя дроселя та для транзисторів різних типів.

Через неможливість виконання глобальної оцінки маси дроселя від частоти у статті [4] було запропоновано методика вагових коефіцієнтів. На жаль, досить перспективна методика на той час була використана лише для осердь із електротехнічної сталі, що дозволило адекватно оцінити графік цільової функції лише до частот 5-7 кГц. При більших частотах цільова функція мала досить велику похибку, через те, що втрати в осерді ставали вирішувальними. Побудова ж цільової функції маси системи АІН-фільтр з розвитком її по регіонах використання магнітних матеріалів в літературі не оглянута.

**Метою роботи** є побудова системної моделі пошуку глобального мінімуму маси автономного інвертора напруги з фільтром з урахуванням п'яти технологічних зон магнітних матеріалів дроселя для транзисторів на базі кремнієвої технології, карбіду кремнію та нітриду галію.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На рис. 1 представлена схема однофазного дворівневого АІН з вихідним фільтром. Як показано в [4], маса та об'єм елементів перетворювача пропорційні їх установленій потужності. При цьому перехід від встановленої потужності до масогабаритних показників здійснюється за допомогою вагових коефіцієнтів. Відомо також, що маса і габарити реактивних елементів (ємності та індуктивності фільтра) зменшуються зі зростанням робочої частоти, чим і пояснюється тенденція до підвищення частоти комутації в АІН. З іншого боку, при зростанні частоти комутації, збільшується потужність динамічних втрат у напівпровідникових приладах, що в свою чергу призводить до збільшення потужності, що віддається охолоджувачем в навколишній простір і спричиняє збільшення маси та габаритів охолоджувача. Таким чином, функція

сумарної встановленої потужності від частоти повинна спостерігатися мінімум при певній частоті..

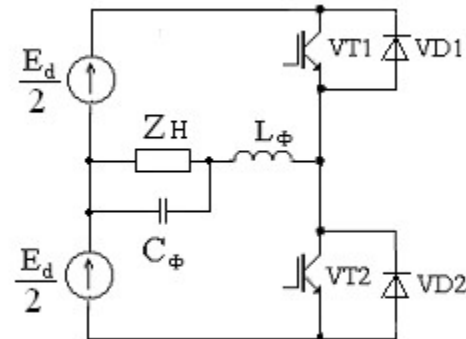


Рис. 1. Схема однофазного АІН

Для оптимізації частоти комутації інвертора напруги з фільтром скористаємося отриманими [4] співвідношеннями для функції залежності маси системи інвертор-фільтр від кутової частоти  $M(\omega)$ :

$$M(\omega) = 314 \cdot \left( \frac{K_L^M \rho I_{ef}^2}{2} + \frac{K_C^M U_{ef}^2}{\rho} \right) \cdot \frac{1}{0,1\omega} + K_O^M \left( \frac{W}{2\pi} \cdot \omega + P_{cm} \right), \quad (1)$$

де  $I_{ef}$  - ефективне значення струму навантаження;  $U_{ef}$  - діюче значення напруги на конденсаторі,  $\rho$  - хвильовий опір фільтра,  $W$  - повна енергія втрат на комутацію напівпровідникового приладу, яка може бути взята з довідкових даних фірм-виробників або розрахована по [11],  $P_{cm}$  - потужність статичних втрат у транзисторах інвертора [12],  $K_L^M$ ,  $K_C^M$ ,  $K_O^M$  - відповідно, питомі маси індуктивності, ємності та охолоджувача [4] (вагові коефіцієнти).

Якщо використати вагові коефіцієнти для дроселей з сучасних магнітних матеріалів [10], то можна побудувати графік цільової функції (1), який зображено на рис. 2. Для зручності виконано заміну вісі з кутової частоти на звичайну  $f$ .

Перехід між матеріалами осердя наступний згідно з рекомендаціями [10]: до 5 кГц використано електротехнічну сталь, до 15кГц – аморфне залізо, до 30 кГц – пермалой, до 70 кГц – порошкове залізо і понад 70 кГц – ферити.

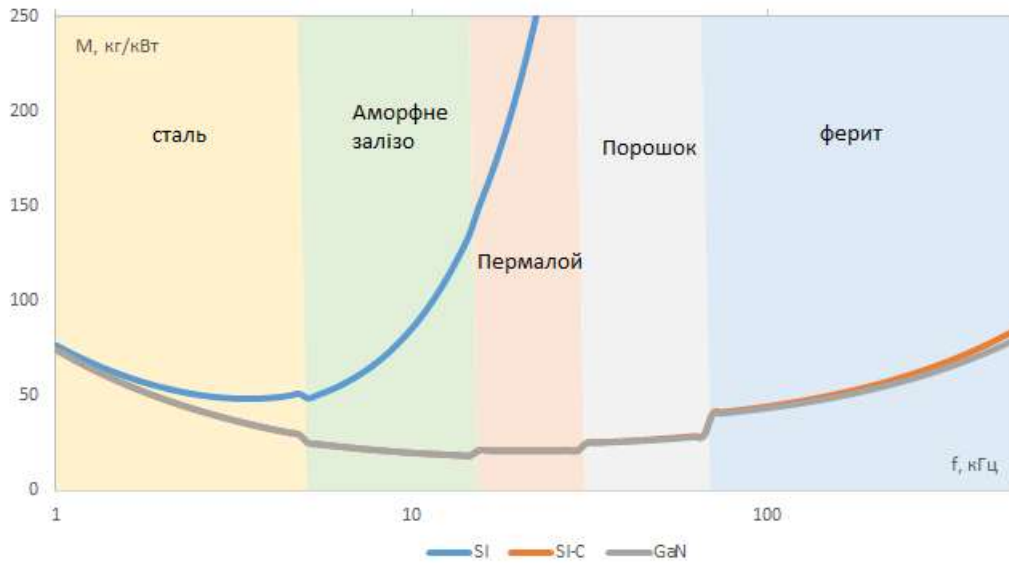


Рис. 2. Графік залежності маси системи АІН-фільтр від частоти

Якщо продиференціювати цільову функцію маси (1) по кутовій частоті, прирівняти вираз до нуля та розв'язати рівняння, можна знайти оптимальну частоту, за якої теоретична маса може бути мінімальною. Отримаємо вираз у такому вигляді:

$$\omega_M^O = \sqrt{\frac{3140\pi \cdot (K_L^M \rho^2 I_{\phi}^2 + 2K_C^M U_{\phi}^2)}{K_O^M W^* \rho}} \quad (2)$$

Розрахунки оптимальної частоти показують, що при використанні транзисторів з кремнію SI оптимальна частота становить 3,2 кГц, що добре збігається з отриманим раніше результатом 3-5 кГц [4]. Перехід до інших матеріалів виграшу в загальній масі системи АІН-фільтр не дає через суттєвий вклад у масу охолоджувачів транзисторів. Для інверторів на базі карбіду кремнію SI-C та нітриду галію GaN оптимальна частоти знаходиться близько до максимальної межі використання аморфного заліза, тобто 15 кГц. Трохи спадаючий характер функції при цьому показує, що рекомендації [10] щодо переходу до іншого матеріалу можуть бути скореговані до 18-20 кГц. Також використання інших матеріалів для побудови дроселей фільтру не дає виграшу по масі, як це має місце при побудові джерел вторинного електроживлення. Для побудови потужних інверторів не має сенсу використання більш дорогих приладів за нітриду галію, бо різниця з карбідом кремнію проявляється на частотах у сотні кГц, при яких маса системи вже буде

неоптимальною. Тобто при сучасному рівні техніки для побудови системи, в якій є потреба встановлення низькочастотного фільтру, оптимальним є застосування комбінації приладів з карбіду кремнію та дроселя на базі аморфного заліза, що дає вигоду в порівнянні з традиційною архітектурою приблизно в 3 рази за показниками маси.

**Висновки.** Оптимізація з врахуванням використання сучасних матеріалів для побудови дроселя фільтру дозволяє сформулювати вимоги щодо вибору частоти комутації інвертора. Для традиційної структури на базі кремнієвих приладів попередні оцінювання (3-5 кГц) залишилися без змін. Отримано уточнене значення оптимальної частоти в 3,2 кГц. З використанням сучасної елементної бази оптимальним виявляється комбінація приладів на базі карбіду кремнію та аморфного заліза. Частота комутації при такому випадку лежить близько верхньої межі використання аморфного заліза і складає близько 15-20 кГц, даючи покращення масогабаритних показників системи в 3 рази в порівнянні з класичною компоновкою.

### Література

1. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ. Видавництво Ліра-К, 2020: 300с.
2. S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1292-

- 1306, Sept.-Oct. 2005, DOI:<https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853371>.
3. Автономные инверторы / Гончаров Ю.П., Ермуратский Е.В., Заика Э.И. и др., под редакцией Г.В. Чалого. Кишинев, изд. "Штиинца", 1974: 336с.
  4. Стрункин Г.Н. Оптимизация частоты коммутации двухуровневого автономного инвертора напряжения. / *Електротехніка та електроенергетика*. 2007, №2, С.19-22. URL: <https://ee.zp.edu.ua/article/download/102955/98086/217899> (дата звернення 23.02.2026).
  5. S. Saridakis, E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "Filter optimization of Si and SiC semiconductor-based H5 and Conergy-NPC transformerless PV inverters," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-10, DOI:<https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631737>.
  6. Baek, S., Choi, D., Bu, H., & Cho, Y. Analysis and Design of a Sine Wave Filter for GaN-Based Low-Voltage Variable Frequency Drives. *Electronics*, 2020, 9(2), 345. DOI:<https://doi.org/10.3390/electronics9020345>.
  7. D. Yang, Z. Cheng, H. Li, S. Won, B. Zhou and J. Tian, "PCB Layout Optimization of High-Frequency Inverter for Magnetic Coupled Resonance Wireless Power Transfer System," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171395-171404, 2019, DOI:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944972>.
  8. P. Channegowda and V. John, "Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4106-4114, Dec. 2010, DOI:<https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2042421>.
  9. Wang, H. Optimization of LCL Filter Grid-Connected Inverters. *Academic Journal of Science and Technology*, 2023, 6(3), 127-133. DOI:<https://doi.org/10.54097/ajst.v6i3.10654>.
  10. McLyman, C.W.T. *Transformer and Inductor Design Handbook* (4th ed.). CRC Press. 2011. DOI:<https://doi.org/10.1201/b10865>.
  11. Семенов В.В., Стрункин Г.Н., Попов С.А. Потери мощности в инверторах с однополярной и двуполярной широтно-импульсной модуляцией. // *Електротехніка та електроенергетика*. 2007, №1, С.25-28. URL: <https://ee.zp.edu.ua/article/download/102914/98033/217783> (дата звернення 23.02.2026).
  12. Переверзев А.В., Семенов В.В., Стрункин Г.Н. Расчет рабочих режимов силовых приборов в полумостовой схеме инвертора напряжения с однополярной ШИМ. // *Електротехніка та електроенергетика*. 2006, №2, С. 8-12. URL: <http://ee.zntu.edu.ua/article/download/102861/97978> (дата звернення 23.02.2026).
- ### References
1. Senko V.I., Trubicin K.V., Chibelis V.I. *Invertori i peretvoryuvachi chastoti: monografiya*. Kiyiv, Vidavnistvo Lira-K, 2020: 300s.
  2. S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sept.-Oct. 2005, DOI:<https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853371>.
  3. Avtonomnye invertory / Goncharov Yu.P., Ermuratskij E.V., Zaika E.I. i dr. Pod redakciej G.V. Chalogo. Kishinev, izd. "Shtiinca", 1974: 336 s.
  4. Strunkin G.N. Optimizaciya chastoty kommutacii dvuhurovneвого avtonomного invertora napryazheniya. / *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2007, №2, S.19-22. URL: <https://ee.zp.edu.ua/article/download/102955/98086/217899> (accessed 23.02.2026).
  5. S. Saridakis, E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "Filter optimization of Si and SiC semiconductor-based H5 and Conergy-NPC transformerless PV inverters," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-10, DOI:<https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631737>.
  6. Baek, S., Choi, D., Bu, H., & Cho, Y. Analysis and Design of a Sine Wave Filter for GaN-Based Low-Voltage Variable Frequency Drives. *Electronics*, 2020, 9(2), 345. DOI:<https://doi.org/10.3390/electronics9020345>.
  7. D. Yang, Z. Cheng, H. Li, S. Won, B. Zhou and J. Tian, "PCB Layout Optimization of High-Frequency Inverter for Magnetic Coupled Resonance Wireless Power Transfer System," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171395-171404, 2019, DOI:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944972>.
  8. P. Channegowda and V. John, "Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4106-4114, Dec. 2010, DOI:<https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2042421>.
  9. Wang, H. Optimization of LCL Filter Grid-Connected Inverters. *Academic Journal of Science and Technology*, 2023, 6(3), 127-133. DOI:<https://doi.org/10.54097/ajst.v6i3.10654>.
  10. McLyman, C.W.T. *Transformer and Inductor Design Handbook* (4th ed.). CRC Press. 2011. DOI:<https://doi.org/10.1201/b10865>.
  11. Semenov V.V., Strunkin G.N., Popov S.A. Poteri moshnosti v invertorah s odnopolyarnoj i dvupolyarnoj shirotno-impulsnoj modul'ya-ciej. // *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2007, №1, S.25-28. URL: <https://ee.zp.edu.ua/article/download/102914/98033/217783> (accessed 23.02.2026).
  12. Pereverzev A.V., Semenov V.V., Strunkin G.N. Raschet rabochih rezhimov silovyh priborov v polumostovoj sheme invertora napryazheniya s odnopolyarnoj ShIM. // *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2006, №2, S. 8-12. URL: <http://ee.zntu.edu.ua/article/download/102861/97978> (дата звернення 23.02.2026).

ktroenergetika. 2006, №2, S. 8-12. URL: <http://ee.zntu.edu.ua/article/download/102861/97978> (accessed 23.02.2026).

**Strunkin H.M. refinement of the optimal switching frequency of a voltage-source inverter with a filter**

*The article states the need to increase the switching frequency of autonomous voltage-source inverters in order to minimize its total mass together with the low-frequency output filter. The reduction in the mass of passive components of the filter with increasing inverter switching frequency is accompanied by an increase in the power losses in its transistors. Two mutually opposite directions form the minimum of the objective function of the dependence of the mass of the autonomous voltage inverter - filter system on the switching frequency. Previous works on finding the mass of the inverter - filter system when using thyristors, silicon transistors, transistors based on silicon carbide and gallium nitride, filters with a core made of electrical steel, amorphous iron, permalloy and ferrite are considered. It is justified to generalize previous studies by dividing the frequency range into five regions according to the core materials used. To construct the objective function of the mass dependence of the elements of the autonomous voltage-source inverter-filter system, the method of weight coefficients was used, which are specific mass indicators, respectively, for transistor coolers, choke, and filter capacitor. A diagram of a single-phase autonomous voltage inverter with a low-frequency filter is presented.*

*The objective function of the mass dependence of the elements of the voltage inverter-filter system on the switching frequency is described. Using weight coefficients for chokes with different core materials, it is possible to carry out global optimization. The previously obtained indicators of the optimal frequency for silicon transistors and a choke with a core made of electrical steel are confirmed. It is shown that replacing the core material does not allow to significantly reduce the mass of the inverter-filter system. Using transistors based on silicon carbide and a choke core made of amorphous iron, it is possible to improve the mass and dimensions of the inverter with a filter by three times. The use of high-frequency materials such as permalloy, powdered iron, and ferrites in the core of the choke does not provide a weight advantage, nor does the use of faster gallium nitride transistors. For most industrial inverters, the optimal frequency is 3.2 kHz.*

**Key words:** voltage-source inverter, low-pass filter, switching frequency, objective function, weighting factors, mass.

**Стрункін Гліб Миколайович** – магістр, інженер відділу приводу та перетворювачів ТОВ «Плутон ІС». 79026, Україна, Львівська обл., місто Львів, вулиця Лукаша М., будинок 46 офіс 1, e-mail: [strunkingleb@gmail.com](mailto:strunkingleb@gmail.com).

Стаття подана 15.12.2025.