

Силова електроніка

УДК 621.314

DOI [10.20535/2312-1807.2017.22.2.81637](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.2.81637)**Миколаєць Д. А.**, к.т.н., OrcID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)e-mail dmytri_m@ukr.net**Жуйков В. Я.**, д.т.н., проф., OrcID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)e-mail valery_zhuikov@yahoo.com

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

РОЗРАХУНОК ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ЗАРЯДОМ АКУМУЛЯТОРА ЗА СЕРЕДНІМИ ЗНАЧЕННЯМИ СТРУМУ ТА НАПРУГ

Проаналізовані процеси в однофазному фільтро-компенсуючому перетворювачі паралельного типу з зарядом акумулятора постійним струмом. Приведені часові діаграми струмів компенсатора, а також еквівалентні схеми на відповідних інтервалах роботи. Приведений метод розрахунку ємності та напруги накопичувального конденсатора з умов балансу енергій. Представлений спосіб розрахунку згладжуючого дроселя за середніми значеннями струмів та напруг з використанням регульовальної характеристики перетворювача на робочому інтервалі та балансу енергій.

*Бібл. 9, рис. 4.***Ключові слова:** *фільтро-компенсуючий перетворювач; реактивна енергія; баланс енергій.*

Вступ. Для багатьох пристроїв, наприклад комп'ютерів, медичного обладнання, систем зберігання інформації, систем зв'язку, систем охорони або систем спеціального призначення гостро стоїть питання безперебійного живлення, адже втрата енергопостачання в подібних системах призводить до незворотних наслідків. Сумісне використання фільтро-компенсуючого перетворювача (ФКП) з накопичувачем енергії забезпечує як електромагнітну сумісність, так і безперебійне живлення, тому питання побудови ФКП як системи гарантованого живлення (СГЕЖ) є актуальною задачею [1 - 3].

На рис. 1, а представлена схема СГЕЖ, яка працює на випрямляч з активно-ємнісним навантаженням, що притаманне більшості електронно-обчислювальної апаратури та апаратури зв'язку [4].

Призначенням цього пристрою є формування синусоїдального струму споживання, синфазного з напругою мережі, з одночасним забезпеченням заряду акумулятора постійним струмом I_a , що, як правило, виконується за допомогою понижуючого широтно-імпульсного перетворювача.

Побудова силової частини ФКП дозволяє використовувати його роботу в режимі мостового інвертора, який формує змінну напругу живлення, це забезпечує режим роботи джерела безперебійного живлення (ДБЖ) при втраті напруги в мережі, що призводить до розряду акумулятора до деякого допустимого мінімального значення. При наявності напруги мережі ФКП забезпечує як компенсацію несинусоїдальності струму, так і заряд акумулятора, що суттєво змінює режим роботи ФКП в порівнянні з класичним компенсатором [5 - 8].

На рис. 1, б представлені часові діаграми струму навантаження i_d , півперіоду вхідного струму i_{ex} та струму компенсатора i_k в режимі компенсації реактивної енергії при зарядженому акумуляторі ($i_{ex}(t)$, $i_k(t)$) та при заряді акумулятора постійним струмом ($i_{ex}'(t)$, $i_k'(t)$). При заряді акумулятора необхідно враховувати енергію, що споживає акумулятор за півперіод напруги мережі. Таким чином, змінюються як амплітуда вхідного струму, що збільшується на величину пропорційну цій енергії, так і тривалості робочих інтервалів.



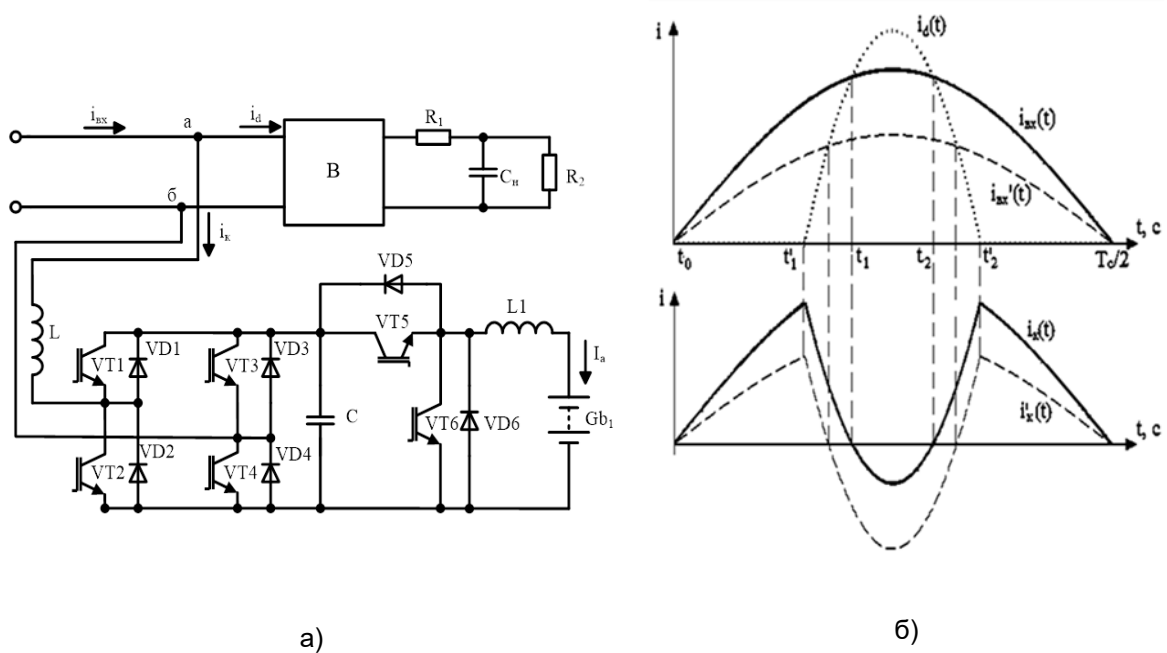


Рис. 1. Схема СГЕЖ (а) та часові діаграми струму навантаження i_d , півперіоду вхідного струму $i_{вх}$ та струму компенсатора i_k (б)

На рис. 2 представлені еквівалентні схеми роботи компенсатора з системою заряду/розряду акумулятора (СЗР). На інтервалах $t_0 - t_1$ та $t_2 - T_c/2$ ФКП виступає як ШІП підвищуючого типу, споживаючи енергію з мережі та заряджаючи ємнісний накопичувач. На інтервалі $t_1 - t_2$ ФКП працює як ШІП понижуючого типу та віддає енергію з ємнісного накопичувача в мережу.

Алгоритм розрахунку параметрів ФКП з зарядом акумулятора, представлений в [9], який включає в собі такі кроки, як визначення основних параметрів силової частини, виведення законів керування напівпровідниковими ключами, а також знаходження значень струмів та напруг компенсатора, є досить громіздким, що призводить до залишкового навантаження мікропроцесорних систем керування при розрахунку цих параметрів. Метою роботи є виведення спрощених виразів, що приводить до скорочення програмної частини розрахунку, та відповідно до зменшення обчислювальних затрат мікропроцесорної системи керування за рахунок зменшення кількості математичних операцій, що в свою чергу призводить до прискорення розрахунку сигналів керування або зменшення затримки сигналу керування у системі керування. Враховуючи взаємозв'язок між розрахунками за енергетичними параметрами та регульовальною характеристикою фільтро-компенсуючого перетворювача на робочих інтервалах, вирази для розрахунку зада-

ючих струмів та напруг з одночасним розрахунком ємності накопичувального конденсатора та індуктивності згладжувального дроселя можна зробити більш наочними та простими для використання. Спрощення процесу розрахунку напруги конденсатора значно зменшить кількість алгебраїчних операцій, що повинен виконати мікропроцесор при керуванні або стабілізації напруги.

Визначення величини ємності накопичувального конденсатора. Для коректної роботи ФКП, величина енергії, що накопичується в конденсаторі, повинна бути достатньою для заряду акумулятора та повернення енергії в мережу на інтервалі $(t_1 - t_2)$, див. рис. 1. Необхідно забезпечити такі умови роботи системи, при яких виконується баланс енергії, що описується наступним виразом:

$$2(W_1^* + W_1^{*'}) = -W_2^* + W_2^{*'} + W_a. \quad (1)$$

Ліва частина виразу (1) являє собою енергію, що накопичує ФКП за півперіод напруги мережі, а права частина – енергію, яку ФКП віддає в мережу $(W_2^* + W_2^{*'})$ та систему заряду (W_a) . Враховуючи, що енергія накопичується в конденсаторі C , енергія $W_2^* + W_2^{*'}$ визначена в [5], енергія W_a визначена в [9], вираз для балансу енергії (1) набуває вигляду:

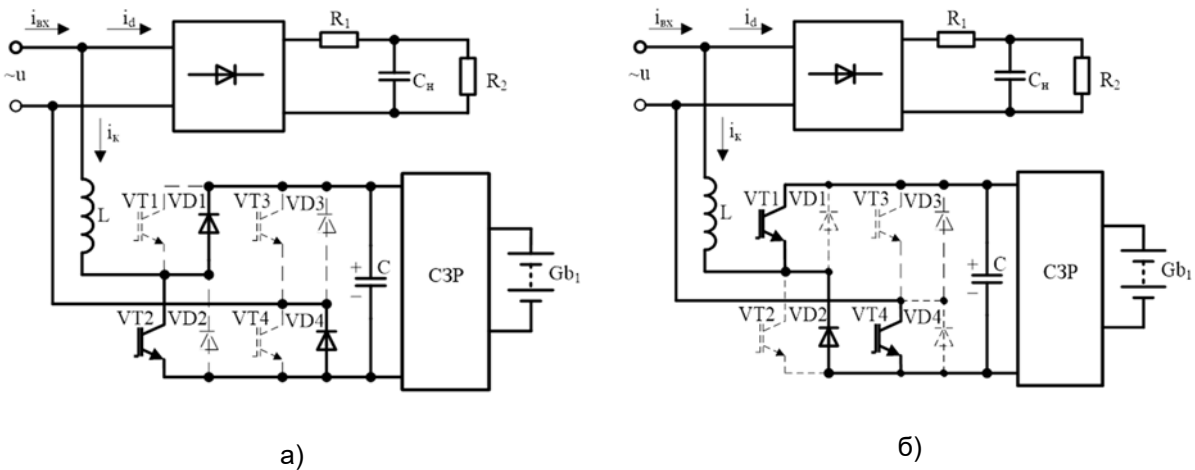
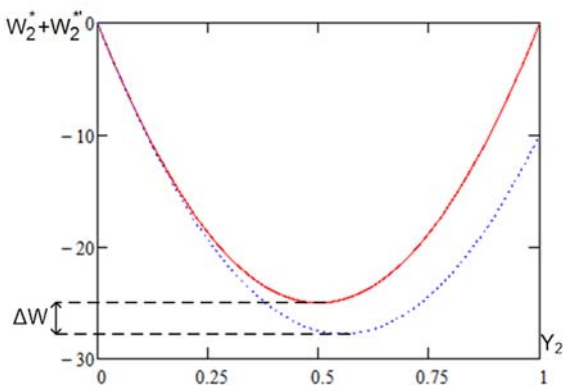


Рис. 2. Еквівалентні схеми роботи компенсатора з СЗР:

а – споживання електроенергії з мережі; б – повернення електроенергії в мережу

$$\frac{CU_c^2}{2} = \tau_2^2 Y_2 (1 - Y_2) \frac{U_2^* U_c}{2L} + U_a I_a \frac{T_c}{2}, \quad (2)$$

з якого визначається або величина C при заданому L , або величина L при заданому C і відомих параметрах τ_2 , Y_2 , T , U_c , U_a , I_a .

Рис. 3. Залежність енергії $W_2^* + W_2^{*'}$ від Y_2

Величина енергії $W_2^* + W_2^{*'}$ залежить від тривалості імпульсного струму навантаження і визначається середньою напругою U_2^* , напругою накопичувального конденсатора U_c , величиною індуктивності згладжувального дроселя L та середнім коефіцієнтом заповнення імпульсів Y_2 . Вираз (2) отриманий з використанням припущень, при яких не враховуються втрати в колі перетворювача та втрати на перемикання напівпровідникових ключів. За допомогою програмного пакету MathCAD® при прийнятих припущеннях побудована залежність енергії $W_2^* + W_2^{*'}$ від коефіцієнту Y_2 , яка наведена на рис. 3.

Знак мінус на осі ординат на рис. 3 означає, що енергія з конденсатора віддається в мережу. Як видно з графіку, найбільше значення енергії $W_2^* + W_2^{*'}$ відповідає значенню $Y_2=0,5$. При врахуванні втрат мінімум кривої, показаної на рис. 2 пунктиром, зміститься в бік, більше 0,5, енергія ΔW обумовлена втратами енергії. Після підстановки отриманого значення Y_2 в (2), вираз для визначення ємності конденсатора набуде наступного вигляду:

$$C = \tau_2^2 \frac{U_2^*}{4LU_c} + U_a I_a \frac{T_c}{U_c^2}. \quad (3)$$

Так як значення ємності C залежить від індуктивності дроселя L та напруги на конденсаторі U_c , яку повинен підтримувати ФКП, то для розрахунку C необхідно визначити номінали індуктивності L та величину напруги U_c .

Визначення індуктивності дроселя з умови неперервного струму. Для визначення величини індуктивності необхідно розглянути найбільш критичний режим роботи компенсатора, по відношенню до роботи дроселя в режимі безперервного струму. Саме такий режим роботи забезпечується на початку півперіоду напруги мережі, коли $u(t)$ та $i(t)$ – мінімальні (рис. 4, а). Починаючи з моменту t_k , ФКП працює як ШІП підвищуючого типу, еквівалентна схема якого наведена на рис. 3,б, при цьому на інтервалі Δt не забезпечується режим неперервного струму дроселя при заданих параметрах. Для подальших розрахунків параметрів силової частини використовується еквівалентна схема з урахуванням втрат в колі, які моделюються за допомогою введення в схему резистора R_n .

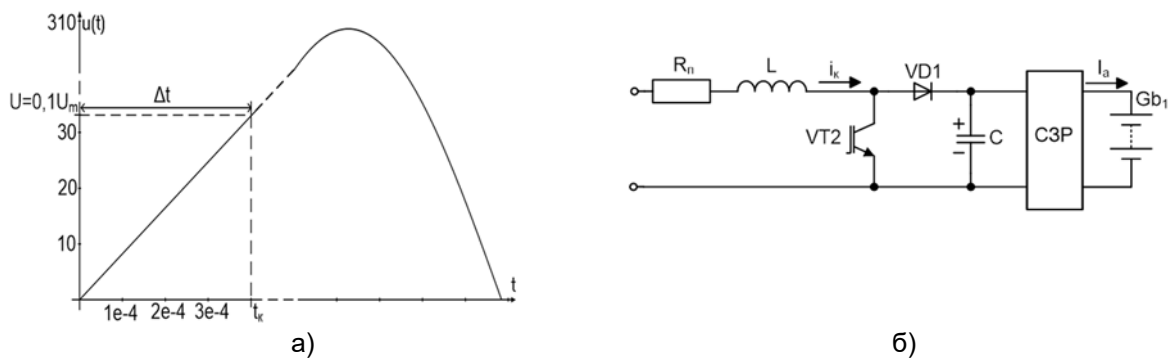


Рис. 4. Еквівалентна схема (б) та часова діаграма напруги джерела (а) на початку півперіоду напруги мережі

На інтервалі відкритого стану ключа VT2 процеси, що протікають у вхідному колі перетворювача (див. рис. 4, б), описуються наступним виразом:

$$U = L \frac{I_k}{\tau} + I_k R_n, \quad (4)$$

де U та I_k – відповідно середні значення напруги мережі та струму, що споживає компенсатор в момент часу t_k , на початку півперіоду напруги мережі, τ – інтервал відкритого стану транзистора. Для забезпечення неперервного струму дроселя t_k обирається таким, щоб $U \geq 0,1U_m$, відповідно виходячи з синусоїдального закону зміни вхідного струму $i(t)$, а також враховуючи, що на інтервалі $t_0 - t_1'$ (див. рис. 1, б) $i(t) = i_k(t)$, струм компенсатора в даний момент часу рівний: $I_k \geq 0,1I_m$. З виразу (4) визначається струм I_k в кінці інтервалу τ :

$$I_k = \frac{U}{L / \tau + R_n}. \quad (5)$$

Значення I_k в момент t_k дорівнює величині максимального приросту струму ΔI_k за перший період комутації транзистора T та дорівнює найбільшому значенню амплітуди пульсації струму $i_k(t)$. Оскільки за прийнятою моделлю, струм змінюється лінійно, а інтервали закритого та відкритого стану ключа – рівні, приходимо до висновку, що для забезпечення режиму неперервного струму дроселя в момент часу t_k середній струм I_k повинен бути вдвічі меншим, ніж значення розрахованого за формулою (5) приросту струму ΔI_k . Звідси мінімальна величина індуктивності згладжувального дроселя визначається з виразу:

$$L_{кр} = \frac{U\gamma}{2I_k f} + \frac{R_n \gamma}{f}. \quad (6)$$

В формулі (6) невідомою величиною є коефіцієнт заповнення імпульсів γ , який можливо визначити за допомогою регульовальної характеристики перетворювача, яка отримується в результаті порівняння виразів, що описують процеси в схемі перетворювача із закритим та відкритим станом ключа.

На інтервалі закритого стану ключа VT2 робота ШІП описується виразом $C U_c (T - \tau) = I_k$, звідки

$$U_c = I_k (T - \tau) / C. \quad (7)$$

Підставляючи (5) в (7), останній вираз набуде вигляду:

$$U_c = \frac{U(1-\gamma)}{Cf(Lf / \gamma + R_n)}, \quad (8)$$

де величина γ залежить від умов роботи ФКП, які суттєво відрізняються на початку та в кінці робочих інтервалів. На початку півперіоду синусоїди напруги мережі її величина надто мала для того, щоб за допомогою підвищуючого ШІП передати енергію з джерела до конденсатора ($u(t) \ll U_c$), тому вхідний струм на деякому відрізку часу дорівнює нулю. Проте система керування на цьому інтервалі роботи працює з таким коефіцієнтом заповнення імпульсів, щоб забезпечити задану U_c , як тільки будуть забезпечені необхідні умови. Виходячи з вищесказаного, для розрахунку γ , необхідно знайти максимум функції (8), що призводить до вирішення квадратичного рівняння. В результаті максимальна тривалість коефіцієнта заповнення імпульсів:

$$\gamma = \frac{-1 + \sqrt{1 + R_n / Lf}}{R_n / Lf}. \quad (9)$$

З виразів (6) та (9) визначається індуктивність дроселя, дане рівняння є трансцендентним та

вирішується чисельними методами за допомогою використання програмних пакетів Matlab® чи MathCAD®.

Визначення напруги накопичувального конденсатора. Протягом роботи ФКП напруга U_c є постійною з деякими пульсаціями. Основними обмеженнями для розрахунку цієї напруги є значення постійної складової напруги, яка не повинна бути меншою, ніж амплітудне значення напруги мережі, а також амплітуди та частоти пульсацій. Зважаючи на те, що пульсації складають одиниці відсотків від загальної величини напруги, основним параметром, що використовується в розрахунках, є середнє значення напруги конденсатора U_c .

Для визначення величини U_c необхідно розрахувати середнє значення I_1^* вхідного синусоїдального струму $i(t) = I_m \sin \omega t$ на інтервалі τ_1 (див. рис. 1, б), яке виражається наступним чином:

$$I_1^* = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\omega \tau_1} (1 - \cos \omega \tau_1). \quad (10)$$

Приймаючи, що тривалість першого та другого інтервалів дорівнюють один одному ($\tau_1 = \tau_2$), енергія, що накопичується в конденсаторі за півперіод напруги мережі $0 \div T_c/2$ дорівнює:

$$\frac{CU_c^2}{2} = 2U_1 I_1^* \tau_1. \quad (11)$$

З урахуванням (9) вираз (11) набуває вигляду:

$$\frac{U_c^2}{2} \left(\tau_2^2 \frac{U_2^*}{4LU_c} + U_a I_a \frac{T_c}{U_c^2} \right) = 2U_1 I_1^* \tau_1. \quad (12)$$

Звідси напруга на конденсаторі U_c дорівнює:

$$U_c = \frac{16U_1 I_1^* \tau_1 L}{\tau_2^2 U_2^*} - \frac{4U_a I_a T_c L}{\tau_2^2 U_2^*}. \quad (13)$$

Варто зауважити, що в цьому розрахунку не врахована енергія, що споживається навантаженням за інтервал $t_1' - t_1$ (рис. 1, б), що в інженерних розрахунках та при побудові системи керування не приводить до суттєвої помилки, оскільки ця енергія незначна по відношенню до сумарної енергії, що споживається, і її значення близьке зі значенням енергії втрат на елементах схеми. До того ж, в інженерній практиці зазвичай використовують значення напруги конденсатора дещо більші, ніж розрахункові, щоб забезпечити більш стабільну роботу пристрою.

Висновки. Таким чином, розрахунок за середніми значеннями струмів та напруг дозволяє значно спростити обчислення параметрів реактивних елементів ФКП і спростити визначення U_c , що є важливим для системи керування, так як призводить до зменшення часу розрахунку напруги на конденсаторі. Завдяки цьому зменшується загальна затримка реакції системи керування, що позитивно впливає на форму зкомпенсованого струму.

Надійшла до редакції 31 жовтня 2016 р.

УДК 621.314

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

e-mail dmytri_m@ukr.net

Жуйков В. Я., д.т.н., проф., OrcID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

e-mail valery_zhuykov@yahoo.com

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"

РАССЧЕТ ФИЛЬТРО-КОМПЕНСИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЗАРЯДОМ АККУМУЛЯТОРА ПО СРЕДНИМ ЗНАЧЕНИЯМ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Проанализированы процессы в однофазном фильтро-компенсирующем преобразователе параллельного типа с зарядом аккумулятора постоянным током. Приведены временные диаграммы токов компенсатора, а также эквивалентные схемы на соответствующих интервалах работы. Приведен метод расчёта емкости и напряжения накопительного конденсатора из условия ба-



ланса энергий. Представлен способ расчёта сглаживающего дросселя по средним значениям токов и напряжений с использованием регулировочной характеристики преобразователя на рабочем интервале и баланса энергий.

Библ. 9, рис. 4.

Ключевые слова: фильтро-компенсирующий преобразователь; реактивная энергия; баланс энергий.

UDC 621.314

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

e-mail dmytri_m@ukr.net

V. Ya. Zhuikov, Dr.Sc.(Eng), Prof., OrcID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

e-mail valery_zhuikov@yahoo.com

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

CALCULATION OF FILTER-COMPENSATING CONVERTER WITH BATTERY CHARGE ON THE AVERAGE VALUES OF CURRENTS AND VOLTAGES

The processes in a single-phase parallel type active power line conditioner with a DC battery charge are analyzed. The consistent use of the active power line conditioner with the energy storage provides both electromagnetic compatibility and uninterrupted power, so the issue of constructing this type of compensator as a system of guaranteed power is an urgent task. The purpose of this device is the formation of a sinusoidal current consumption, in-phase with the network voltage, while simultaneously ensuring the battery charge by DC current, which is usually carried out with the help of a buck converter. The construction of a power unit of this type of compensator allows you to use it in the mode of bridge inverter, which forms a variable supply voltage, this provides the mode of operation of the source of uninterruptible power supply at the loss of voltage in the network, which leads to discharge of the battery to the level of some acceptable minimum value. In the presence of network voltage, the filter-compensating converter provides both the compensation of the non-sinusoidal current and the charge of the battery, which substantially changes the operation of the active power line conditioner compared with the classical compensator. The purpose of the work is to bring out simplified expressions, which leads to a reduction in the software part of the calculation, and in accordance with the reduction of computing spending of the microprocessor control system by reducing the number of mathematical operations, which in turn leads to accelerating the calculation of control signals or reducing the delay of the control signal in the control system. Taking into account the relationship between the calculations for energy parameters and the control characteristic of the active power line conditioner at working intervals, expressions for calculating the reference currents and voltages, with simultaneously calculating the capacitance of the storage capacitor and the inductance of the smoothing inductor, can be made more visible and easy to use. Simplifying the process of calculating the voltage of the capacitor will significantly reduce the number of algebraic operations that a microprocessor must perform for controlling or stabilizing the voltage. The timing diagrams of compensator currents, as well as equivalent circuits at corresponding intervals of work are shown. The method of calculation of capacitance and voltage of a storage capacitor from conditions of balance of energies are given. The method of calculating of the smoothing inductor by the average values of currents and voltages with using the control characteristic of the converter on the working interval and the energy balance is presented.

Ref. 9, fig. 4.

Key words: active power line conditioner; reactive power; balance of energy.

References

- [1]. Yu. S. Yamnenko, T. O. Tereschenko, D. A. Mykolaiets, "Fil'tro-kompensuyuchy peretvoryuvach z systemoyu zaryadu/rozryadu akumulyatornoyi batareyi [Active power line conditioner with battery charge]," *Tekhnichna elektrodinamika*, no. 5, pp. 16-20, 2015,
URL: http://techne.org.ua/2015_5/st3.pdf.



- [2]. Barrero F., Martínez S., Yeves F., Mur F., Martínez P. M., "Universal and reconfigurable to UPS active power filter for line conditioning," *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 1, vol. 18, pp. 319-325, 2003, DOI: [10.1109/TPWRD.2002.804014](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.804014).
- [3]. Jou H. L., Wu J. C. "A new parallel processing ups with the performance of harmonic suppression and reactive power compensation," *IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC'94), Proc.*, pp. 1443-1450, 1994, DOI: [10.1109/PESC.1994.373874](https://doi.org/10.1109/PESC.1994.373874).
- [4]. K. A. Lipkovskiy, V. V. Kirik, A. F. Zharkin, A. V. Samkov, "Osobennosti elektropitaniya «energoeffektivnykh potrebiteley»" *Tehn. elektrodinamika, tematichniy vipusk. "Modelyuvannya elektronnih, energetichnih ta tehnologichnih sistem"*, Part 1, pp. 94-96, 1999.
- [5]. V. Y. Zhuikov, Nguyen Hai Tung, "Condition of reactive power compensation by parallel type high frequency converter," *Elektronika i svyaz*, no. 5, pp. 82-85, 1998.
- [6]. V. M. Mihalskiy, V. M. Sobolev, V. V. Chopik, I. A. Shapoval, "Strategiya minimizatsiyi nebazhanih skladovih mittevoyi potuzhnosti iz zastosuvannyam riznih topologiy paralelnih aktivnih filtriv," *Tehnichna elektrodinamika*, no. 1, pp. 41-50, 2014, URL: http://techned.org.ua/2014_1/st6.pdf.
- [7]. Barrero F., Martínez S., Martínez P. M., Yeves F., "Active power filters for line conditioning: a critical evaluation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 1, vol. 15, pp. 283-290, 2000, DOI: [10.1109/61.847269](https://doi.org/10.1109/61.847269).
- [8]. Cadaval E.R., Gonzalez F.B., Montero M. I. M., "Active power line conditioner based on two parallel converters topology," *Compatibility in Power Electronics*, pp. 134-140, 2005, DOI: [10.1109/CPE.2005.1547558](https://doi.org/10.1109/CPE.2005.1547558).
- [9]. D. Mikolaiets, "The calculating algorithm of active power line conditioner with uninterruptible power supply function," *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2015 IEEE 35th International Conference proceedings, pp. 534-538, 2015, DOI: [10.1109/ELNANO.2015.7146945](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2015.7146945).