

Озерчук І.М.

orcid.org/0000-0001-7011-0772

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИЛОВОГО БАГАТОФАЗНОГО ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА БАЗІ БПЛА

Досліджено принципи побудови силового багатофазного імпульсного перетворювача для безпілотного літального апарату. Розкрито механізми узгодження параметрів джерел первинного електроживлення з параметрами навантаження (тобто споживачів електроенергії – безпілотних літальних апаратів) за видом електроенергії, її якості і номінальним значенням, що забезпечують перетворювачі і регулятори електричної енергії, які є складовою частиною сучасних засобів електроживлення та електропостачання. Наголошено, що для сучасних безпілотних літальних апаратів фундаментальну роль відіграють вага та габарити системи електропостачання, що приводить до виникнення особливих вимог створення перетворювачів електричної енергії на базі безпілотних літальних апаратів. Крім вимог високої надійності, коефіцієнта корисної дії, заданої якості електроенергії, висувуються вимоги щодо високого ступеня мініатюризації. Підкреслено, що дозвіл зазначеного протиріччя між масогабаритними та енергетичними показниками імпульсних перетворювачів електричної енергії модульної структури досягається переходом до багатофазного принципу перетворення електричної енергії. Багатофазні імпульсні перетворювачі, що реалізують зазначений принцип, забезпечують можливість зменшення обсягу і маси силових згладжуючих фільтрів без збільшення частоти перетворення. Запропоновано блок-схему силового багатофазного імпульсного перетворювача для безпілотного літального апарату, яка має трифазний регулятор напруги. Обґрунтовано, що застосування трифазного регулятора напруги живлення дає змогу розподілити струм по всіх фазах, а отже, струм, що протікає по кожній фазі, буде в три рази меншим від струму навантаження. Наведено графік розподілу струму по кожній фазі і результуючий струм навантаження в трифазному регуляторі напруги, з якого видно, як гаситься струм пульсацій у трифазному перетворювачі. Зазначено, що основна перевага багатофазних імпульсних регуляторів напруги живлення полягає в тому, що вони дозволяють знизити пульсації вихідної напруги за однакової ємності та індуктивності згладжуючого фільтру.

Ключові слова: силовий багатофазний імпульсний перетворювач, безпілотний літальний апарат, напруга, електрична енергія, імпульс.

Постановка проблеми. Безпілотні літальні апарати відповідно до [1] повинні задовольняти вимогам надійності і забезпечувати стійкий зв'язок. Ця вимога визначається основним завданням галузі зв'язку з використанням БПЛА у сфері розвідки та навігації – надання якісних і надійних інформаційних послуг. Якість і надійність застосування БПЛА в принципі не може бути вищою від якості і надійності пристроїв і систем, реалізованих на борту безпілотного літального апарату. У разі відсутності електричної енергії безпілотні літальні апарати не в змозі виконувати покладені на них завдання. На сучасному етапі для успішного вирішення завдань, поставлених перед галуззю безпілотної авіації, значно посилюються вимоги, що пред'являються БПЛА до якості споживаної ними електричної енергії – стабільності напруги живлення, рівня допустимих пульсацій за одночасного зростання величин струмів навантаження.

Узгодження параметрів джерел первинного електроживлення з параметрами навантаження (тобто споживачів електроенергії – безпілотних літальних апаратів) за видом електроенергії, її якості і номінальним значенням забезпечують перетворювачі і регулятори електричної енергії, які є складовою частиною сучасних засобів електроживлення та електропостачання.

Перетворювачі електричної енергії значною мірою визначають масогабаритні показники, енергоспоживання, надійність, час готовності до роботи засобів електроживлення безпілотних літальних апаратів, складовою частиною яких вони є. Тому вдосконалення перетворювачів електричної енергії, поліпшення їх техніко-економічних показників – зменшення обсягу, маси, підвищення надійності, коефіцієнта корисної дії (ККД), поліпшення електромагнітної сумісності з безпілотними літальними апаратами, що живляться,

а тим самим – поліпшення техніко-економічних показників БПЛА загалом – є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій за темою дослідження показав масштабність сучасних досягнень.

Ю.І. Гусевський, С.М. Лутай, А.Г. Мастепан та Ю.В. Пашинська [2] дослідили принципи побудови дворівневого інвертора з покращеною формою вихідної напруги. У межах дослідження виконано аналіз конструкційних особливостей цього інвертора, запропоновано послідовність перемикання силових ключів для отримання фазної напруги, близької до синусоїдальної форми. Виконано аналіз енергетичних показників запропонованого інвертора.

Частотно-імпульсний модулятор з адаптивною корекцією тривалості імпульсу розглянули Р. Єршов та В. Войтенко [3]. Стаття присвячена розробленню структури цифрового частотно-імпульсного модулятора з адаптивною корекцією тривалості імпульсу (ЦЧІМ-АКТІ) та методу автоматичного стеження за РК з метою прогнозування її переходу через нуль. Запропонована схемотехнічна структура та алгоритм функціонування модулятора у складі блоків ЦЧІМ та АКТІ на основі декількох цифрових автоматів, набору лічильників та арифметико-логічних пристроїв. Пара зовнішніх гістерезисних компараторів детектує перехід резонансної кривої через порогові рівні, розміщені симетрично відносно нульового рівня.

Ю.Г. Даник, О.В. Манько та В.В. Павлюк [4] розробили алгоритм, який забезпечує встановлення факту належності прийнятого радіовипромінювання до класу радіосигналів систем дистанційного керування безпілотними літальними апаратами з імпульсно-позиційною та імпульсно-ковою модуляціями. Алгоритм базується на послідовних перевірках енергетичної, модуляційної та структурної ознак сигналу, передбачає можливість автоматичного виявлення сигналу та супроводження його за частотою.

О.І. Кочерга [5] розробив класифікацію електромеханічних перетворювачів, які включають феромагнітний, котушковий та суцільний електропровідний якорі. Встановлено особливості протікання електромагнітних процесів та визначені електричні, магнітні та силові показники електромеханічних мультиякірних конфігурацій. Запропоновано комплексний критерій оцінювання ефективності, за допомогою якого проведено порівняльний аналіз перетворювачів мультиякірних конфігурацій з перетворювачами, що

мають один якір. Автором встановлено вплив форми струму збудження на ефективність перетворювачів мультиякірних конфігурацій.

Із зарубіжних авторів варто відзначити: Jimenez-Fernandez A., Jimenez-Moreno G., Linares-Barranco A., Dominguez-Morales M.J., Paz-Vicente R., Civit-Balcells A.A. [6], Denisov Yu., Gorodniy O., Gordienko V., Vershniak L., Dymereets A. [7], Gorodny A.N., Dymereets A.V. [8], Sampath P., Vikas C. [9], Chen W.H., Inerowicz M.E., Jung B. [10], Zhang C., Syrzycki M. [11], Pogliano U., Serazio D., Trinchera B. [12] та інших.

Проте, враховуючи описані наукові набутки за темою, питання дослідження силового багатofазного імпульсного перетворювача для БПЛА залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Мета статті – провести дослідження силового багатofазного імпульсного перетворювача для БПЛА.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасні безпілотні агрегати використовують високочастотний (імпульсний) принцип перетворення електричної енергії. Для стабілізації та регулювання параметрів електричної енергії (напруги, струму, потужності) застосовується, як правило, широтно-імпульсна модуляція. Це дає змогу створювати пристрої безпілотної авіації та системи стеження з більш високою питомою потужністю і характеристиками, недосяжними при використанні інших методів [3–7].

Модульна побудова імпульсних перетворювачів з N однотипних взаємозамінних перетворювачів постійної напруги – силових каналів – забезпечує підвищення їх надійності, технологічності і зниження трудомісткості їх виготовлення, підвищення рівня уніфікації та стандартизації. Модульна побудова перетворювачів електричної енергії сприяє вирішенню питань резервування, підвищення надійності, адаптації їх структур до змін умов їх експлуатації та режимів роботи, економії електроенергії [8]. За широкого впровадження мікросхем вага і габарити власне безпілотних літальних апаратів – їх інформаційних складників – різко зменшилися, тоді як відносний обсяг і вага засобів електроживлення зросли, тому що на їх виході потрібна, як правило, низька напруга (наприклад, 5 В, 12 В, 48 В, 60 В) за великих токів. Це тягне за собою збільшення перерізу проводів, габаритів і втрат енергії. Цим зумовлено збільшення відносного обсягу і ваги засобів електроживлення до 80% від загального обсягу і ваги безпілотного літального апарату.

Зменшення масогабаритних показників (мініатюризація) є генеральним напрямом розвитку безпілотної авіації. Тому до перетворювачів електричної енергії на базі БПЛА, крім вимог високої надійності, ККД, заданої якості електроенергії, висувуються вимоги щодо високого ступеня мініатюризації [8]. Наявність функціонально необхідних при імпульсному перетворенні електроенергії реактивних елементів ускладнює зменшення масогабаритних показників перетворювачів на базі БПЛА. Зменшення маси й обсягу реактивних елементів досягається підвищенням робочої частоти, але це призводить до збільшення динамічних втрат (втрат на перемикання силових комутуючих елементів), що також погіршує техніко-економічні показники перетворювачів.

Дозвіл зазначеного протиріччя між масогабаритними та енергетичними показниками імпульсних перетворювачів електричної енергії модульної структури досягається переходом до

багатофазного принципу перетворення електричної енергії. У цьому разі один імпульсний процес перетворення електричної енергії розбивається на кілька N процесів (за кількістю силових каналів), які зсуваються в часі один щодо одного і підсумовуються в загальних ланцюгах їх протікання. Багатофазні імпульсні перетворювачі, що реалізують зазначений принцип, забезпечують можливість зменшення обсягу і маси силових згладжуючих фільтрів без збільшення частоти перетворення.

На рис. 1 наведено блок-схему силового багатофазного імпульсного перетворювача для БПЛА, яка має трифазний регулятор напруги.

Застосування N -фазного регулятора напруги живлення дає змогу розподілити струм по всіх фазах, а отже, струм, що протікає по кожній фазі, буде в N разів меншим від струму навантаження. Наприклад, якщо використовувати 3-фазний регулятор напруги живлення процесора з обмеженням по струму в кожній фазі до 17.5 А (піковий

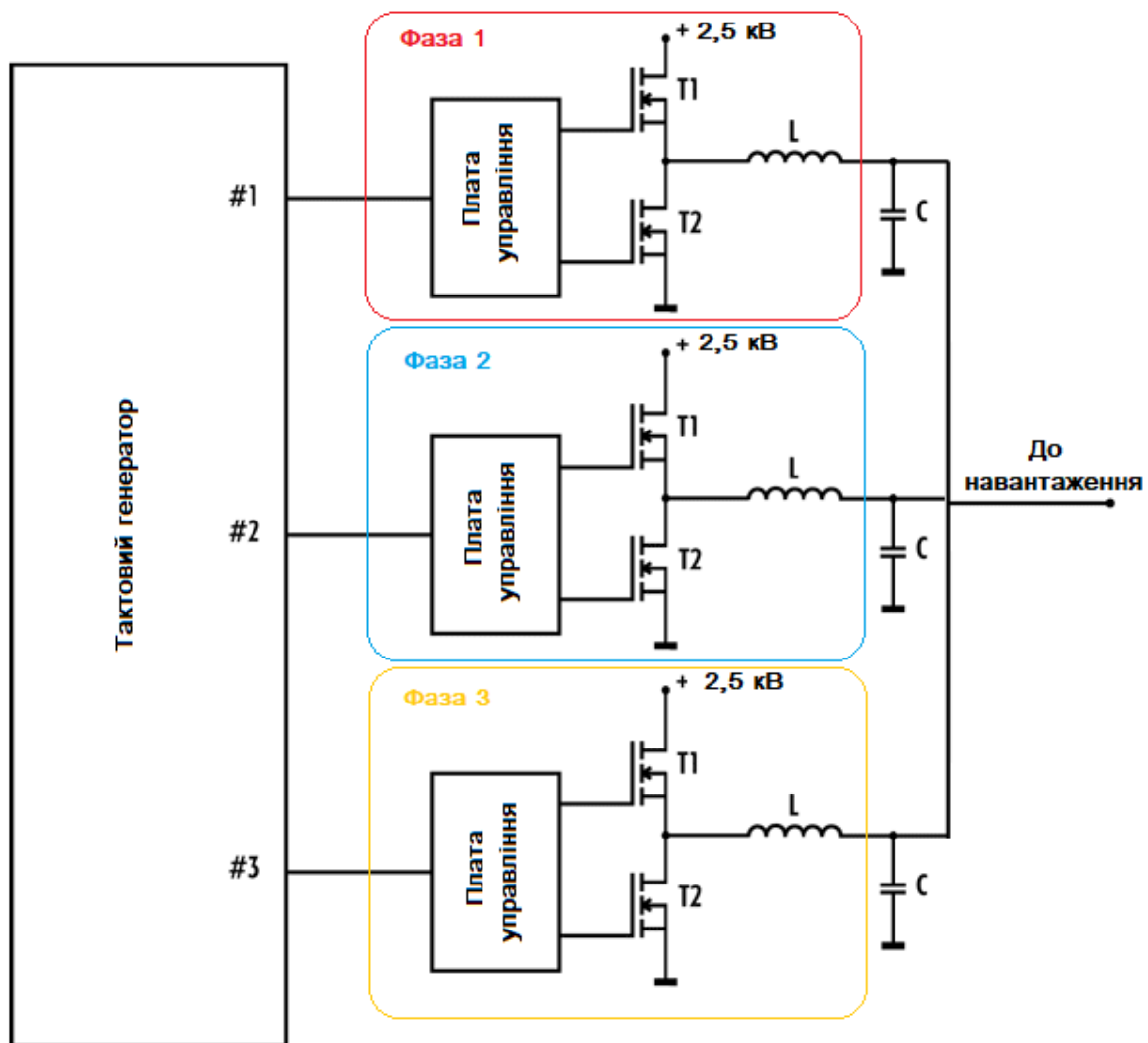


Рис. 1. Блок-схема силового багатофазного імпульсного перетворювача для БПЛА

до 28 А), то максимальний струм через процесор становитиме 52,5 А (піковий 84 А), чого цілком достатньо для більшості сучасних безпілотних літальних апаратів.

Загальний вигляд імпульсного перетворювача включає в себе три модулі, кожний модуль складається із плати зі згладжуючими керамічними конденсаторами, силової плати і плати управління.

Кожна фаза включається на одній і тій же частоті, але в різний час, що залежить від кількості силових каскадів. Наведеній схемі трифазного перетворювача потрібні три комутаційних сигнали, зміщені по фазі на 120° (0° , 120° , 240°) (рис. 2), що дає змогу реалізувати трифазну схему і тим самим згладити пульсації вихідного і вхідного струму перетворювача, а також пульсації відповідних напружень.

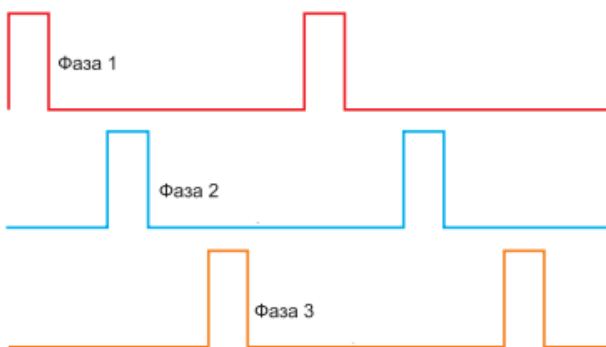


Рис. 2. Зсунуті по фазі тактові імпульси

У кожному каскаді багатofазного регулятора тече той же струм пульсації, що і в еквівалентній однофазній схемі за тих же умов експлуатації. Однак, оскільки каскади підключені до загального вихідного вузла, їх струми індуктивностей підсумовуються, вихідні конденсатори заряджаються і розряджаються в однаковий час. Ця робота в паралельному режимі дає змогу зменшити сумарний струм пульсації.

За послідовної реалізації таймер працює як генератор, що задає робочу частоту. На його виході генеруються імпульси напруги амплітудою 5 В з частотою повторення 400 кГц. Ці імпульси надходять на логічну мікросхему, виходи якої з'єднані за принципом лічильника Джонсона, який засновано на кільцевому з'єднанні D-тригерів, завдяки чому формуються три однакові послідовності імпульсів із частотою повторення 100 кГц, зсунуті по фазі на одну четверту періоду (2,5 мкс).

Залежність нормалізованого струму пульсації, який протікає через вихідний конденсатор, від числа каскадів схожа з графіком для вхідної

ємності на рис. 3 з точками нульової ємності. І в цьому разі нульові значення вихідної ємності на практиці не реалізуються.

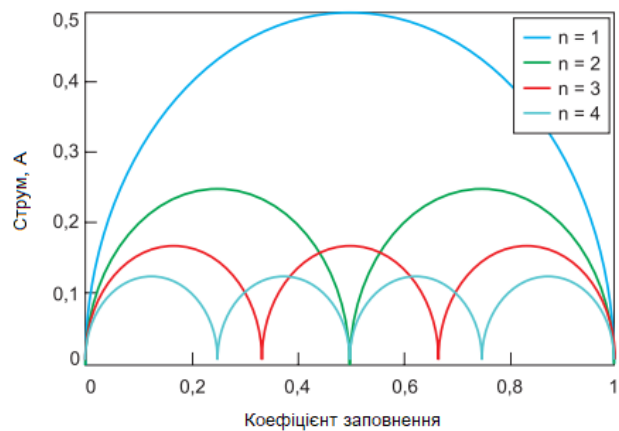


Рис. 3. Діаграма розподілу струму

Також у рамках загальної схеми розташований підсилювач помилки системи стабілізації напруги (рис. 4), виконаний на операційному підсилювачі, на вхід якого подається через дільник вихідна напруга потужного перетворювача й опорна напруга.

На рис. 4 як джерело опорної напруги показаний символічний стабілітрон VD1. Реально у схемі на базі безпілотних літальних апаратів використовується джерело опорної напруги на ширині забороненої зони. Вперше його застосував Р. Відлар в одному з перших стабілізаторів LM109. За рахунок негативного зворотного зв'язку, що утворюється подільником напруги R_1 , R_2 , вихідна напруга стабілізатора встановлюється рівною

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{он}} (1 + R_2 / R_1)$$

Інтегральний стабілізатор напруги має вбудовану систему обмеження вихідного струму. Для цього в схему включені резистор R_3 і транзистор VT_2 . Якщо падіння напруги на R_3 перевищить величину, рівну приблизно 0,6 В, транзистор VT_2 відкриється і запобіжить подальшому збільшенню базового струму транзистора VT_1 , тому величина вихідного струму стабілізатора обмежена рівнем

$$I_{\text{вих.макс}} = 0,6 \text{ В} / R_3.$$

При цьому потужність, що розсіюється на вихідному регулюючому транзисторі VT_1 , дорівнює

$$P_t = I_{\text{вих.макс}} (U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}).$$

У разі короткого замикання ця потужність значно перевищить граничну потужність для регулюючого транзистора, тому що при цьому вихідна напруга впаде від номінальної величини до нуля. Щоби знизити потужність, що розсіюється в

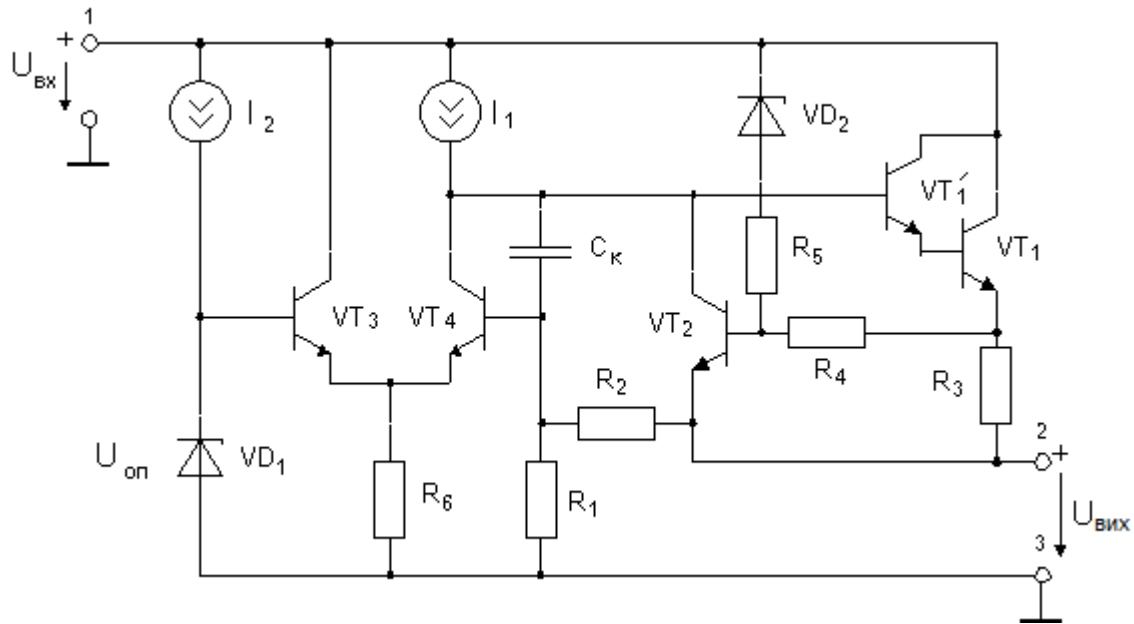


Рис. 4. Схема підсилювача помилки системи стабілізації напруги

цьому разі транзистором, одночасно зі зменшенням вихідної напруги потрібно зменшувати рівень обмеження струму. За такого способу обмеження струму зовнішня характеристика стабілізатора має нестійку ділянку.

Коефіцієнт передачі дільника визначається, виходячи із заданої максимальної напруги заряду акумулятора. На платі є також ланцюг, який точно встановлює максимальну напругу підсилювача помилки, яка може регулюватися завдяки наявності на платі змінного резистора. Таким чином, за допомогою регулювання опорної напруги встановлюється значення граничного робочого струму I_{set} .

На рис. 5 показано, як гаситься струм пульсацій у трифазному перетворювачі. Розмах сигналу сумарного струму I_{SUM} через вихідні конденсатори – менший, ніж у окремо взятого фазного струму. Завдяки меншим пульсаціям вдається дотримати вимоги специфікації до вихідної напруги пульсації за меншої вихідної ємності.

Необхідно відзначити, що коефіцієнт корисної дії силового багатофазного імпульсного перетворювача для безпілотного літального апарату з використанням багатофазної схеми включення трохи вищий, ніж для однофазного перетворювача, завдяки зменшенню пульсацій вихідної напруги і зниження втрат у згладжуючих конденсаторах.

Силовий багатофазний імпульсний перетворювач для безпілотного літального апарату розподіляє енергію між декількома індуктивностями і

декількома силовими ключами, в результаті чого на кожен каскад відводиться порівняно менше енергії. Таким чином, забезпечується більш ефективна робота кожного каскаду, що зменшує кількість компонентів і температуру плати.

Багатофазний контролер може змінювати кількість активних фаз, щоб максимально підвищити ефективність при різних навантаженнях. Оскільки споживання навантажувального струму зменшується, у контролера з'являється можливість вимикати фази, щоби зменшити комутаційні втрати і енергоспоживання під час управління затвором.

Отже, основна перевага багатофазних імпульсних регуляторів напруги живлення полягає в тому, що вони дозволяють, по-перше, подолати обмеження по струму, а по-друге, знизити пульсації вихідної напруги за тієї ж ємності й індуктивності фільтра, що згладжує.

Висновки. У роботі досліджено силовий багатофазний імпульсний перетворювач для безпілотного літального апарату. Впровадження зазначеного перетворювача на базі сучасних БПЛА приведе до більш високої ефективності на всьому діапазоні зміни параметрів, меншої вихідної напруги пульсацій і найкращої характеристики перехідного процесу.

За рахунок удосконалення елементної бази імпульсного перетворювача збільшується частота перетворення електричної енергії, зменшуються масогабаритні показники пристроїв і систем електроживлення на базі БПЛА і значно підвищується їх питома потужність.

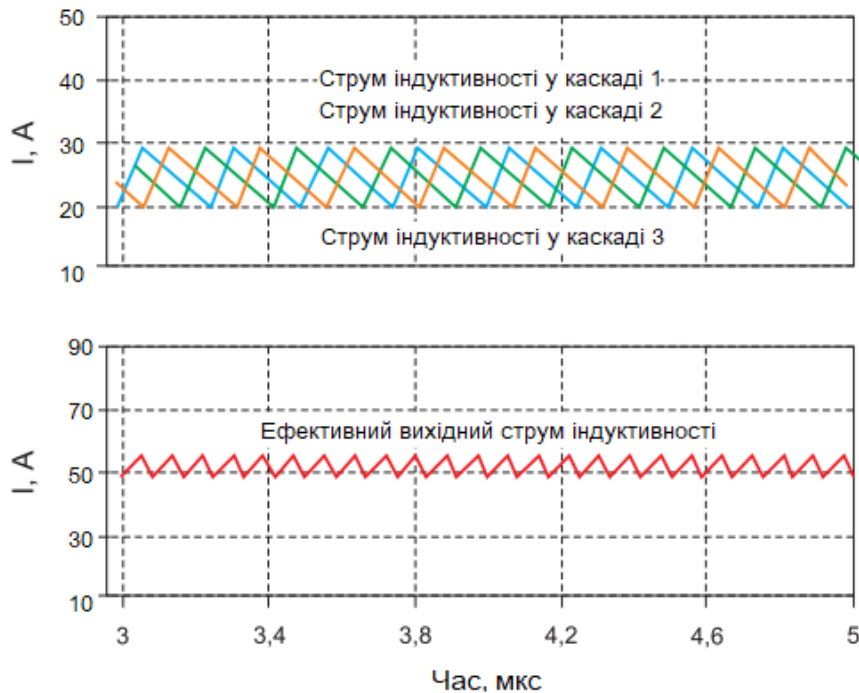


Рис. 5. Струм по кожній фазі і результуючий струм навантаження в трифазному регуляторі напруги

Список літератури:

1. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик / В.М. Ильющко, М.М. Митрахович, А.В. Самков, В.И. Силков, О.В. Соловьев, В.И. Стрельников; Под общ. ред. В.И. Силкова. Киев: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. 302 с.
2. Гусевський Ю.І., Лутай С.М., Мастепан А.Г., Пашинська Ю.В. Дворівневий інвертор з покращеною формою вихідної напруги / Ю.І. Гусевський. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 153. С. 12–20.
3. Єршов Р.Д., Войтенко В.П. Частотно-імпульсний модулятор з адаптивною корекцією тривалості імпульсу. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 177–190.
4. Даник Ю.Г., Манько О.В., Павлюк В.В. Алгоритм виявлення радіосигналів систем дистанційного керування безпілотними літальними апаратами. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2013. Вип. 7. С. 5–13.
5. Кочерга О.І. Підвищення ефективності лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів за рахунок мультиякірних конфігурацій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.01; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2020. 24 с.
6. Jimenez-Fernandez A., Jimenez-Moreno G., Linares-Barranco A., Dominguez-Morales M.J., Paz-Vicente R., Civit-Balcells A.A. Building blocks for spikes signals processing. *Proc. International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2018)*. 2010. P. 1–8.
7. Denisov Yu., Gorodniy O., Gordienko V., Vershniak L., Dymereys A. Estimation of parameters and characteristics of power factor corrector based on pulsed and quasi-resonant converters. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No. 6. P. 38–41.
8. Gorodny A.N., Dymereys A.V. Transistor Switches Quasi-Control in Quasi-Resonant Pulse Converters. *Proc. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO'2019)*, IEEE, April 2019. P. 789–792.
9. Sampath P., Vikas C. High speed phase frequency detector. United States Patent 2011. No. 7 940 088.
10. Chen W.H., Inerowicz M.E., Jung B. Phase frequency detector with minimal blind zone for fast frequency acquisition. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. IEEE, 2010. Vol. 57(12). P. 936–940.
11. Zhang C., Syrzycki M. Modifications of a dynamic-logic phase frequency detector for extended detection range. *Proc. 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, IEEE, August 2010. P. 105–108.
12. Pogliano U., Serazio D., Trinchera B. Wideband phase comparator for high current shunts. *Proc. CPEM 2010*, IEEE, June 2010. P. 135–136.

Ozerchuk I.M. PROSPECTS FOR THE USE OF POWER MULTIPHASE PULSE CONVERTER BASED ON UAVS

The principles of construction of a power multiphase pulse converter for an unmanned aerial vehicle are investigated. Mechanisms for matching the parameters of primary power sources with load parameters (ie, electricity consumers – unmanned aerial vehicles) by type of electricity, its quality and nominal value are provided by converters and regulators of electricity, which are part of modern power supply and power supply. It is emphasized that for modern unmanned aerial vehicles the weight and dimensions of the power supply system play a fundamental role, which leads to special requirements for the creation of electricity converters based on unmanned aerial vehicles, in addition to high reliability, efficiency, given power quality, degree of miniaturization. It is emphasized that the resolution of the specified contradiction between mass-size and energy indicators of pulse converters of electric energy of modular structure is reached by transition to the multiphase principle of conversion of electric energy. Multiphase pulse converters, implementing this principle, provide the ability to reduce the volume and weight of power smoothing filters without increasing the conversion frequency. A block diagram of a power multiphase pulse converter for an unmanned aerial vehicle with a three-phase voltage regulator is proposed. It is substantiated that the use of 3-phase regulator of supply voltage allows to distribute current on all phases, and therefore, the current flowing on each phase will be 3 times less than load current. The graph of current distribution on each phase and the resulting load current in the three-phase voltage regulator from which it is visible how the current of pulsations in the three-phase converter is extinguished is resulted. It is noted that the main advantage of multiphase pulse regulators of supply voltage is that they reduce the ripple of the output voltage at the same capacitance and inductance of the smoothing filter.

Key words: *power multiphase pulse converter, unmanned aerial vehicle, voltage, electrical energy, pulse.*