

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОНАПРЯМЛЕНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ УНІФІКОВАНОГО ІНВЕРТОРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

А.Ф. Жаркін\*, чл.-кор. НАН України, А.Г. Пазєєв\*\*, канд.техн.наук, В.О. Новський\*\*\*, докт.техн.наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: [pazeev@ied.org.ua](mailto:pazeev@ied.org.ua)

*Наведено результати імітаційного моделювання роботи двонапрявленого перетворювача постійної напруги, що входить до складу уніфікованого інверторного модуля багатомодульної системи накопичення електроенергії та досліджено вплив основних параметрів і режимів роботи перетворювача на значення струмів його силових елементів. Отримано максимальні значення струмів і напруг у перетворювачі потужністю 300 кВт, що дає змогу здійснити обґрунтований вибір силових перемикаючих елементів, а також вибір параметрів і проведення інженерних розрахунків силових реактивних елементів та системи керування. Бібл. 7, рис. 5.*

**Ключові слова:** системи накопичення електроенергії, двонапрявлений перетворювач постійної напруги, двонапрявлений інверторний модуль, IGBT-модуль.

**Актуальність.** Перспективні системи електропостачання (СЕП) за загальними принципами побудови докорінно відрізняються від традиційних, оскільки, у першу чергу, є розподіленими асинхронними системами з двонапрявленими потоками електроенергії. Структура перспективних СЕП у першу чергу визначатиметься типом наявних джерел енергії, але в будь-якому випадку важливою їх частиною будуть системи, що здатні реалізувати технології ефективного використання накопиченої електроенергії (концепція «ESS» – «Energy Storage System»), тобто системи накопичення електроенергії (СНЕ). До суттєвих переваг СНЕ належать функціональна гнучкість, можливість автоматизації процесів управління і контролю і, як наслідок, широка інтеграція в системи інтелектуальних електричних мереж («Smart grid») [1, 2].

Необхідна потужність перетворювачів для СНЕ коливається в широкому діапазоні – від десятків кіловатт до декількох десятків мегаватт. Зазначимо, що при розробці потужних перетворювачів завжди існує протиріччя між необхідними (визначеними з технічного завдання) та економічно обґрунтованими значеннями струмів і напруг силових ключових елементів, що обираються для застосування в конкретних схемах. Одним з шляхів вирішення такого протиріччя є створення перетворювачів за багатомодульною структурою [3]. У ІЕД НАН України проводяться роботи, пов'язані з розробкою уніфікованого інверторного модуля багатифункціонального перетворювача потужністю 300 кВт (УІМ-300) для використання в багатомодульних СНЕ значної потужності з різними типами джерел електроенергії. УІМ-300 складається з двох двонапрявлених перетворювачів: двонапрявленого підвищувально-понижувального перетворювача постійної напруги (bi-directional DC-DC converter) і двонапрявленого трифазного інвертора, які включено послідовно через проміжну мережу постійної стабілізованої напруги, що дає змогу змінювати напрямок передачі електроенергії залежно від стану СЕП: або від накопичувача електроенергії (НЕЕ) до трифазної мережі, або, навпаки, – від мережі до НЕЕ. Вирішення проблем паралельної роботи багатьох перетворювачів на одне навантаження потребує проведення досліджень, спрямованих на запобігання як небажаним перетокам потужності між елементами системи, так і забезпечення безаварійної роботи в статичних та динамічних режимах [4]. Останнє забезпечується в тому числі обґрунтованим вибором типу силових перемикаючих елементів.

**Метою роботи** є визначення залежності максимальних значень та розмаху пульсацій струмів у силових елементах двонапрявленого перетворювача постійної напруги від зміни його параметрів, що дозволить здійснити обґрунтований вибір типу силових перемикаючих елементів уніфікованого інверторного модуля.

**Виклад основного матеріалу.** Двонапрявлений підвищувально-знижувальний перетворювач постійної напруги (ДППН), що побудований на основі потужних IGBT-модулів, виконує функцію двонапрявленого регулятора напруги і струму [3, 5]. У першому режимі при передачі електроенергії від НЕЕ до трифазної мережі перетворювач працює як підвищувальний стабілізатор постійної напруги, а в другому режимі при передачі енергії до НЕЕ – як знижувальний регулятор (стабілізатор) постійного струму для забезпечення необхідних характеристик заряду НЕЕ. Дослідження проводилися шляхом розрахунків робочих режимів перетворювача у пакеті схемотехнічного моделювання Micro-Cap 9 на розробленій імітаційній моделі, структурну схему якої показано на рис. 1. Використовувалася система керування силовими ключами СК1, що побудована на основі пропорційно-інтегрального регулятора та імпульсного модулятора з ШІМ. У результаті розрахунків електромагнітних процесів було отримано максимальні та середні значення, а також розмах пульсацій струмів

© Жаркін А.Ф., Пазєєв А.Г., Новський В.О., 2018

ORCID ID: \* <http://orcid.org/0000-0001-5996-0901>, \*\* <http://orcid.org/0000-0003-1944-4114>,

\*\*\* <http://orcid.org/0000-0003-3857-7027>

силових елементів перетворювача при варіації значень індуктивності силового дроселя та частоти перемикання силових транзисторів.

У першому режимі верхній транзистор S1 напівмоста є закритим, а перемикач Switch1 – включеним на резистор R<sub>p</sub>, який імітує навантаження. Вхідною напругою перетворювача (U<sub>p1</sub>) є напруга НЕЕ, а вихідною

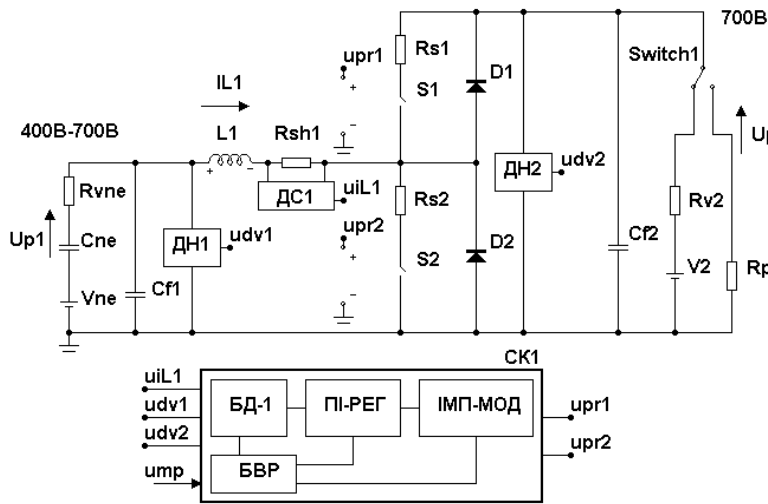


Рис. 1

(U<sub>p2</sub>) – напруга проміжної мережі, тобто буферного конденсатора C<sub>f2</sub>. Розрахунки проводилися для значень номінальної вихідної потужності 300 кВт, рівня постійної стабілізованої напруги проміжної мережі 700 В при варіації значень напруги НЕЕ у діапазоні 400–600 В, індуктивності дроселя L1 у діапазоні 150–500 мкГн та частоти імпульсної модуляції у межах 15 ... 20 кГц.

Як приклад, на рис. 2 наведено результати одного з варіантів розрахунків роботи ДППН для інтервалу часу від включення перетворювача до виходу на сталий режим при значеннях індуктивності дроселя L1 300 мкГн та частоти ШІМ 20 кГц. Вхідна напруга перетворювача U<sub>p1</sub> дорівнювала 600, 500 та 400 В, що відповідає номерам 1, 2 та 3 на графіках. На рисунку також позначено: V(U<sub>in</sub>) – вхідна напруга, V(U<sub>out</sub>) – вихідна напруга, I(L1) – струм дроселя IL1. З

рисунка видно, що вихід на сталий режим супроводжується перевищенням струму дроселя та вихідною напругою номінальних значень. Таке перерегулювання вочевидь пояснюється інерційністю вихідного ланцюга перетворювача та системи зворотного зв'язку. У наведеному прикладі перерегулювання за напругою становить 5,8 %, при максимальних значеннях струму в дроселі в перехідному та сталому режимах відповідно 824,1 та 777,6 А і значенні розмаху пульсацій струму дроселя ΔIL1 28,7 А (при U<sub>p1</sub>=400 В). У найгіршому випадку перерегулювання за напругою складало 6,2 % (при U<sub>p1</sub>=600 В та L1=500 мкГн). Загалом максимальні значення вказаних струмів спостерігалися при мінімальній індуктивності дроселя і значенні вхідної напруги 400 В та становили відповідно 830,2, 773,6 А при частоті ШІМ у 20 кГц і 840,2, 805,5 А при частоті 15 кГц.

Графіки, що відображають залежність розмаху пульсацій струму дроселя ΔIL1 у сталому режимі від значень індуктивності дроселя для різних значень вхідної напруги при частоті 20 кГц, показано на рис. 3. Пульсації струму дроселя обернено пропорційні індуктивності дроселя, частоті імпульсної модуляції та значенням вхідної напруги. Наприклад, при розрахунках отримано максимальні значення ΔIL1 у 57,8 А при частоті 20 кГц та 76,14 А при частоті 15 кГц для індуктивності дроселя, що становила 150 мкГн та значенні U<sub>p2</sub>=400 В.

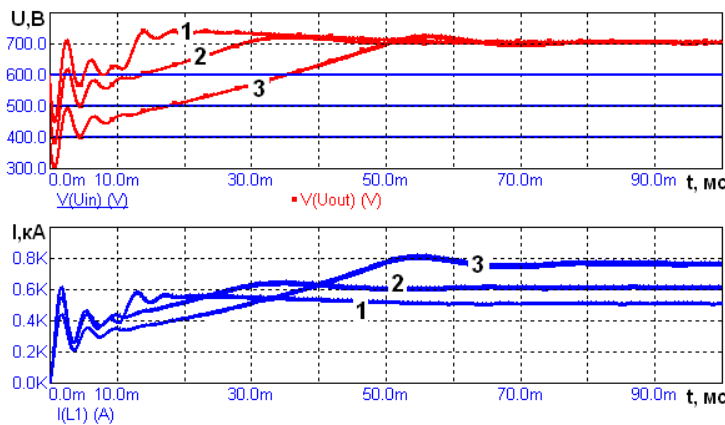


Рис. 2

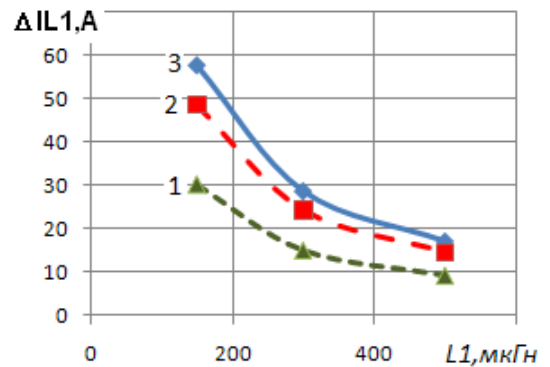


Рис. 3

Для максимальних значень струму дроселя в сталому режимі, які очевидно мають місце при мінімальних значеннях вхідної напруги, отримано значення струму 802,5 А (середнє значення 773,6 А) при 20 кГц та 805,9 А (середнє значення 767,8 А) при 15 кГц. Як видно з наведеного прикладу, для різних частот у сталому режимі як середні значення струмів, так і їхні максимальні значення відрізняються приблизно на 0,5 % при відмінності значень розмаху пульсацій струму в 1,3 разу.

У другому з вказаних вище режимів роботи модуля УІМ-300 ДППН працює в режимі знижувального перетворювача напруги зі стабілізованим на рівні зарядного струму НЕЕ вихідним струмом та обмеженням

значення вихідної напруги на рівні максимально допустимої напруги заряду накопичувача електроенергії. Відповідно до ідеології роботи УІМ-300 в режимі передачі енергії до НЕЕ для ДППН вхідною напругою є напруга  $U_{p2}$  – постійна напруга проміжної мережі, стабілізована на рівні 700 В двонапрямленим трифазним інвертором, який працює в режимі активного коректора коефіцієнта вхідної потужності [6, 7], а вихідною напругою є  $U_{p1}$  – напруга НЕЕ (рис. 1). Нижній транзистор напівмоста S2 є закритим протягом всього режиму роботи, а перемикач Switch1 є включеним на ланцюг з V2 та Rv2, що імітує джерело живлення. При використанні як НЕЕ, наприклад, батарей акумуляторів найбільш розповсюдженого в енергетиці свинцево-кислотного типу максимальна напруга при заряді не повинна перевищувати 15-18% від номінального значення. У такому випадку при номінальній напрузі НЕЕ 400 В максимальна напруга заряду має становити 460 В, що при значеннях струму у 600 А забезпечить передачу потужності, яка приблизно дорівнює 300 кВт (276 кВт). Накопичувач електроенергії моделювався як послідовно з'єднані джерело постійної напруги  $V_{ne}$ , конденсатор значної ємності  $C_{ne}$  та резистор  $R_{ne}$ . Розрахунки роботи знижувального перетворювача проводилися для значень вихідної напруги 400–460 В, номінального вихідного струму 600 А при варіації індуктивності силового дроселя L1 у діапазоні 100–500 мкГн та частоти перемикачів силових елементів, що становила 15–20 кГц. Наприклад, на рис. 4 наведено результати розрахунків значень вихідної напруги  $U_{p1}$  ( $v(U_{OUT})$ ) та струму дроселя  $I(L1)$  для значень індуктивності дроселя L1 100 мкГн та частоти 20 кГц. На рис. 5 наведено залежність розмаху пульсацій струму дроселя  $\Delta I_{L1}$  від значень індуктивності його для різних значень частоти імпульсної модуляції.

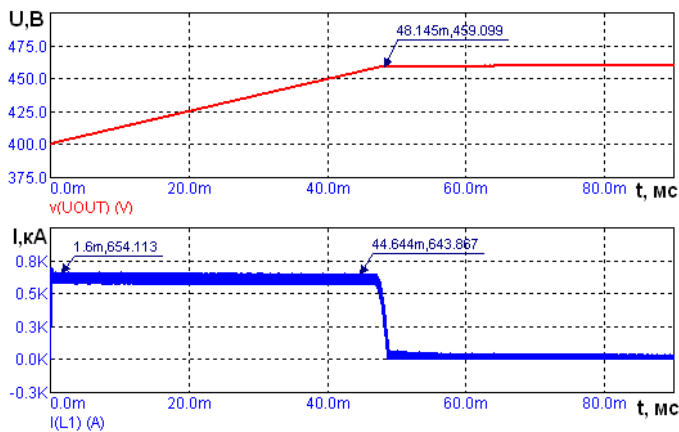


Рис. 4

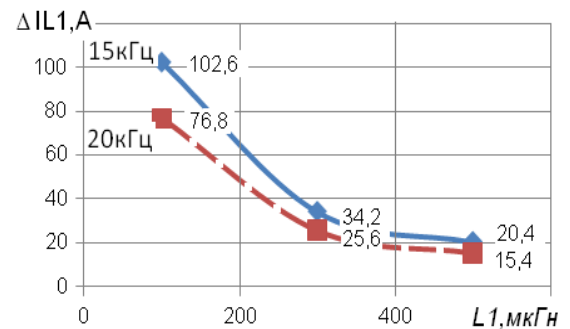


Рис. 5

Аналіз отриманих результатів показав, що максимальні значення розмаху пульсацій струму дроселя становили 76,8 А при частоті 20 кГц та 102,6 А при частоті 15 кГц при мінімальному значенні індуктивності дроселя L1. Максимальні значення струму дроселя на момент часу, що незначно випереджає момент початку обмеження вихідної напруги на рівні 460 В, становили 645,1 А при частоті 20 кГц та 657,3 А при частоті 15 кГц, а середні значення струму дроселя – відповідно 606,7 та 606 А. На початку режиму заряду, при мінімальній напрузі на НЕЕ, максимальні значення струму дроселя при частотах імпульсної модуляції 20 та 15 кГц становили відповідно 654,1 та 673,8 А. Як і в першому режимі, значення розмаху пульсацій струму дроселя обернено пропорційні індуктивності дроселя, частоті імпульсної модуляції та значенням напруги НЕЕ. В той же час максимальні значення струмів у перетворювачі є меншими, ніж у першому режимі, оскільки згідно з принципом роботи ДППН значення вихідного струму є регульованим параметром.

За допомогою розроблених моделей та отриманих результатів можна здійснити обґрунтований вибір типу силових напівпровідникових модулів та силових конденсаторів, провести розрахунки силових дроселів та системи охолодження, що дає змогу не тільки зекономити кошти і час при проведенні експериментальних досліджень, але і забезпечити оптимальні цінові показники пристроїв у цілому.

**Висновки.** Встановлено, що з двох можливих режимів роботи двонапрявленого перетворювача постійної напруги найбільш навантаженим за струмом та напругою силових транзисторів є режим передачі енергії від накопичувача електроенергії до трифазної мережі. Оскільки для потужних перетворювачів основним критерієм вибору силових напівпровідникових IGBT-модулів є забезпечення прийнятних теплових режимів модулів, що найбільшою мірою залежить від струму, відповідні розрахунки необхідно проводити саме для зазначеного режиму.

Визначено, що при зміні індуктивності силового дроселя в діапазоні 100–500 мкГн для різних частот імпульсної модуляції як середні значення струмів, так і їхні максимальні значення відрізняються приблизно на 0,5 % при відмінності значень розмаху пульсацій струму в 1,3 разу. Оскільки на втрати в силових напівпровідникових та реактивних елементах мають вплив як середні значення струмів, так і рівень їхніх високо-частотних пульсацій, які при інших рівних параметрах залежать лише від значень індуктивності дроселя, необхідно обов'язково обирати параметри дроселя з огляду на мінімізацію пульсацій струму.

Отримано максимальні значення струмів і напруг у перетворювачі потужністю 300 кВт, що дає змогу здійснити обґрунтований вибір силових напівпровідникових модулів, параметрів системи керування, а також вибір параметрів і проведення інженерних розрахунків силових дроселів та системи охолодження двонапрявленого перетворювача.

1. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях. *Ползуновский вестник*. 2013. № 4-2. С. 176–181.
2. Яркие перспективы. *Журнал АББ. Энергия разума*. 2017. № 1. С. 4–17. Режим доступа: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider55/Пресса-о-нас/абб-энергия-разума-01-2017.pdf?sfvrsn=2>
3. Naayagi R.T., Forsyth A.J. and Shuttleworth R. High-Power Bidirectional DC–DC Converter for Aerospace Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27. No 11. Pp. 4366-4379. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2184771
4. Мартынов В.В., Руденко Ю.В. Специализированные системы электропитания для электротехнологического оборудования. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 101–102.
5. Zhang J., Lai J.-S., Kim R.-Y. and Yu W. High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional DC–DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007. Vol. 22. Issue 4. Pp. 1145–1153.
6. Жаркин А.Ф., Пазеев А.Г., Новский В.А., Малахатка Д.А. Качество выходного напряжения трехфазных активных корректоров коэффициента мощности. *Вісник НТУ «ХПИ». Зб. наук. праць*. 2017. № 27 (1249). С. 354–359.
7. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Пазеев А.Г. Безперервні наближені моделі перетворювачів змінної напруги в постійну з активною корекцією коефіцієнта потужності. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 6. С. 11–17.

УДК 624.314

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ УНИФИЦИРОВАННОГО ИНВЕРТОРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

**А.Ф. Жаркин**, чл.-корр. НАН Украины, **А.Г. Пазеев**, канд.техн.наук, **В.А. Новский**, докт.техн.наук  
**Институт электродинамики НАН Украины,**  
**пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.** E-mail: [pazeev@ied.org.ua](mailto:pazeev@ied.org.ua)

Приведены результаты имитационного моделирования работы двунаправленного преобразователя постоянного напряжения, который входит в состав унифицированного инверторного модуля многомодульной системы накопления электроэнергии, а также исследовано влияние основных параметров и режимов работы преобразователя на значения токов силовых элементов. Получены максимальные значения токов и напряжений в преобразователе мощностью 300 кВт, что позволяет осуществить обоснованный выбор силовых переключающих элементов, а также выбор параметров и проведение инженерных расчетов силовых реактивных элементов и системы управления. Библ. 7, рис. 5.

**Ключевые слова:** системы накопления электроэнергии, двунаправленный преобразователь постоянного напряжения, двунаправленный инверторный модуль, IGBT-модуль.

#### RESEARCH OF A BI-DIRECTIONAL DC-DC CONVERTER OF UNIFIED INVERTER MODULE FOR APPLICATION IN ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS

**A.F. Zharkin**, A.G. Pазееv, V.A. Novskiy  
**Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,**  
**Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.** E-mail: [pazeev@ied.org.ua](mailto:pazeev@ied.org.ua)

The results of the simulation modeling of a bidirectional dc-dc converter, which is part of the unified inverter module of multimodal systems of accumulation of electric power utilization, are presented, and the influence of the basic parameters and operating modes of the converter on the value of the currents of the power elements is investigated. The maximum values of currents and voltages in a 300 kW power converter are obtained, which provides the possibility of a reasonable choice of power switching elements, engineering calculations and the choice of power reactive elements and control system parameters. Preferences 7, figures 5.

**Key words:** systems for the accumulation of electricity, bi-directional dc-dc converter, bi-directional inverter module, IGBT- module.

1. Smolentsev N.I. Power storage in local electrical networks. *Polzunovskiy vestnik*. 2013. No 4-2. Pp. 176–181. (Rus)
2. Bright prospects. *ABB Magazine. Energy of the mind*. 2017. No 1. Pp. 4–17. Available at: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider55/Пресса-о-нас/абб-энергия-разума-01-2017.pdf?sfvrsn=2>. (Rus)
3. Naayagi R.T., Forsyth A.J. and Shuttleworth R. High-Power Bidirectional DC–DC Converter for Aerospace Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27. No 11. Pp. 4366-4379. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2184771
4. Martynov V.V., Rudenko Yu.V. Specialized power supply systems for electro-technological equipment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 101–102. (Rus)
5. Zhang J., Lai J.-S., Kim R.-Y. and Yu W. High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional DC–DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007. Vol. 22. Issue 4. Pp. 1145–1153.
6. Zharkin A.F., Pазееv A.H., Novskiy V.O., Malakhata D.O. The quality of the output voltage three-phase active power factor correction. *Vіsnyk NTU KHPI. Zbirnyk naukovykh prats*. 2017. No 27 (1249). Pp. 354–359. (Rus)
7. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Pазееv A.H. Continuous approximate model of AC/DC converters with active power factor correction. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2011. No 6. Pp. 11–17. (Ukr)

Надійшла 05.03.2018  
Остаточний варіант 21.03.2018