

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ З НАЙКРАЩИМИ ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ ЕНЕРГІЇ

Лисиченко Р. М.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Обґрунтовано вибір схемної реалізації автономного інвертора напруги для підвищення якості вихідної електричної енергії, що передбачає визначення режимів функціонування інверторів, в яких використання конкретної реалізації інвертора є оптимальною за габаритними і вартісними показниками. Доведено, що спектр вихідної напруги багаторівневого ШІМ-інвертора складається з гармонійних груп, центри яких розташовані на частотах, пропорційних добутку частоти комутації на кількість рівнів інвертора. Визначено області допустимої роботи ШІМ, АІМ і МШІМ інверторів і показано вплив струму інвертора і частоти комутації на межі цих областей.

Постановка проблеми. Енергоефективність та енергозбереження, будучи пріоритетними напрямками розвитку науки, технологій і техніки, були включені до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року, що підкреслює важливість цього напрямку для модернізації і технологічного розвитку української економіки, підвищення її конкурентоспроможності. Сучасні процеси виробництва, передачі та споживання електричної енергії, без яких неможлива сучасна економіка, вимагають багаторазового її перетворення, для якого використовуються потужні напівпровідникові інвертори, від ефективності та надійності функціонування яких залежить ефективність і надійність функціонування всіх споживачів електроенергії.

Найбільш важливим етапом проектування інвертора є вибір топології і методу модуляції, які забезпечать найкращі техніко-економічні показники проектного пристрою. Наявність критеріїв і процедур вибору на даному етапі знижує ймовірність помилок і скорочує час проектування напівпровідникового приладу. Таким чином, завдання забезпечення обґрунтованості проектних рішень і формування критеріїв вибору є актуальною. До теперішнього моменту в області силової електроніки накопичений великий обсяг матеріалів, присвячених питанням розробки нових і поліпшення існуючих схемних рішень з метою підвищення ефективності застосування автономних інверторів напруги. У той же час питання порівняння принципово різних схем і алгоритмів модуляції залишається відкритим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До теперішнього моменту розроблено велику кількість технічної реалізації автономних інверторів напруги, а також використовуваних в них алгоритмів комутації силових ключів - алгоритмів модуляції. Однак в літературі відсутні методика і результати порівняння інверторів різних топологій. Складність такого завдання обумовлена поганою формулізацією, тому в даний час при проектуванні інвертора використовують експертний метод, що може привести до потенційних помилок [1].

При проектуванні інвертора основними критеріями є якість напруги, що генерується, цінові та габаритні показники. Незважаючи на те, що ДСТУ 3466-96 "Якість електричної енергії. Терміни та визначення"

та міжнародні стандарти встановили цілий ряд критеріїв якості електроенергії, основним при проектуванні джерела вторинного живлення є спектральний критерій - сумарний коефіцієнт гармонійних складових напруги і струму. З метою поліпшення гармонійного складу напруги, що генерується в автономних інверторах напруги змінюють або силову схему, або алгоритм модуляції, або і те й інше одночасно.

Найпростішим і найпоширенішим алгоритмом модуляції є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), яка може бути застосована до мостового інвертору. У свою чергу, ШІМ можна класифікувати за цілою низкою ознак: за формою опорного сигналу, по моменту комутації, за кількістю імпульсів за період опорного сигналу. Численні дослідження, представлені в літературі, доводять, що найкращий гармонійний склад дають синусоїдальна двостороння множинна ШІМ і ШІМ з предмодуляцією третьої гармонікою опорного сигналу [2].

Перевагами ШІМ є простота силової схеми і алгоритму модуляції, а основним недоліком - наявність вищих гармонік в спектрі напруги, що генерується. При цьому підвищення частоти несучого сигналу призводить не до виключення гармонійних складових з спектра вихідної напруги, а до їх переміщення в область більш високих частот. Оскільки ДСТУ регламентує значення сумарного коефіцієнта гармонійних складових, при розрахунку якого враховувалися тільки гармоніки з підрядом менше 40, то підвищення частоти комутації створює видимість поліпшення гармонійного складу. При цьому значення повного коефіцієнта гармонік є неприпустимим для харчування більшості споживачів. Наявність вищих гармонік в спектрі напруги живлення призводить до прискореного зносу ізоляції, порушень харчування споживачів, що призводить до відповідного економічного збитком. З метою виключення вищих гармонік з спектра в ШІМ інверторах застосовуються вихідні фільтри низьких частот. Застосування фільтрів дозволяє захистити навантаження і отримати напруга з низьким вмістом гармонік, але при цьому підвищує вартість і габаритні показники інвертора [3]. Уникнути використання фільтра дозволяє застосування ступінчастої (або амплітудної) модуляції, при якій форма напруги є ступінчастою кривою близькою до синусоїди. При наявності 7 ступень на чверті періоду і правильно пі-

добраних кутах комутації ключів можна домогтися сумарного коефіцієнта гармонік менше 7% з урахуванням всіх складових спектру. Очевидним недоліком амплітудної модуляції є ускладнення схеми в порівнянні з ШІМ інвертором і збільшення кількості силових ключів, а значить і габаритних показників схеми, зі збільшенням кількості рівнів вихідної напруги. Цей недолік довгий час був принциповим - через високу вартість силових ключів використання ступінчастою модуляції було нерентабельним. Однак із здешевленням елементної бази розроблені раніше алгоритми амплітудної модуляції знову стали затребувані [4].

Багаторівнева широтно-імпульсна модуляція поєднує два розглянутих вище алгоритму. Вихідна напруга таких інверторів формується шляхом підсумовування ШІМ сигналів на декількох рівнях інвертора і являє собою ступінчастий сигнал, на кожному рівні якого додатково є ШІМ сигнал. В даний час відомі три топології багаторівневих інверторів з ШІМ: каскадний бруківка схема, схема з плаваючими конденсаторами і схема з фіксують діодами. Проведені дослідження показують, що каскадна бруківка схема має найменшими вартістю і габаритними показниками, крім того, вона легко масштабується, що зумовлює її широке поширення.

Мета статті. Обґрунтування та вибір оптимального варіанту ШІМ інверторів для підвищення якості електроенергії на сучасному етапі розвитку ефективності і надійності функціонування всіх споживачів електроенергії.

Основні матеріали дослідження. Для реалізації алгоритму розрахунку в середовищі MATLAB/Simulink була розроблена імітаційна модель, яка визначає потужність втрат і температуру переходу в залежності від параметрів модуля і навантаження. Проведені з її допомогою дослідження дозволяють зробити висновок, що при використанні ШІМ на частотах комутації до 5 кГц динамічні втрати значно менше статичних, для охолодження модуля досить невеликих охолоджувачів масою до 2,5 кг з природним обдувом. При великих частотах значно зростають динамічні втрати, що призводить до зростання температури переходу і необхідної інтенсивності охолодження. Для вирішення проблеми необхідно застосовувати або інший тип охолоджувача, або більш потужний тип модуля (рис. 1, 2).

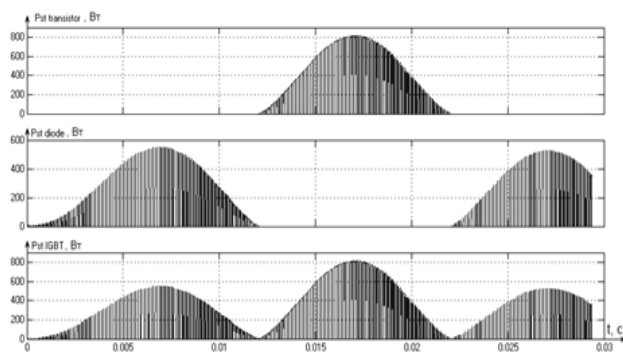


Рисунок 1 – Статичні втрати транзистора, діода і IGBT-модуля в ШІМ інверторі при частоті комутації 10 кГц

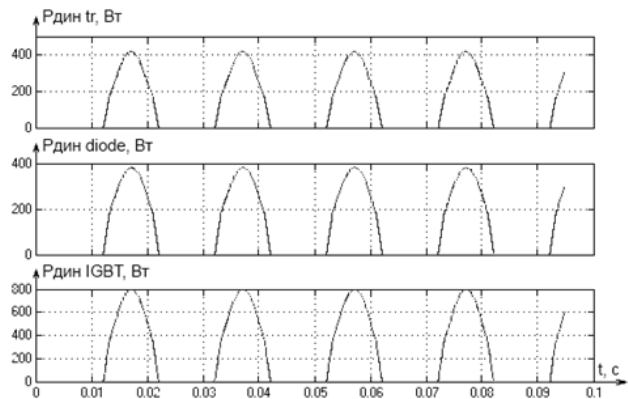


Рисунок 2 – Динамічні втрати транзистора, діода і IGBT-модуля в ШІМ інверторі при частоті комутації 10 кГц

Спектр ШІМ сигналу містить нескінченне число гармонійних складових, що вимагає установки вихідного фільтра низьких частот. Найбільш поширеним типом фільтрів, що застосовуються в автономних інверторів напруги (АІН), є LC фільтри. Як відомо, значення індуктивності і ємності такого фільтра пов'язані між собою і з параметрами навантаження, тому що хвильовий опір фільтра має відповідати хвильовому опору навантаження. При збільшенні індуктивності фільтра зменшується діюче значення вихідної напруги і одночасно зменшується вміст в ньому гармонійних складових. Проведені дослідження показують, що параметри фільтра сильно впливають на потужність втрат і температуру переходу модуля. Зокрема, для кожної конкретної навантаження існує вузька область оптимальних параметрів фільтра, що забезпечують мінімум потужності втрат. При збільшенні або зменшенні індуктивності фільтра потужність втрат і температура переходу ростуть, що вимагає встановлення більш потужних модулів або збільшення інтенсивності охолодження інвертора [2].

В результаті моделювання встановлено, що для аналізу впливу частоти комутації на сумарну потужність втрат в інверторі даної топології досить даних про одне IGBT модулі комутатора. Потужність втрат інших модулів виявляється практично рівною, за рахунок того, що збільшення статичної складової потужності втрат, викликане збільшенням амплітуди прикладається напруги, компенсується зниженням частоти комутації і, отже, потужності динамічних втрат.

Дослідження залежності вартості інвертора від частоти комутації при різних параметрах охолодження дозволяє зробити висновок, що для вирішення завдання харчування більш потужного споживача вигідніше підвищити інтенсивність системи охолодження, ніж встановлювати більш потужні силові модулі. Ця залежність залишається вірною для випадків природного охолодження модулів. Якщо можливостей природного охолодження виявляється недостатньо, то потрібна установка примусового охолодження, що вимагає додаткових витрат на цю систему. Таким чином, установка більш потужного модуля є кращою тільки в тих випадках, коли це дозволяє уникнути установки системи примусового охолодження, або при жорстких вимогах до габаритними показниками

схеми.

Двома основними характеристиками, що впливають на гармонійний склад напруги, що генерується багаторівневими ШІМ інверторами, є число модулів інвертора M (при розгляді топології каскадного мостового інвертора - число послідовно з'єднаних мостових схем) і відношення частоти несучого сигналу до частоти модулюючого K_f . При цьому підвищення частоти несучого сигналу призводить лише до зміщення гармонік в область високих частот, а збільшення числа модулів призводить до зменшення їх амплітуд, що найбільш прийнятний. Спектр вихідної напруги багаторівневого ШІМ інвертора являє собою набір гармонійних груп по 5-9 гармонік, центри яких кратні твору частоти несучого сигналу на число модулів інвертора. Амплітуда груп убуває з ростом порядку групи, а ширина збільшується. Таким чином, кожна група має приблизно рівний внесок в сумарний коефіцієнт гармонік вихідної напруги інвертора (рис. 3).

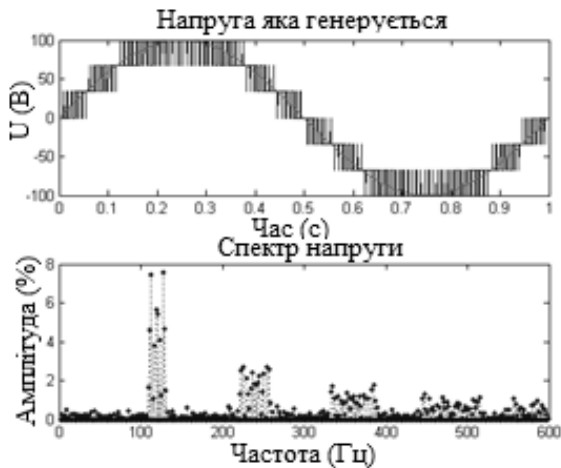


Рисунок 3 – Розподіл гармонік в спектрі вихідної напруги п'ятирівневого ШІМ інвертора при частотному коефіцієнті $K_f = 60$

Для аналізу потужності втрат і температури переходу силових модулів багаторівневого ШІМ інвертора застосовувалася та ж Simulink-модель, що і для аналізу однорівневих ШІМ-інверторів і амплітудно-імпульсна модуляція АІМ-інверторів. Відмінності полягають в моделях самого інвертора і системи управління. В результаті моделювання були проаналізовані залежності температури переходу в IGBT модулях каскадних ШІМ інверторів від частоти комутації і потужності навантаження, що визначає величину струму колектора при різній кількості рівнів вихідної напруги інвертора [6].

Динамічна складова втрат мала і мало впливає на загальні втрати в модулі. Однак при частотах 8-16 кГц динамічні втрати починають впливати на загальну потужність втрат і, отже, температуру переходу (рис. 4).

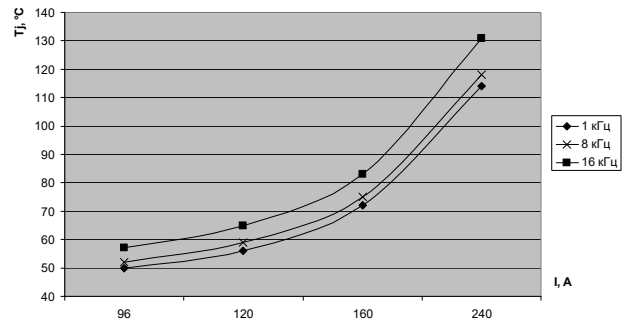


Рисунок 4 – Залежність температури переходу від струму ключів для 5-рівневого ШІМ інвертора на основі IGBT модулів M2TKI-300-12K

Отримані залежності справедливі для різних IGBT-модулів і не залежить від кількості рівнів інвертора. Тобто температура збільшується з ростом частоти комутації, але залишається незмінною при різних рівнях напруги живлення. Це пояснюється тим, що сумарна напруга, а разом з ним і струм колектора, залишаються незмінними, отже, незмінними залишаються і величини статичної та динамічної потужності втрат [3].

Найбільш складною і важливою частиною дослідження є встановлення залежностей між різними параметрами схемної реалізації, модуляції інвертора, його габаритними показниками і показниками якості електричної енергії що генерується. Одним з основних критеріїв оцінки перетворювачів частоти є якість вихідної напруги. Однак при виборі оптимального варіанта з, принаймні, двох перетворювачів з двома різними силовими схемами враховувалося не тільки якість вихідної напруги, але також вартість і габаритні показники схеми [4].

Таким чином, для вирішення завдання необхідно отримати наступні залежності

$$THD = f(F_{КОММ}, I_K), \quad (1)$$

$$P_{УСТ} = f(F_{КОММ}, I_K). \quad (2)$$

При цьому THD є фільтруючою функцією, а $P_{УСТ}$ - цільовий. Таке завдання можна формулювати у вигляді: необхідно вибрати оптимальну з точки зору габаритних і вартісних показників схему, що задовольняє заданому вимогу за змістом гармонійних складових в спектрі вихідної напруги [7].

Температура переходу модуля зростає з ростом струму колектора, таким чином при встановленні більш потужного модуля, що володіє меншим тепловим і електричним опором, температура переходу знижується. Таким чином, температура переходу залежить від ставлення вихідної потужності модуля до його встановленої потужності. Назвемо це відношення коефіцієнтом завантаження силового модуля (3).

$$K_{зав} = \frac{P_{вих}}{P_{уст}}. \quad (3)$$

Для отримання гладких залежностей запропоно-

вано при розрахунку коефіцієнта завантаження замість встановленої потужності використовувати її нормалізоване значення. Нормалізація всіх IGBT-модулів проводиться по одному модулю, прийнятому за базу. Нормалізоване значення встановленої потужності можна розрахувати за формулою

$$P'_{уст} = P_{уст.од.} \cdot \frac{Q}{\Omega_{од}}, \quad (4)$$

де $P_{уст.од.}$ – встановлена потужність прийнятого за базу IGBT-модуля;

Ω – внутрішній опір модуля;

$\Omega_{од.}$ – внутрішній опір прийнятого за базу IGBT-модуля.

Оскільки величини внутрішніх опорів модулів і енергії включення / вимикання модуля не залежать від напруги живлення, то зручніше перейти до розгляду коефіцієнтів завантаження модуля по струму

$$K^I_{ЗAB} = \frac{I_{вих}}{I_{уст}}, \quad (5)$$

де $I_{уст}$ – відношення встановленої потужності $P'_{уст}$ до зазначеного в паспортних даних модуля допустимому напрузі.

Апроксимовані квадратичним поліномом залежності температури переходу від нормалізованого коефіцієнта завантаження модуля представлені на рис. 5.

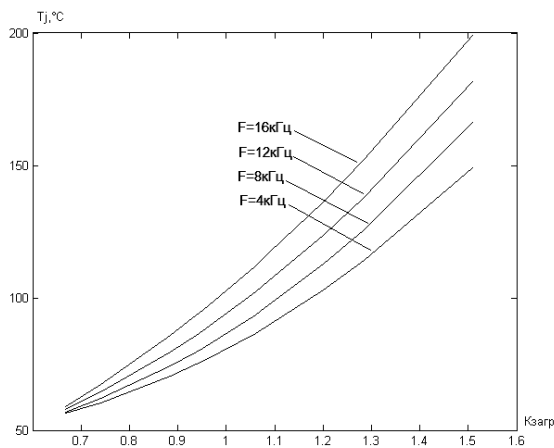


Рисунок 5 – Апроксимація залежності температури переходу від нормалізованого коефіцієнта завантаження модуля при різних частотах комутації F

З представлених графіків можна знайти максимальний коефіцієнт завантаження для заданої частоти комутації при обмеженні температури переходу на рівні 150 °C. Використовуючи залежність коефіцієнта завантаження модуля від частоти комутації, можна визначити мінімальну встановлену потужність схеми як суму вихідних потужностей IGBT модулів схеми.

Така залежність представлена на рис. 6.

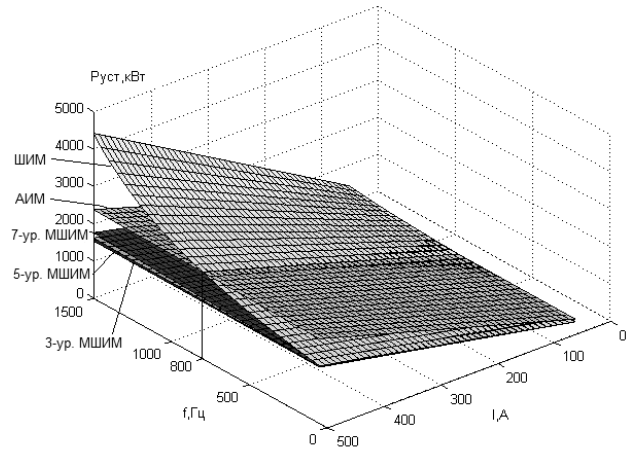


Рисунок 6 – Залежність встановленої потужності ШІМ, АІМ і МШІМ інвертора від частоти вихідної напруги і струму колектора при наявності безперервного номенклатурного ряду IGBT-модулів

З графіка видно, що граничною частотою є 800 Гц. При великих значеннях встановлена потужність ШІМ-інвертора вище, ніж у АІМ інвертора. При цьому кордон не залежить від струму колектора. Представлені вище залежно справедливі при розгляді безперервного номенклатурного ряду IGBT-модулів. Однак на практиці більшість серій модулів містять дискретний ряд напруг і розрізняються допустимим струмом колектора. У такому випадку при розрахунку встановленої потужності інвертора необхідно використовувати паспортні значення допустимого напруги модуля [8]. Це кардинальним чином змінює співвідношення ефективності інверторів різних топологій (рис. 7).

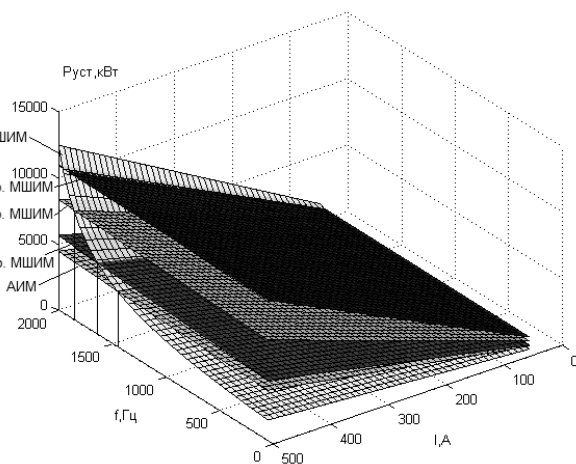


Рисунок 7 – Залежність встановленої потужності ШІМ, АІМ і МШІМ інвертора від частоти вихідної напруги і струму колектора при реальному номенклатурному ряду IGBT-модулів

Встановлена потужність МШІМ інверторів зростає пропорційно збільшенню кількості рівнів у зв'язку з збільшенням модулів в схемі. Оптимальною на час-

татах до 1400 Гц є бруківці інвертор з ШІМ за рахунок меншої кількості силових ключів. Однак при високих частотах напруги, що генерується динамічні втрати різко зростають, що вимагає встановлення більш потужних модулів. Це призводить до того, що в діапазоні понад 1400 оптимальним за встановленою потужністю стає інвертор з АІМ. При частотах вище 1700 Гц встановлена потужність ШІМ інвертора перевищує аналогічний показник 3-рівневого каскадного мостового ШІМ інвертора; при частотах вище 1800 Гц - 5-рівневого ШІМ інвертора; і при частотах вище 1950 Гц - 7-рівневого ШІМ інвертора [5].

Висновки. Для кожного навантаження існують оптимальні індуктивність і ємність фільтра, при яких температура переходу транзисторів інвертора залишається мінімальною. При розрахунку вихідного фільтра ШІМ інвертора необхідно враховувати не тільки критерії забезпечення необхідного коефіцієнта гармонік і рівності хвильового опору фільтра опору навантаження, але і ступінь його впливу на температуру переходу.

Список використаних джерел

1. Щербаков А. А. Анализ аппаратных и стоимостных затрат при реализации автономного инвертора напряжения с амплитудной модуляцией / А. А. Щербаков, Ю. М. Голембиовский // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 2(70). – Вып. 1. – С. 64-72.
2. Щербаков А. А. Задача управления качеством электрической энергии, генерируемой преобразователями частоты / А. А. Щербаков, Ю. М. Голембиовский, А. В. Денисов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24: доп. сб. тр. XXIV Междунар. науч. конф. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2011. – С.154-158.
3. Щербаков А. А. Спектральное моделирование многоуровневых инверторов напряжения / А. А. Щербаков // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. – Саратов, 2011. – С. 141-145.
4. Щербаков А. А. Зависимость спектра напряжения от параметров модуляции многоуровневого инвертора / А. А. Щербаков, Ю. М. Голембиовский // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сб. тр. XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 9. – Волгоград: Волгogr. гос. техн. ун-т, 2012; Харьков: Национ. техн. ун-т "ХПИ", 2012. – С. 199-201.
5. Щербаков А. А. Дискретные динамические модели структурно симметричных инверторов / Д. А. Авдеев, Н. П. Митяшин, Э. К. Нугаев, А. А. Щербаков // Управление сложными системами: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч. конф. – Саратов, 2009. – С. 3-9.
6. Щербаков А. А. Динамические модели автономных инверторов / Н. П. Митяшин, Э. К. Нугаев, Е. Е. Миргородская, А. А. Щербаков // Интернет и инновации: практические вопросы информационного обеспечения инновационной деятельности: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Саратов, 19-20 нояб. 2008 г. / СГТУ. – Саратов, 2008. – С. 250-251.
7. Щербаков А. А. Оптимизация выбора схем и

способов модуляции автономных инверторов напряжения / А. А. Щербаков, Ю. М. Голембиовский // Участники школы молодых ученых и программы УМНИК: сб. тр. XXV Междунар. науч. конф. / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. – С. 198-201.

8. Scherbakov A. Selecting the type of frequency converter to provide the power quality / A. Scherbakov // Молодые ученые за инновации: создавая будущее: материалы Международной научно-практической Интернет-конференции в рамках Международного Интернет-фестиваля молодых ученых, г.Саратов, 27-29 апреля 2011 г. / СГТУ. – Саратов, 2011. – С. 195-199.

Аннотация

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Лисиченко Р. Н.

Обоснован выбор схемной реализации автономного инвертора напряжения для повышения качества исходной электрической энергии, предусматривающий определение режимов функционирования инверторов, в которых использование конкретной реализации инвертора является оптимальной по габаритным и стоимостным показателям. Доказано, что спектр выходного напряжения многоуровневого ШИМ-инвертора состоит из гармонических групп, центры которых расположены на частотах, пропорциональных произведению частоты коммутации на количество уровней инвертора. Определены области допустимой работы ШИМ, АИМ и МШИМ инверторов и показано влияние тока инвертора и частоты коммутации на границы этих областей.

Abstract

COMPARATIVE EVALUATION OF METHODS AND FUNDS INCREASE ELECTRICITY ENERGY QUALITY OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS

R. Lysychenko

The choice of the circuit realization of the autonomous voltage inverter is substantiated for improving the quality of the initial electric energy, providing for the determination of the modes of operation of inverters, in which the use of a specific implementation of the inverter is optimal in overall and cost parameters. It is proved that the output voltage spectrum of a multilevel PWM inverter consists of harmonic groups whose centers are located at frequencies proportional to the product of the switching frequency by the number of levels of the inverter. Areas of allowable operation of PWM, AMI and MWIM inverters are determined and the influence of inverter current and switching frequency on the boundaries of these regions is shown.