

Прогнозування аварійних станів квазі-Z DC-DC перетворювача

Овсієнко^f М. Ю., ORCID [0000-0002-6014-0844](https://orcid.org/0000-0002-6014-0844)

Терещенко^s Т. О., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-4009-2854](https://orcid.org/0000-0003-4009-2854)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—Стаття присвячена прогнозуванню часу безаварійної роботи перетворювачів для відносно нового класу, що застосовуються в системах MicroGrid з відновлювальними джерелами енергії. DC-DC перетворювач, що розглядається в статті, містить в якості проміжної ланки змінного струму квазі-Z інвертор. Розроблено спосіб визначення часу безаварійної роботи DC-DC перетворювача при зміні параметрів схеми квазі-Z інвертора. Спосіб заснований на моделюванні роботи DC-DC перетворювача, визначенні часової залежності зміни діагностичного показника перетворювача при зміні номіналів елементів схеми та апроксимації часової залежності поліноміальною функцією. В якості діагностичного показника обрано функцію зміни середнього значення вихідної напруги від часу при зміні величин індуктивностей та ємностей квазі-Z інвертора. Показано, що похибка визначення часу безаварійної роботи залежить від функції апроксимації часової залежності діагностичного показника.

Ключові слова — квазі-Z DC-DC перетворювач; діагностика; прогнозування; час безаварійної роботи.

I. Вступ

У зв'язку з популяризацією та швидким розповсюдженням технології MicroGrid, що передбачає використання альтернативних джерел енергії, зростає необхідність у пошуку нових топологій перетворювачів змінної та постійної напруги, [1]. Однією з вимог, що висувуються до перетворювачів систем MicroGrid є універсальність, а саме можливість використання однієї топології перетворювача за різних умов освітленості, типу та кількості модулів сонячних батарей, можливість забезпечення різних вихідних напруг. Іншими словами, для забезпечення вимог користувача топологія конвертора має передбачати можливість підвищення вхідної напруги перетворювача в широких межах. Z та квазі-Z інвертори дозволяють регулювати вихідну напругу за рахунок наскрізного режиму без додаткових апаратних засобів. DC-DC перетворювач, що розглядається в статті, містить в якості проміжної ланки змінного струму квазі-Z інвертор і мостовий випрямляч та задовольняє вимогам максимального використання джерела сталого струму, мінімальних втрат в процесі перетворення та високої якості вихідної напруги.

Застосування таких перетворювачів викликало, в свою чергу, необхідність діагностування можливих несправностей та прогнозування часу роботи даних пристроїв за зміною їх струмів та напруг [2-6].

Залежно від способу опису тенденцій зміни об'єкту, процесу або формування параметрів, що його характеризують, виділяють різні методи прогнозування.

Для прогнозування відмов найпоширенішими методами є імовірнісний метод прогнозування, метод

чисельного аналізу, адаптивний метод лінійної фільтрації та метод прогнозування процесів з детермінованими основами [7].

Серед цих методів найкращі характеристики має метод чисельного аналізу, який дає змогу здійснити прогнозування технічного стану не враховуючи імовірності виходу з ладу елементів, що є в складі об'єкта діагностування. Вони мають високу достовірність результатів.

Обов'язковою умовою є наявність даних про минулий стан. З методів чисельного аналізу можна виокремити кілька відомих. Для задач інтерполяції ступінь многочлена береться вищою, бо у цьому випадку експериментальні дані описуються більш точно [8].

Однак, якщо цей метод використовується для знаходження наступних значень функцій, тобто для екстраполяції значень, то ступінь полінома повинна бути невеликою. Чим вища ступінь полінома, тим швидше він змінюється за межами експериментальної ділянки, і передбачення подальшої поведінки функції ускладнюється. Відповідно буде падати достовірність прогнозування і суттєво зросте обсяг обчислень [9]. Тому, важливою задачею є визначення полінома апроксимації функції зміни діагностичного параметра від часу.

Метою статті є розробка способу прогнозування несправного стану квазі-Z DC-DC перетворювача, який заснований на моделюванні роботи DC-DC перетворювача, отриманні часової залежності зміни діагностичного показника перетворювача при зміні номіналів елементів схеми та визначенні апроксимуючого поліному.



II. СХЕМА DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Принципова схема DC-DC перетворювача з проміжною ланкою у вигляді квазі-Z інвертора наведена на рис. 1. Схема складається з джерела постійної напруги (V_{IN}) та повномостового гальванічно-ізолюваного DC-DC перетворювача, що містить квазі-Z мережу ($qZSN$) на вході. $QZSN$ складається з двох конденсаторів C_{qz1} та C_{qz2} , двох індукторів L_{qz1} та L_{qz2} і одного діода D_{qz} , що з'єднані у певній конфігурації. До складу DC-DC перетворювача входить інвертор, побудований на чотирьох MOSFET транзисторах (ключі S1-S4), ізоляційний трансформатор TX та подвоювач напруги, що складається з двох діодів D_{r1} та D_{r2} і двох конденсаторів C_{f1} та C_{f2} [10].

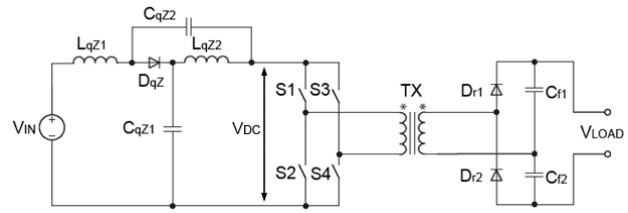


Рис. 1 Схема квазі-Z DC-DC перетворювача

III. ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙНИХ СТАНІВ

Відповідно до п.5.2 діючого ГОСТу 13109-97 про якість електроенергії для відхилення напруги від усталеного значення встановлено наступні норми — нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення від номінальної напруги U_n на виводах приймачів електричної енергії, які дорівнюють відповідно $\pm 5\%$ і $\pm 10\%$ від номінальної напруги електричної мережі по ГОСТ 721 і ГОСТ 21128.

Отже, ГОСТ вводить нормально допустимі (5% від номіналу) та гранично допустимі (10% від номіналу) відхилення.

Для прогнозування несправного стану перетворювача в якості діагностичного параметра обрано середнє значення випрямленої напруги навантаження U_d . Тоді верхня та нижня межі допусків δ_v і δ_n за ГОСТом 13109-97 дорівнюють номінальному значенню $U_d \pm 5\%$, тобто 215,67 та 195,13 В відповідно.

Побудова графіків здійснювалась з припущенням, що номінал досліджуваного елемента змінюється рівномірно з плином часу – на 12.5% за 5 годин.

На рис. 2.а зображено знаходження тривалості t_p працездатності об'єкта по графіку зміни параметра діагностики U_d від часу при лінійній апроксимації, 2.б – при апроксимації параболічною функцією.

Апроксимація функції, побудованої на основі вимірних значень, проводилась за допомогою програми Advanced Grapher. Коефіцієнт детермінації R^2 для кожної апроксимації розраховується автоматично.

Як видно з рис.2.а, прогнозований час працездатності об'єкта та реальний час працездатності t_0 відрізняються на 3,45 год., тобто відносна похибка даного прогнозу, що визначається як $(t_p - t_0)/t_0$ становить 20,85%.

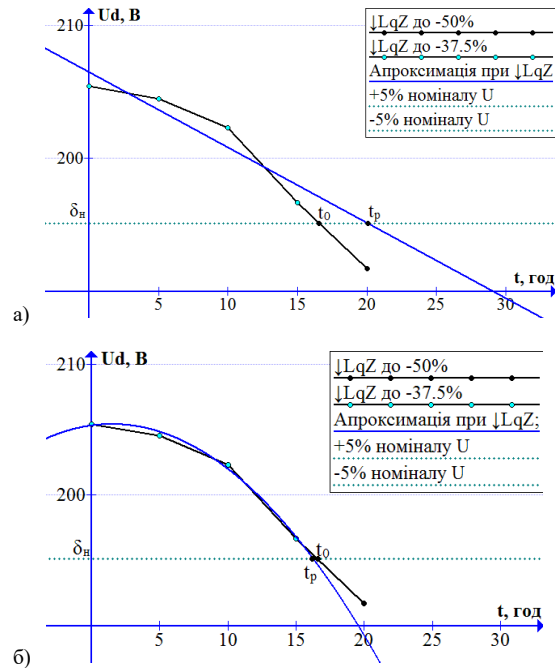


Рис.2. Залежність значення вихідної напруги U_d від часу t при зменшенні номіналу LqZ для випадку лінійної апроксимації (а) та апроксимації параболічною функцією (б)

Для рис.2.б, прогнозований час t_p та t_0 відрізняються на 0,31 год., відносна похибка прогнозу становить 1,87%.

Для оцінки того, наскільки точно фактичні дані описуються розрахунковими даними, за функцією апроксимації визначимо коефіцієнт детермінації R^2

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2,$$

де y_i, \hat{y}_i – фактичні та розрахункові значення досліджуваної змінної U_d , \bar{y} – середнє арифметичне значення досліджуваної функції.

Для випадку на рис. 2.б:

$$\bar{y} = \frac{205,4 + 204,5 + 202,3 + 196,7}{4} = 202,225.$$

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = (205,4 - 205,295)^2 + (204,5 - 204,815)^2 + (202,3 - 201,985)^2 + (196,7 - 196,805)^2 = 0,011 + 0,099 + 0,099 + 0,011 = 0,221,$$



$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = (205,4 - 202,225)^2 + (204,5 - 202,225)^2 + (202,3 - 202,225)^2 + (196,7 - 202,225)^2 =$$

$$= 10,081 + 5,176 + 0,006 + 30,526 = 45,788,$$

$$\text{Тоді } R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{0,221}{45,788} = 0,9952.$$

Значення коефіцієнта детермінації 0,9952 свідчить про те, що апроксимація майже повністю відповідає фактичним даним. Для прикладу, моделі з коефіцієнтом детермінації вище 80% вже можна визнати досить точними (коефіцієнт кореляції перевищує 90%). Значення коефіцієнта детермінації 1 свідчить про повну функціональну залежність між змінними.

На рис.3.а наведено залежність вихідної напруги U_d від часу t при збільшенні номіналу L_{qz} при лінійній апроксимації, рис.3.б – при апроксимації параболічною функцією.

Як видно з рис.3.а, різниця між прогнозованим та реальним часом працездатності становить 5,6 год., похибка прогнозу становить 18,06%, що є неприпустимим.

Для рис.3.б різниця між прогнозованим та реальним часом працездатності становить 0,34 год, відносна похибка дорівнює 1,1%. Коефіцієнт детермінації $R^2=0,981$. Таким чином показана перевага апроксимації параболічною функцією перед лінійною.

На рис.4 наведено залежність напруги U_d від часу t при зменшенні номіналу C_f . Похибка прогнозу становить 1.2 год., тобто 3.18%.

Напруга U_d виходить за допустимі межі при збільшенні ємності C_f на 1100% (рис.5).

Похибка прогнозу становить 1 год., тобто 0,25%, що є задовільним для визначення часу безаварійної роботи в практичних застосуваннях.

Таким чином, точність визначення часу безаварійної роботи залежить від функції апроксимації зміни діагностичного параметру від часу при зміні параметрів перетворювача. Так при відхиленні індуктивності L_{qz} функція апроксимації U_d від часу t є нелінійною, тому для опису її залежності доцільно використовувати апроксимацію параболічною функцією – похибка у порівнянні з лінійною апроксимацією зменшується на 12,06...16,87%. Точність прогнозування часу безаварійної роботи становить 98,13...98,9%. Для зміни інших параметрів доцільно застосовувати лінійну апроксимацію часу безаварійної роботи. Похибка апроксимації функції лежить в межах

0,02...15,74%. Точність прогнозування часу становить 96,82...99,75%, що є задовільним результатом.

ВИСНОВКИ

Запропоновано спосіб визначення часу безаварійної роботи $DC-DC$ перетворювача з квазі- Z інвертором, заснований на апроксимації часової залежності середнього значення вихідної напруги при зміні величин індуктивностей та ємностей квазі Z інвертора. Час безаварійної роботи визначається як різниця моменту перетину апроксимованої часової залежності з лінією межі допусків (верхньою або нижньою) та поточного моменту.

Показано, що точність визначення часу безаварійної роботи залежить від функції апроксимації зміни діагностичного параметру від часу при зміні параметрів перетворювача. Так при апроксимації часової залежності вихідної напруги при зменшенні величини індуктивності поліномом першого ступеня похибка апроксимації становить 20,85%, що є неприпустимим. При апроксимації параболічною функцією ця ж похибка становить 1,87%, що є задовільним для більшості практичних задач діагностики.

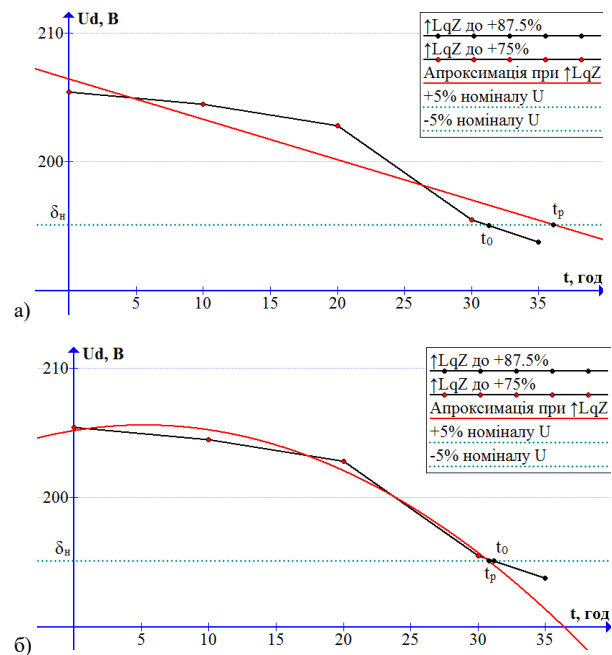
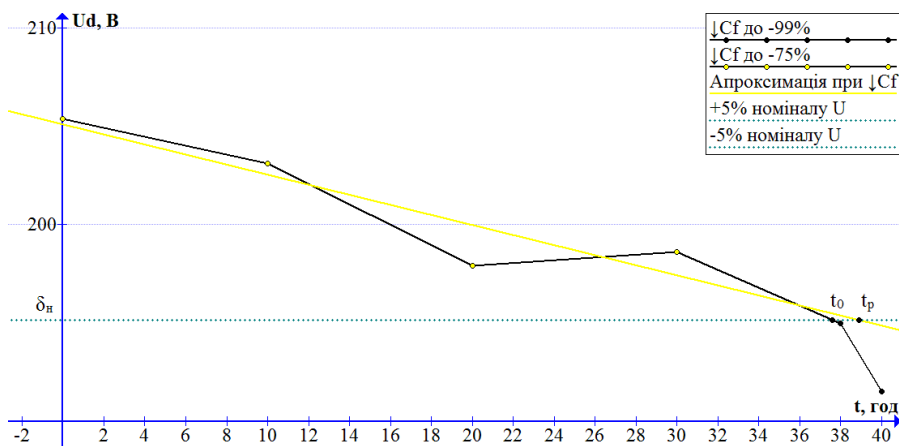
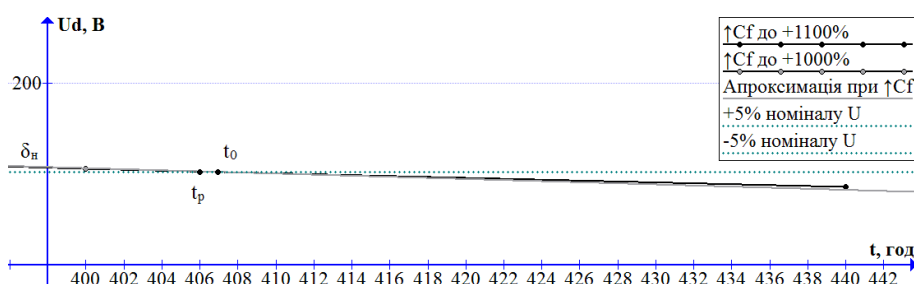


Рис.3. Залежність значення вихідної напруги U_d від часу t при збільшенні номіналу L_{qz}

Рис.4. Залежність значення вихідної напруги U_d від часу t при зменшенні номіналу C_f Рис.5. Залежність значення вихідної напруги U_d від часу t при збільшенні номіналу C_f на 1100%

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Т. О. Tereshchenko, I. S. Fedin, M. Yu. Ovsienko, L. H. Laikova, "Avtonomni inventory v systemakh elektrozhivlennia z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii", *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho*. Seria: *Tekhnichni nauky*, no. 2, pp. 49-54, 2019, URL: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/2_2019/art_1/10.pdf
- [2] Yu. M. Golembiovskiy, B. S. Penkov, "Avariynnye rezhimy preobrazovatelnoy seti, postroennoy na baze inverterov napryazheniya", *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichnyy vipusk „Silova elektronika ta energoefektivnist*, vol. 3, pp. 31-34, 2004.
- [3] I. F. Domnin., O. V. Sevryukov, M. R. Verzhanovskaya, "Lokalizaciya neispravnoej silovoj shemy avtonomnogo invertora toka", *Third International Scientific and Technical Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems*, vol. 2, pp. 547-552, 1997.
- [4] V. Klimov, A. Portnov, V. Korotkov, V. Smirnov, S. Syromyatnikov, R. Bejm, "Odnofaznye istochniki besperebojnogo pitaniya serii DPK: Dinamicheskie i spektralnye karakteristiki" *Silovaya elektronika*, no. 2, pp. 53-56, 2007.
- [5] T. A. Khyzhniak., T. O. Tereshchenko, M. Yu. Ovsienko, L. H. Laikova, "Diahnostyka DC-DC peretvoriuvachiv z kvazi-impedansnoi lankoiu", *Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 23, no. 2(103), pp.42-48, 2018, DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.2.130457](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.2.130457)
- [6] T. O. Tereshchenko, T. A. Khyzhniak., L. H. Laikova, M. Iu. Ovsienko, D. S. Zaruba, "Vyznachennia nespravnoej elementiv naprivodnykovykh peretvoriuvachiv", *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho*. Seria: *Tekhnichni nauky*, vol. 29(68), no. 5, part 3, pp. 127-132, 2018, URL: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/5_2018/art_3/26.pdf
- [7] R. G. Zakirov, "Prognozirovaniye tehničeskogo sostoyaniya bortovogo radioelektronnoho oborudovaniya", *Trudyi Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, no. 85, pp. 1-17. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/682/zakirov_rus.pdf?lang=ru&issue=85
- [8] M. V. Kutniv. *Chyselni metody: [navch. posib.]*. L.: Rastr-7, 2010, ISBN: 978-966-2004-44-1
- [9] L. Liivik, "Semiconductor Power Loss Reduction and Efficiency Improvement Techniques for the Galvanically Isolated Quasi-Z-Source DC-DC Converters" : Diss.deg. of Doctor of Philosophy in Engineering: July 12, 2015/ Liivik Liisa - TUT PRESS, 2015 – 107 p, URI: <https://digi.lib.ttu.ee/i/?2519>
- [10] V.Yu. Belashev, N. M. Chernova. E'fektivny'e algoritmy` i programmy` vy'chislitel'noj matematiki. Magadan: SVKNII DVO RAN, 1997, URL: https://www.studmed.ru/belashov-vyu-chernova-nm-effektivnye-algoritmy-i-programmy-vychislitelnoy-matematiki_49bb04a99c5.html

Надійшла до редакції 20 червня 2019 р.



Прогнозирование аварийных состояний квази-Z DC-DC преобразователя

Овсиенко^f М. Ю., ORCID [0000-0002-6014-0844](https://orcid.org/0000-0002-6014-0844)

Терещенко^s Т. А., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-4009-2854](https://orcid.org/0000-0003-4009-2854)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—Статья посвящена прогнозированию времени безаварийной работы преобразователей для относительно нового класса, применяемого в системах MicroGrid с возобновляемыми источниками энергии. DC-DC преобразователь, рассматриваемый в статье, содержит в качестве промежуточного звена переменного тока квази-Z инвертор. Разработан способ определения времени безаварийной работы DC-DC преобразователя при изменении параметров схемы квази-Z инвертора. Способ основан на моделировании работы DC-DC преобразователя, определении временной зависимости изменения диагностического показателя преобразователя при изменении номиналов элементов схемы и аппроксимации временной зависимости полиномиальной функцией. В качестве диагностического показателя выбрано значение изменения среднего значения выходного напряжения от времени при изменении величин индуктивности и емкостей квази Z инвертора. Показано, что погрешность определения времени безаварийной работы зависит от функции аппроксимации временной зависимости диагностического показателя.

Ключевые слова — квази-Z DC-DC преобразователь; диагностика; прогнозирование; время безаварийной работы.

UDC 621.314.1

Quasi-Z DC-DC Converter Emergency State Prediction

M. Yu. Ovsienko^f, ORCID [0000-0002-6014-0844](https://orcid.org/0000-0002-6014-0844)T. O. Tereshchenko^s, Dr.Sc.(Eng.), Prof., ORCID [0000-0003-4009-2854](https://orcid.org/0000-0003-4009-2854)National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute " kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—The article is devoted to the task of prediction the time of converters trouble-free operation for a relatively new class of topology that is used in MicroGrid with renewable energy sources. The DC-DC converter, considered in the article, contains a quasi-Z inverter as an intermediate AC link. A method has been developed for determining the time of DC-DC converter trouble-free operation when changing the parameters of a quasi-Z inverter circuit. This method is based on modeling the operation of the DC-DC converter, determining the time dependence of the change in the converter diagnostic indicator when changing the circuit elements values and approximating the time dependence by the polynomial function. The function of changing the average value of the output voltage from time while changing the inductance and capacitances values of quasi-Z inverter is chosen as the diagnostic indicator.

The duration of trouble-free operation is determined by the moment when the graph of approximated function reaches upper of lower boundary of the range of acceptable scheme parameter. The upper and lower boundaries are defined by national standard 13109-97 and are equal +/-10% from nominal voltage of electrical grid.

Approximation of the function that is built on the base of measured values was done using the software Advanced Grapher. In order to estimate how real data are close to the derived by approximation function the coefficient of determination R^2 is used.

It is shown that the error in determining the time of trouble-free operation depends on the approximation function of the diagnostic indicator time dependence. E.g., for linear approximation of time dependence of the output voltage mean value when the inductance L_qZ changes the difference between predicted and real trouble-free operation time is 5,6 hours. Prediction error is 18,06% that is non-acceptable. When approximation is done using parabolic function the determination coefficient is 0,9952. That means that approximation almost completely answers to real data. Time estimation error is 1 hour that is 0,25%, i.e. in comparison with the linear approximation the error decreases by 12,06-16,87%.

For the deviation of other scheme parameters, it is expedient to use linear approximation for trouble-free operation time. The approximation error lies in the range 0,02...15,74%. The exactness of prediction of trouble-free operation time is 96,82...99,75% that is satisfactory result for the most practical diagnostic tasks.

The proposed method for estimation of trouble-free operation time is perspective for use in the systems of DC-DC converters diagnostics with the intermediate quasi-Z inverter link.

Keywords — quasi-Z DC-DC converter; diagnostics; forecasting; trouble-free operation time.

