

АНОТАЦІЯ

Бешта О.О. Підвищення навантажувальної здатності в системі асинхронного електропривода транспортного засобу з комбінованим джерелом живлення. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», МОН України, Інститут електродинаміки, НАН України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню навантажувальної здатності в системі асинхронного електропривода шляхом об'єднання декількох джерел електричної енергії по спеціальній схемі за допомогою одного автономного інвертора напруги. Галузь використання системи, що розглядається – електричні та гібридні транспортні засоби.

У багатьох випадках в системах електропривода транспортних засобів використовуються або доцільно використовувати декілька джерел електричної енергії. Проблемою є забезпечення ефективної сумісної роботи джерел різних типів на спільне навантаження та оптимізації їх енергетичних параметрів.

Дотепер не має універсального наукового підходу щодо вибору потужностей компонентів електромеханічних систем, до складу яких входить декілька джерел та споживачів енергії. Невідповідність номінальної потужності та енергоємності джерел або накопичувачів енергії призводить до низької енергетичної ефективності таких систем.

Крім того, відсутні системи регулювання і закони керування, які забезпечують ефективну сумісну роботу джерел різних типів на спільне навантаження. Це не дозволяє експлуатувати компоненти в зоні їх найвищого ККД, і, таким чином, знижує енергоефективність таких систем.

Традиційні електромеханічні систем, які включають до свого складу компоненти різних типів, зазвичай, базується на проміжній ланці постійного струму. Для регулювання потоками потужностей, які приймають/віддають

окремі елементи, використовуються окремі інвертори. Такі інвертори вибираються за потужністю відповідно до номінальних параметрів кожного компонента. Таким чином, отримується керована електромеханічна система, але високої вартості, оскільки в ній присутні декілька автономних інверторів, розрахованих на максимально можливий струм від кожного компонента.

Доцільно розвинути ідею використання одного автономного інвертора напруги для керування режимами роботи компонентів змінного та постійного струму без організації спільної ланки постійного струму. Для цього одне з джерел постійного струму може бути під'єднане до нуля фазних обмоток асинхронного двигуна через додаткові індуктивність і активний опір, а другим полюсом – до мінусового терміналу автономного інвертора напруги, який, в свою чергу, підключений до іншого джерела постійного струму, наприклад, акумуляторної батареї.

Розглядався спеціальний алгоритм керування ключами автономного інвертора напруги зі збільшеним часом комутації ключів верхнього плеча, за допомогою якого можна керувати потоками енергії для кожного компонента. Таким чином, одним інвертором виконується функція регулювання режимами роботи електромеханічної системи.

Така схема дозволяє заряджати акумулятор, але при цьому додаткове джерело повинно мати достатньо велику ЕРС, щоб подолати рівень ЕРС акумулятора. Високий рівень ЕРС додаткового джерела призводить до виникнення значних струмів нульової послідовності у фазах двигуна за цикл комутації ключів інвертора і, відповідно, насиченню магнітної системи електродвигуна, значних додаткових втрат енергії в його статорних обмотках та їх підвищеному нагріву.

Для збільшення електромагнітного моменту двигуна, зменшенню рівня ЕРС додаткового джерела енергії, підвищення ефективності процесу перетворення енергії у системі електропривода ТЗ з додатковим джерелом енергії було розглянуто варіант нульового стану ключів нижнього плеча АІН.

Було проведено аналіз закономірностей впливу параметрів електричного кола додаткового джерела живлення на параметри режиму живлення асинхронного двигуна з використанням нульових комбінацій ключів нижнього плеча інвертора для формування умови підвищення навантажувальної здатності системи електропривода ТЗ.

З'ясовано, що комбіноване джерело живлення, що складається з двох джерел ЕРС постійного струму, забезпечує збільшення амплітуди вихідної напруги інвертора з одночасним виникненням її змінної складової та нульової послідовності при використанні нульових комбінацій ключів нижнього плеча інвертора.

Встановлено, що умовою передачі енергії від додаткового джерела, є таке співвідношення параметрів електричного кола, при якому постійна часу цього електричного кола має бути більшою, ніж половина часу перебування ключів нижнього плеча інвертора в нульовому стані.

Проведено визначення найбільш компромісного варіанту з точки зору капітальних затрат і масогабаритних показників комбінованого джерела. Таким варіантом може бути схема з ЕРС додаткового джерела живлення 20...40 % від основного ЕРС; індуктивністю 67...0 %; активним опором, що складає значення активного опору фази статора двигуна. При цьому приріст амплітуди вектора напруги інвертора буде 7,7...18,4 %. Збільшення амплітуди нульової послідовності напруги інвертора у вибраному діапазоні зміни ЕРС 20...40 % складає 0,006...2,5 %. Аналіз вибору активного опору додаткового джерела показав, що його збільшення у два рази, відносно активного опору фаз статора двигуна, дозволяє знизити нульову послідовність напруги до нуля при зменшенні приросту амплітуди вихідної напруги від 10 % до 6,7 %.

При розгляді конвенціонального закону комутації ключів інвертора встановлено, що такий спосіб призводить до виникнення складної форми вихідної напруги. Запропонована модифікація закону комутації ключами інвертора комбінованого джерела живлення з врахуванням змінної складової

модуля вектора вихідної напруги, що забезпечує стабілізацію напруги у фазах двигуна на заданому рівні.

Були встановлені закономірності впливу на електромагнітний момент асинхронного двигуна при його живленні від несиметричної системи напруг комбінованого джерела живлення при різних законах керування запропонованою системою електропривода ТЗ для визначення шляхів компенсації коливань моменту двигуна. З'ясовано, що найбільший приріст моменту і найменший рівень його коливань забезпечується векторним керуванням електроприводом. При збільшенні напруги живлення до 30% зростання моменту становить до 18%, а при коливанні амплітуди напруги в межах 30% від номінальної амплітуда коливань моменту складатиме не більше 10%.

Компенсацію коливань моменту двигуна в системі векторного керування швидкістю електропривода запропоновано забезпечити шляхом використання додаткових сигналів керування ключами інвертора, що визначаються отриманими змінними складовими напруги живлення в синхронній системі координат.

На підставі проведених досліджень з'ясовано, що ефективну компенсацію коливань моменту двигуна можливо забезпечити підвищеною частотою комутації ключів інвертора. Але збільшення частоти комутації понад 2 кГц не є доцільним через високі втрати енергії при комутації та неефективним процесом подальшої компенсації коливань моменту.

В ході експерименту досліджено й обґрунтовано доцільність використання комбінованого джерела живлення із співвідношенням ЕРС додаткового джерела живлення 20...40 % від основного ЕРС. Підтверджено експериментально умову відкривання діоду у колі нульової точки статорних обмоток двигуна. Ця умова дозволяє визначити значення індуктивності для забезпечення відкритого стану діоду.

Новизна роботи полягає в наступному. Науково обґрунтовано умову підвищення навантажувальної здатності системи електропривода шляхом

визначення закономірностей впливу параметрів компонентів електричного кола додаткового джерела на параметри живлення асинхронного двигуна з використанням нульових комбінацій ключів нижнього плеча інвертора.

Встановлено вплив параметрів кола під'єднання додаткового джерела живлення на параметри режиму живлення асинхронного двигуна, що дозволяє забезпечити збільшення навантажувальної здатності електропривода при одночасному зменшенні коливань електромагнітного моменту.

Отримані закономірності коливань напруги живлення електродвигуна, що дозволило визначити шляхи модифікації класичного широтно-імпульсного закону модуляції ключів інвертора комбінованого джерела живлення і, таким чином, стабілізувати вихідну напругу живлення і навантажувальну здатність електропривода на заданому рівні.

Встановлено закономірність впливу коливань напруги живлення двигуна на формування його електромагнітного моменту.

Визначено вплив законів керування системою електропривода на мінімізацію коливань електромагнітного моменту електродвигуна.

Розроблено методику вибору і техніко-економічного обґрунтування параметрів запропонованого джерела живлення. Визначено, що запропоноване схемо-технічне рішення є більш ефективним з точки зору подовження циклу розряду акумуляторної батареї і має менші капітальні й експлуатаційні витрати.

Ключові слова: автономний інвертор напруги, електропривод транспортного засобу, комбіноване джерело електричної енергії, векторне керування, електромагнітний момент.

Список публікацій здобувача

1. O.O. Beshta, S.S. Khudolii, M. Neuburger, N. Neuburger. Control of energy flows in electric drivetrain of electric vehicle with extra DC source. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. вип. 2. С. 67-71 (Особистий внесок – запропонував схему побудови комбінованої електромеханічної системи з варіантом стану ключів АІН (0,0,0) для забезпечення моменту на валу електричного двигуна).

2. G.G. Pivnyak , O.O. Beshta. A complex source of electrical energy for three-phase current based on a stand-alone voltage inverter. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. вип. 1. С. 89-93 (Особистий внесок – наведено математичні розрахунки побудови електромеханічної схеми, запропоновано модифікований алгоритм комутації ключів інвертора комбінованого джерела живлення, описані фізичні процеси передачі енергії до електромеханічного перетворювача від додаткового джерела живлення).

3. Ivan Lutsenko, Serhii Fedoriachenko, Oleksandr O. Beshta, Mariia Vesela, Ievgenii Koshelenko. Estimation of the Potential Impact of Electric Vehicles on the Distribution Network's Operation Modes. *Mechanics, Materials Science & Engineering*. 2017. Vol 8. <https://mmse.xyz/en/estimation-of-the-potential-impact-of-electric-vehicles-on-the-distribution-networks-operation-modes/> (Особистий внесок – запропоновано алгоритм оцінки потенційного впливу двонаправленого використання акумуляторних батарей).

4. Lutsenko I.M., Fedoriachenko S.O., Beshta O.O., Vesela M.A., Tverdohlib O.M. Hybrid system for generating electric power. *Mechanics, Materials Science & Engineering*. 2016. Vol.6. <https://mmse.xyz/en/hybrid-system-for-generating-electric-power/> (Особистий внесок – запропонована система генерування електричного струму за допомогою комбінування альтернативних джерел енергії).

5. Oleksandr O. Beshta, Ivan Lutsenko, Serhii Fedoriachenko, Mariia Vesela. Combined Electromechanical Converter for Hybrid and Electric Vehicles. *Mechanics, Materials Science & Engineering*. 2017. Vol 10. <https://mmse.xyz/en/combined-electromechanical-converter-for-hybrid-and-electric-vehicles/> (Особистий внесок – запропонований новий шлях прямого перетворення електричної енергії, що підвищує ефективність перетворення при одночасному зменшенні вартості та розміру джерела енергії та додаткових компонентів).

Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи розглядалися на міжнародних наукових і науково-практичних конференціях:

1. Міжнародній науково-технічній конференції «Форум гірників» (Дніпро, 30 вересня – 3 жовтня 2015 р.).

2. Перша міжнародна конференція Information Technologies in Science & Education'17 (Spain, India, Ukraine) (Дніпро, 26 вересня 2017р.).
3. Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-хімічні геотехнології – 2018» (Дніпро, 10-11 жовтня 2018 р.).
4. «2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)» (Київ, 17-19 квітня 2019 р.).

ANNOTATION

Beshta O.O. Increasing the load capacity in the system of asynchronous electric drive of a vehicle with a combined power supply. - Qualifying scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a doctor of philosophy science degree in speciality 141, "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics". - National Technical University "Dnipro Polytechnic", Ministry of Education and Science of Ukraine, Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to increasing the load capacity in the system with asynchronous electric drive by means of combining several sources of electric energy according to a special scheme with the help of one autonomous voltage inverter. The area of application of the considered system is electric and hybrid vehicles.

In many cases, electric power systems of vehicles use several sources of electric energy. The problem is to ensure the effective parallel operation of different types of sources onto a common load and optimize their energy performances.

There is still no universal approach in dimensioning of components of electromechanical systems which include several energy sources and loads. The mismatch between the rated power and energy consumption of energy sources or storage devices leads to low energy efficiency of such systems. In addition, there are no control systems and algorithms that ensure the effective operation of different types of sources onto a common load. It does not allow components to operate in the areas of highest efficiency and thus reduces the efficiency of such systems.

Traditional electromechanical systems, which include components of different types usually comprise intermediate DC link. Separate inverters are used to control the power flows that receive / transmit individual elements. Such inverters are rated according to the nominal parameters of each component. Thus, a controlled electromechanical system is obtained, but of high cost, because it has several stand-alone inverters designed for the maximum possible current of each component.

It is expedient to develop a single stand-alone voltage inverter to control the modes of operation of AC and DC components without a common DC link. To do this, one of the DC sources can be connected to the neutral point of the windings of the induction motor through additional inductance and active resistance, and the second pole - to the negative terminal of the stand-alone voltage inverter, which is connected to another DC source, such as a battery.

A special control algorithm for a stand-alone voltage inverter with increased switching time of the upper arm of the switches is examined in the paper. This algorithm can control the energy flows for each component. Thus, one inverter regulates the modes of operation of the electromechanical system.

This circuit makes it possible to charge the battery, but the additional source must have a large enough EMF to overcome the EMF level of the battery. To increase the electromagnetic torque of the motor, reduce the EMF level of the additional energy source, increase the efficiency of the energy conversion process in the electric drive system of the vehicle with an additional energy source, the option of zero state of the lower arm of the voltage inverter was considered.

The analysis of regularities of influence of parameters of an electric circuit of an additional power supply on parameters of a power mode of the induction motor with use of zero combinations of switches of the lower arm of the inverter was carried out. Such regularities made it possible to formulate the conditions for increasing the load capacity of the electric drive system of the vehicle.

It has been found that a combined power supply consisting of two DC power sources provides an increase in the amplitude of the output voltage of the inverter with the simultaneous occurrence of its variable component and zero sequence when using zero switches combinations of the lower arm of the inverter.

The condition for the transfer of energy from an additional source is the ratio of the parameters of the electrical circuit, when the time constant of this electrical circuit is greater than half the switching time of the switches of the lower arm of the inverter.

The reasonable compromise option in terms of capital costs and weight/volume of the combined source is determined. This option may be a circuit with the EMF of the additional power supply 20... 40% of the main EMF; inductance 67 ... 0%; active resistance, which is the value of the active resistance of the stator phase of the motor. The increase in the amplitude of the voltage vector of the inverter will be 7.7... 18.4%. The increase in the amplitude of the zero sequence of the inverter voltage in the selected range of change of the EMF 20... 40% is 0.006... 2.5%. Analysis of the choice of the active resistance of the additional source showed that its doubling relative to the active phase resistance of the motor stator allows to reduce the zero-voltage sequence to zero while reducing the increase in output voltage amplitude from 10% to 6.7%.

When considering the conventional law of switching the inverter's valves, it is found that this method leads to a complex form of the output voltage. A modification of the switching law of the combined power supply is proposed taking into account the variable component of the module of the output voltage vector, which provides voltage stabilization in the motor phases at a given level.

Regularities of influence on the torque of the induction motor at asymmetric system of voltages of the combined power supply at various control laws were established. It was found that the largest increase in torque and the lowest level of its oscillations is provided by vector control of the electric drive. When the supply voltage increases to 30%, the increase in torque is up to 18%, and when the voltage amplitude fluctuates within 30% of the nominal, the amplitude of torque oscillations will not exceed 10%.

It is proposed to provide compensation of motor torque oscillations in the vector speed control system of the electric drive by using additional control signals of the inverter switches, which are determined by the obtained variable components of the supply voltage in the synchronous coordinate system.

Effective compensation of motor torque oscillations can be provided by increasing the frequency of switching of the inverter switches. However, increasing the switching frequency above 2 kHz is not advisable due to higher energy losses

during switching and the inefficient process of further compensation of torque oscillations.

During the experiment, the expediency of using a combined power supply with an EMF ratio of an additional power supply of 20... 40% of the main EMF was investigated and proven. This condition allows to determine the value of inductance to provide open state diode.

The condition of increasing the load capacity of the electric drive system by determining the patterns of influence of the parameters of the components of the electric circuit of the additional source on the power parameters of the induction motor using switches of the lower arm of the inverter is proven as well.

The influence of the parameters of the connection circuit of the additional power supply on the parameters of the power supply mode of the induction motor is investigated, which allows to increase the load capacity of the electric drive while reducing the torque oscillations.

The regularities of oscillations of the motor supply voltage are obtained, which allowed to determine the ways of modification of the classical PWM law of the combined power supply and, thus, to stabilize the output supply voltage and load capacity of the electric drive at a given level.

The regularity of influence of oscillation of supply voltage of the motor on formation of its torque is found.

The influence of the laws of control of the electric drive system on minimization of oscillations of the torque of the electric motor is investigated.

Feasibility study for the suggested system has been carried out. It is determined that the proposed schematic solution is more efficient in terms of extending the discharge cycle of the battery and has lower capital and operating costs.

Key words: autonomous voltage inverter, electric vehicle powertrain, combined power source, vector control, torque.