



O'zgaruvchan tok o'zgartirgichlarining zamonaviy istiqbolli rivojlanish yo'nalishlari

Shukxrat B. Umarov¹, Ubaydilla A. Boqijonov^{1,a}

¹⁾ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; shumarov1951@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9262-4683>

^{1a)} katta o'qituvchi, Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston ubaydullo.67.uz@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-4636-7951>

Dolzarbli: ishning dolzarbli sanoatning turli ishlab chiqarish jarayonlarida, qishloq xo'jaligi va boshqa sohalarda keng qo'llaniladigan kuchli o'zgaruvchan tok o'zgartirgichlarining zamonaviy rivojlanish yo'nalishlari keltirilganligi bilan izohlanadi. Bugungi kunda kuchli o'zgaruvchan tok o'zgartirgichlarini yaratishda eng keng qo'llaniladigan usul bu ikki marta energiyani o'zgartirish tizimlaridan (IEO') foydalanish hisoblanadi. Maqolada IEO' tizimining elektr sxemasi va funksional vazifalari, shuningdek, impuls kengligi modulyasiyasi (IKM) inverterning texnik va sxematik imkoniyatlari, gibrid va matritsali strukturasi, hamda chiqish parametrlarining garmonik tarkibini yaxshilash uchun mustaqil (avtonom) filtrlardan samarali foydalanish muhim ahamiyatga egaligi ko'rsatilgan. Shuningdek, maqolada gibrid strukturaning yuqori garmonikali filtrlar bilan birgalikda ishlatilishi orqali kirish quvvat koeffitsientini oshirish va elektromagnit mos kelmaslikning oldini olish muammolarini bartaraf etish mumkinligi ko'rsatilganligiga asoslanadi. Mazkur maqolada o'zgaruvchan tok o'zgartirgichlarining zamo-naviy istiqbolli rivojlanish yo'nalishlari tahlil qilinadi.

Maqsad: ikki marta energiyani o'zgartirish tizimlarini qo'llash orqali zamonaviy kuchli o'zgaruvchan tok o'zgartirgichlarining turli sxematik maqsadlari sanoat ishlab chiqarish, qishloq xo'jaligi va boshqa sohalarda samarali qo'llanilish darajasini oshirishdan iborat.

Usullar: tadqiqot jarayonida kuchli o'zgaruvchan tok o'zgartirgichlarini yaratishda eng keng qo'llaniladigan ikki marta energiyani o'zgartirish tizimlarini qo'llash hamda imitatsion modellashtirish usullari qo'llanilgan.

Natijalar: ikki marta energiyani o'zgartiruvchi qurilmalarni yaratishda impuls kengligi modulyasiyasi va garmonikalarni bartaraf etuvchi filtrlar to'g'rilagichlardan foydalanish qurilmaning kirish quvvat koeffitsientini yaxshilash, qurilmaning kirish quvvat koeffitsientini oshirish va tarmoq bilan vujudga kelishi mumkin bo'lgan elektromagnit muvofiqlik muammosini hal qilish imkoniyati berishi hamda o'zgartirgichning matritsali tuzilmasi birlamchi manba chastotasiga nisbatan chiqish kuchlanishi chastotasini oshirish yoki kamaytirishga imkon berishi va shu bilan birga tizimning ishonchligini oshirish mumkinligi bilan izohlanadi.

Kalit so'zlar: invertor, to'g'rilagich, impuls kengligi modulyasiyasi, energiyani ikki marta aylantirishga asoslangan qurilmalar, konvertor, harmonika ta'sirini yo'q qiluvchi filtrlar.

Современные перспективные направления развития преобразователей переменного тока

Шухрат Б. Умаров^{1a)}, Убайдилла А. Бокижонов^{1,a}

^{1a)} DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; shumarov1951@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9262-4683>

¹ старший преподаватель, Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; ubaydullo.67.uz@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-4636-7951>

Актуальность: в ней представлены современные тенденции развития мощных преобразователей переменного тока, которые широко применяются в различных промышленных производственных процессах, сельском хозяйстве и других областях. На сегодняшний день наиболее распространённым методом создания мощных преобразователей переменного тока является использование систем двойного преобразования энергии (СДПЭ). В статье представлены электрические схемы и функциональные задачи системы СДПЭ, а также технические и схемотехнические возможности инвертора с широтно-импульсным модулированием (ШИМ), его гибридная и матричная структуры, а также показана возможность эффективного использования независимых (автономных) фильтров для улучшения гармонического состава выходных параметров. Показано, что гибридная структура может быть использована совместно с фильтрами высших гармоник для улучшения входного коэффициента мощности и устранения проблем электромагнитной несовместимости.

Цель: повышение эффективности применения различных схемотехнических решений современных мощных преобразователей переменного тока в промышленном производстве, сельском хозяйстве и других областях за счет использования систем двойного преобразования энергии (СДПЭ).

Методы: при разработке и исследовании мощных преобразователей переменного тока были использованы методы систем двойного преобразования энергии (СДПЭ), методы имитационного моделирования.

Результаты: подтверждены исследованием систем выпрямителей с широтно-импульсной модуляцией и фильтром гармоник, которые широко используются при создании двухтактных преобразователей энергии. Показано, что их применение позволяет повысить входной коэффициент мощности устройства и решить проблему электромагнитной несовместимости, которая может возникнуть с сетью, а матричная структура преобразователя позволяет увеличивать или уменьшать частоту выходного напряжения относительно частоты первичного источника, при этом повышая надёжность системы.

Ключевые слова: инвертор, выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, коммутатор, устройства на

For citation: Umarov B.Sh., Boqijonov U.A. Modern promising development directions of alternating current converters plants. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 48-57.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19704662>

Received: 11.10.2025
Revised: 10.11.2025
Accepted: 14.02.2026
Published: 26.03.2026

Copyright: © Shukxrat B. Umarov, Ubaydilla A. Boqijonov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



основе двойного преобразования энергии, преобразователь, фильтры устраняющие влияние гармоник.

Modern promising development directions of alternating current converters plants

Shukxrat B. Umarov¹, Ubaydilla A. Boqijonov^{1a)}

¹⁾ DSc, prof., Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; shumarov1951@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9262-4683>

^{1a)} head teacher, Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; ubaydullo.67.uz@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-4636-7951>

Relevance: the relevance of the work is explained by the fact that it presents modern development trends in powerful alternating current converters, which are widely used in various industrial production processes, agriculture, and other areas. Today, the most widely used method for creating powerful alternating current converters is the use of double energy conversion systems (DECs). The article presents the electrical scheme and functional tasks of the DECs system, as well as the technical and schematic capabilities of the IKM inverter, its hybrid and matrix structure, and the importance of the effective use of independent (autonomous) filters to improve the harmonic content of the output parameters. The article also shows that the hybrid structure can be used in conjunction with high-harmonic filters to improve the input power factor and eliminate the problems of electromagnetic incompatibility.

Aim: To increase the effective application of various schematic objectives of modern high-power alternating current converters in industrial production, agriculture, and other fields through the use of dual energy conversion systems (DECs).

Methods: the most widely used double energy conversion systems (DECs) and simulation modeling methods were used to create powerful AC converters.

Results: The use of rectifiers with pulse width modulation and harmonic filter in the creation of dual energy converters, which are widely used in various industrial production processes, is explained by the fact that it is possible to improve the input power factor of the device, increase the input power factor of the device, and solve the problem of electromagnetic compatibility that may arise with the network, and the matrix structure of the converter allows you to increase or decrease the output voltage frequency relative to the primary source frequency, while increasing the reliability of the system.

Keywords: inverter, rectifier, pulse width modulation, switch, devices based on double energy conversion, converter, filters eliminating the influence of harmonics.

1. Kirish (Introduction)

So'nggi Aksariyat sanoat, ishlab chiqarish, qishloq ho'jaligi va boshqa sohalarda keng qo'llaniladigan uskunalarni ta'minotida talab etilgan amplituda va chastotali uch fazali o'zgaruvchan kuchlanishni talab qilinadi [1]. Sanoat, ishlab chiqarish va boshqa sohalarda o'zgaruvchan tok manbai sifatida keng qo'llaniladigan o'zgartgichlar quyidagilarni ta'minlaydi:

- uzluksiz elektr ta'minot manbalarida (UTM) chastotasi 50 Gts li chiqish kuchlanishining amplitudasini barqaror ushlab turish;
- asinxron motorli elektr yuritmalarida chiqish kuchlanishining parametrlarini rostdash.

Ushbu talablarni amalga oshiruvchi tarkibida o'zgartgichlar bo'lgan energetik qurilmalarida o'zgaruvchan kuchlanishining qiymatlari katta doirada o'zgaradi. Shuning uchun har xil turdagi yukmalarda barqaror yoki rostlanadigan elektr ta'minot tizimlarida qo'llaniladigan o'zgartgichlarga maxsus talablar qo'yiladi.

Ma'lumki, ikki tomonlama energiya o'zgartirish (IEO') tizimlarida o'zgaruvchan tok o'zgarmas tokga aylantiriladi va aksincha [2].

Bunday tizimlarning kirish qismida quyidagi qurilmalardan foydalanish mumkin:

- BT - boshqarilmaydigan to'g'irlagich (kopriksimon diodli to'g'irlagich);
- BOT - boshqariladigan to'g'irlagich (kopriksimon tiristorli to'g'irlagich);
- IKM li to'g'irlagich (IGBT tranzistorli kopriksimon to'g'irlagich).

IEO' tizimlarning chiqish qismida quyidagi qurilmalardan foydalanish mumkin:

- kichik chastotali KCH kommutator (chiqish kuchlanishining asosiy chastotasida kommutatsiyalanadigan tiristorli yoki IGBT tranzistorli ko'priklil inverter);
- IKM li inverter (IKM boshqaruviga ega IGBT tranzistorli ko'priklil inverter);
- bir qutbli IKM o'zgartirgich va KCH kommutator.

Bunda KCH li kommutatorlar asosan o'zgaruvchan tok elektr yuritmalarining o'zgartgichlarida qo'llaniladi.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Hozirgi kunda keng tarqalgan uzluksiz (kafolatlangan) elektr ta'minoti tizimlarida o'zgaruvchan tok kuchlanishiga aylantiriladigan past chastotali kommutator (PCHK) ko'p qo'llanilib kelmoqda.

Bunda uning vazifasi IKM li o'zgartirgichning chiqishidagi yarim to'liqinli sinusoidal kuchlanishni o'zgaruvchan kuchlanishga aylantirishdan iboratdir [3].

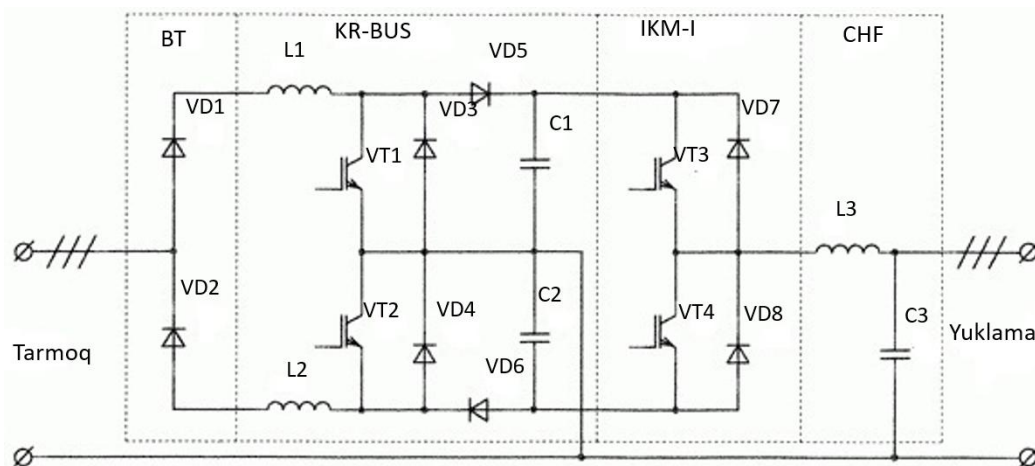
Bu qurilmalarda asosiy chastota bo'yicha sinusoidal kuchlanishini hosil qilishda maxsus filtrlar bilan birgalikda amaliyotda eng keng qo'llaniladigan o'zgartirgichlarining turi - bu IKM inverterlar.

So'nggi yillarda kuzatilgan yuqori tezlikli va yuqori quvvatli yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqish va joriy etishning sezilarli o'sishi quvvat o'zgartirgichlarining sxemalarida sezilarli o'zgarishlarga olib keldi [4]. Bu esa o'z navbatida energiya samarali qurilmalarini yaratishga sabab bo'lmoqda. Bunday yuqori samarali elektr texnik vositalar qatoriga matritsali va gibridli o'zgartirgichlar kiradi. Ularni qo'llash asosida quyidagi bir nechta amaliy masalalarni samarali hal etish mumkin:

- qurilmani quvvat koeffitsienti va foydali ishlash koeffitsienti qiymatlarini oshirish;
- qurilmani kirish va chiqish toklaridagi yuqori garmonikalarni kamaytirish;
- qurilmani massa-gabarit parametrlarini yaxshilash;
- qurilmaning quvvat diapazonini oshirish.

Energiyani ikki marta o'zgartirish asosidagi qurilmalar. Bugungi kunda energiyani ikki marta o'zgartirish asosidagi qurilmalarni yaratishning eng keng qo'llaniladigan usul - bu ikki marta energiyani o'zgartirish tizimlaridan (IEO') foydalanish hisoblanadi. Bunday qurilmalarining tarkibida o'zgarimas tok bo'g'inini bo'ladi. Bu bog'in o'zgaruvchan tok manbasidan energiyani to'plashni ta'minlaydi. Bu bo'g'inining tarkibida reaktiv elementlar - sig'im, induktivliklar bilan bir qatorda, o'zgarimas tok kuchlanishini pasaytiruvchi yoki oshiruvchi KR kuchlanish rostlagichi - buster ham bo'lishi mumkin [5].

Qurilma kirish qismi - to'g'irlagichdan va chiqish qismi - invertordan iborat bo'lib, ular o'zgarimas tok bo'g'inini bilan o'zaro ajratilgan bo'ladi. Odatda, oralig' o'zgarimas tok bo'g'inini tarkibida katta sig'im bo'ladi. U invertorni ta'minlash uchun zarur energiyani to'plash va pulsatsiyalarni silliq-lash uchun xizmat qiladi. Sig'im miqdorini belgilash invertorning yetarli dinamik xususiyatlarini ta'minlashdan va o'zgartirgichning ortiqcha yuklanish qobiliyatini yuqori qiymatlarini ta'minlashdan kelib chiqqan holda amlga oshiriladi. Bunda o'zgartirgichning o'zgarimas tok bo'g'inidagi kuchlanish qiymati taxminan 700-820 V oralig'ida olinadi. To'plovchi kondensatorlarning sig'imi qurilmani kirish kuchlanishi va yuklamasining keskin o'zgarishiga qaramasdan invertorni yetarli quvvat bilan ta'minlash uchun har bir 1 kVA chiqish quvvati uchun 470 - 660 mkF oralig'idagi sig'im olinadi. Shunday qilib, oralig' o'zgarimas tok bo'g'inini kirish kaskadi (to'g'irlagich) uchun sig'im xarakterini belgilaydi, bu esa o'z o'rnida tizimning kirish tokining spektral tarkibiga ta'sir qiladi.



1-rasm. Busterli IEO' tizim

Fig.1. DECs systems with buster

Bugungi kunda uzluksiz quvvat manbalari (UQM) da ishlatiladigan zamonaviy IEO' tizimlaridan biri 1-rasmda keltirilgan [2, 3]. Rasmda shartli ravishda bitta ko'prik to'g'irlagich va bitta ko'prik inverter tasvirlangan. Bunday tuzilmaning o'ziga xos xususiyati, bu - o'zgarimas tok bo'g'inlarida boshqarilmaydigan VD1, VD2 to'g'irlagichlari va KR-BUS kuchlanishni oshirish rostlagichning (buster) qo'llanilishidir. Uning sxemasi quyidagi elementlardan: IGBT ikkita tranzistor (VT1 va VT2), diodlar (VD5 va VD6), drossellar (L1 va L2) hamda jamlovchi (C1 va C2) kondensatorlardan iborat. Qurilma quyidagi funktsional vazifalarni amalga oshiradi:

- invertorni ta'minlovchi kirish kuchlanishni barqarorlashtiradi;
- o'zgarimas tokning musbat va manfiy shinalaridagi kuchlanishni neytralga nisbatan muvofiqlashtiradi va bu orqali chiqish kuchlanishida o'zgarimas komponentning paydo bo'lishini bartaraf etadi.

Bunday tuzilishdagi IKM-invertorni asosida VT3 va VT4 sifatida IGBT-tranzistorlar bo'lib, ular sinusoidal qonunga muvofiq modulyatsiyalangan keng impulslar bilan boshqariladi [2].

O'zgartirgichning kirish qismida boshqarilmaydigan yoki boshqariladigan to'g'irlagich qo'llaniladigan ikki marta energiyani o'zgartiruvchi qurilmalarning energetik ko'rsatkichlarini belgilashda quyidagilarga asoslanadi. O'zgartirgich bu chiziqli bo'lmagan to'rt qutbli bir tomonlama element va uning tarkibida o'zgaras tok bo'g'ini bo'lib, u boshlang'ich quvvat manbai va yuklamani ajratib turadi. Qurilmani quvvat koeffitsientini ta'rifiga ko'ra, u reaktiv va buzilish quvvatlarining qurilmaning energetik samaradorligiga ta'sirini ko'rsatuvchi omil hisoblanadi. Umuman olganda, IEO' qurilmalari qiymatlari xar hil bo'lgan ikkita quvvat koeffitsientlari bilan tavsiflanadi: tarmoqqa nisbatan - kirish (K_{pkr}) va yuklamaga nisbatan - chiqish (K_{pchiq}).

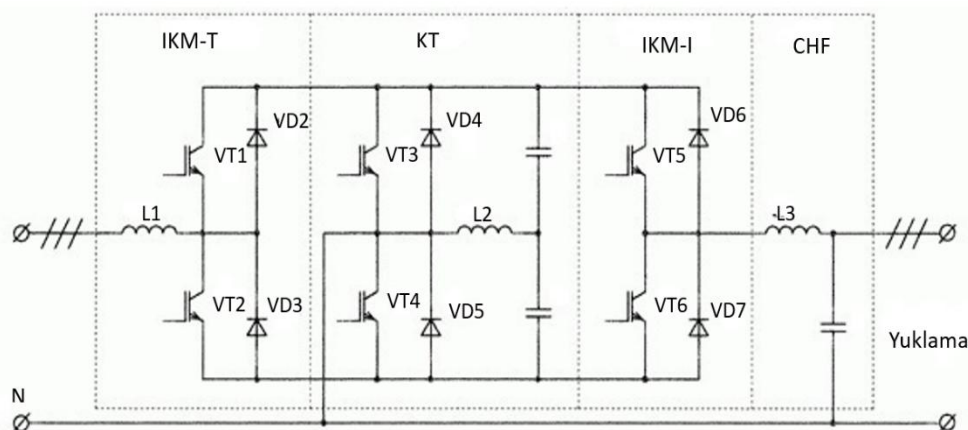
Uch fazali to'g'irlagichning ko'prik sxemasida kirish zanjiridagi reaktiv quvvat va buzilish quvvatlarining tok bo'yicha tarkibiy qismlari tizimning kirish konturida tutashadilar. Bunda o'zgaras tok bo'g'inining filtri parametrlariga (bu tarmoqdan iste'mol qilinadigan tok shakliga ta'sir qiladi) hamda tizimning yuklanish darajasiga bog'liq bo'ladi.

Invertorning chiqishidagi reaktiv quvvat komponenti va buzilish quvvatining yuqori chastotali harmonikalar yuklama, inverter va o'zgaras tok bo'g'in filtrining sig'imi o'rasida almashib turadilar. Ular o'zgartirgichning kuch zanjirining qayd etilgan konturida o'zaro tutashib, tizimning kirish zanjirida ko'rinmaydi va ularning qiymatlari faqat yuklamaning quvvat koeffitsientiga bog'liq bo'ladi.

Kirish qismida boshqarilmaydigan yoki boshqariladigan to'g'irlagichli o'zgartirgichlarining asosiy kamchiliklari quyidagilardan iborat:

- o'zgaras tok bo'g'inining tarkibida chiqish transformatori va katta hajm egallaydigan kondensatorlar bo'lganligi sababli ularning massa va hajm ko'rsatkichlarining yuqoriligi;
- katta sig'imli kondensatorlarning mavjudligi sababli ishlash harorat diapazonini cheklanganligi;
- IGBT tranzistorli IKM -invertorning imkoniyatlari cheklanganligi sababli quvvat diapazonining ma'lum bir chegarasi, bu esa tranzistorlarining kommutatsiyasida vujudga keladigan yuqori qiymatli yo'qotishlar tufayli tizimda noxush elektromagnit o'zaro ta'sirlarga olib kelishligi;
- kirish tokining sinusoidal shaklini buzilishi sababli tizimning kirish quvvat koeffitsienti nisbatan past bo'lganligi [3].

IKM - to'g'irlagich tizimlari. So'nggi yillarda paydo bo'lgan bu turdagi o'zgartirgichlarning tuzilish tarkibi 2-rasmda ko'rsatilgan. U quyidagi qismlar asosida amalga oshirilgan: ikki tomonlama ko'prikli IKM - to'g'irlagich (IKM-T), kuchlanish tenglashtirgichi (KT) va IKM - inverter (IKM -I). Rasmda to'g'irlagichning bitta fazasi tasvirlangan IKM - to'g'irlagich o'z ichiga tranzistorlar VT1, VT2, faza drosellar L1 va energiyani yeg'uvchi kondensatorlar C1, C2 oladi. Tranzistorlar VT1 va VT2 teskari diodlar VD1 va VD2 bilan shuntlangan. Bunday o'zgartirgichlar uzluksiz elektr ta'minot manbalarida hamda zamonaviy o'zgaruvchan tok elektr yuritmalarda keng doirada qo'llanilmoqda [4-6].



2-rasm. IKM - to'g'irlagichli IEO' tizimi

Fig. 2. DECs systems with PWM-rectifier

IKM - to'g'irlagichning funksional vazfalari quyidagilardan iborat:

- yuklama keng diapazonda o'zgaranda ham, yuqori kirish quvvat koeffitsienti (0.99) qiymatini ta'minlash;
- o'zgaras tok kuchlanishini invertorning ta'minot shinalarida rostlash;
- invertorning kirish tokini cheklash orqali uning kirish quvvatini boshqarish;
- ikki tomonlama energiya uzatish (energiya rekupersiyasi) xususiyatidan foydalanib, o'zgartirgichning energetik va dinamik ko'rsatkichlarini yaxshilash.

IKM to'g'irilovchining boshqarish usuli kirish toki va chiqish kuchlanishini alohida boshqarishga

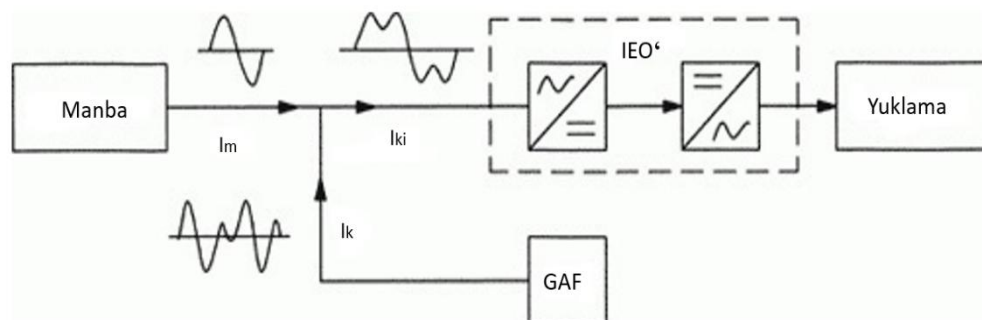
asoslanadi. Bu funktsiyalar tranzistorlarni 7,5-15 kHz chastotada kommutatsiya qilish orqali IKM boshqaruvining sinusoidal qonuni yordamida amalga oshiradi. Bunda kirish tokining fazasi kirish kuchlanishining fazasi bilan mos keladigan va shakli deyarli sinusoidal bo'lishligini ta'minlanadi. Shuningdek, sxemaning kirishida kuchlanishni tenglashtiruvchi (KT) vositasi qo'llanilgan bo'lib, tarkibi ikki IGBT-tranzistorlar VT3 va VT4 hamda yig'uvchi sig'imlar C1 va C2 ning o'rta nuqtasiga ulangan L2 induktivlikdan iborat. Qurilma o'zgaras tok differensial kuchlanishini balanslashni ta'minlovchi vosita bo'lib, invertorning ta'minot shinalaridagi kuchlanishni simmetriyalab, shu orqali uning tarkibidagi doimiy tashkil etuvchisini bartaraf etishni amalga oshiradi. Bundan tashqari, tenglashtirgich yig'uvchi kondensatorlardagi tok pulsatsiyalarini kamaytiradi.

Uch fazali IKM - inverter tuzilishi bo'yicha busterli ko'priqli inverter bilan o'xshash bo'lib, invertorning chiqish kuchlanishining 50 Hz lik asosiy garmonikani ajratadigan L-C filtrga ega.

IKM - to'g'rilagichli o'zgartirgichlarning kamchiliklariga quyidagilar kiradi:

- sxemada kuchli IGBT - tranzistorlarning soni ko'pligi va yopiq holatdagi tranzistorlarda sezilarli impulsli ortiqcha kuchlanishlarning paydo bo'lishligi;
- IKM - to'g'rilagichning tranzistorlarini boshqarishning sxemasi murakkabigi, bunda nafaqat tok va kuchlanish qiymatlari, balki ularning fazaviy siljishi haqidagi ma'lumotlarni ham talab etilishi;
- katta sig'imli va yuqori ishchi kuchlanishga ega bo'lgan elektrolitik kondensatorlarning mavjudligi.

Garmonikalar ta'sirini bartaraf etuvchi filtrlar. Garmonikalar ta'sirini bartaraf etuvchi aktiv filtrlar (GAF) vazifasi o'zgartirgichning yuklamasi nochiqli xarakterga ega bo'lgan holatlarda kirish tokning sinusoidal shaklini ta'minlashdan iborat bo'ladi [7]. Bunday yuklanish sifatida boshqarilmaydigan yoki boshqariladigan to'g'rilagichga ega bo'lgan o'zgartirgich bo'lishi mumkin. GAF o'zgartirgichning kirishidagi tokning garmonik tarkibini tahlil qiladi. Shuningdek o'zgartirgich kirish tokining ulanish nuqtasida kirish toki bilan fazasi bo'yicha qarama-qarshi bo'lgan yuqori garmonikali tokni generatsiya qiladi. Natijada, yuqori garmonikalar kompensatsiyalanadi (neytrallanadi) va o'zgartirgichning kirishidagi tokning shakli sinusoida ko'rinishida bo'ladi (3-rasmga qarang).



3-rasm. GAF li IEO^o tizimining tuzilish sxemasi

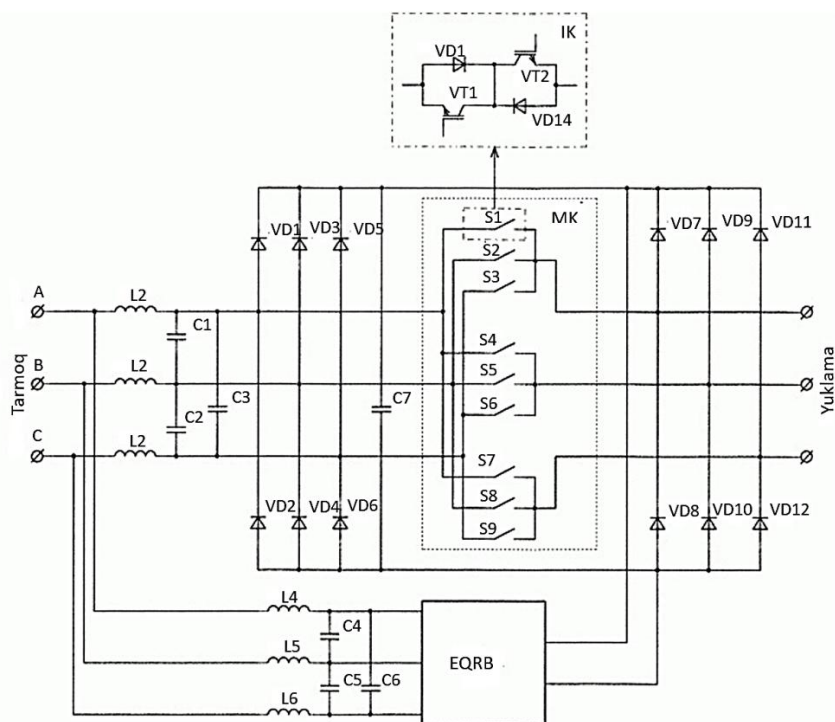
Fig. 3. Structural diagram of the DECs system with GAF

O'zgartirgichlarning gibrid tuzilmalari. O'zgartirgichlarning gibrid tuzilmalarini paydo bo'lishi bir qator sabablarga bog'liq bo'lgan. Birinchi sabab - boshqarilmaydigan to'g'rilagichlar bilan ishlatiladigan o'zgartirgichlar orqali birlamchi energiya manbalari bilan bog'liq EMM (elektromagnit muvofiqlik) muammosini hal qilishdir. Ikkinchi sabab - ikki marta energiyani o'zgartiruvchi qurilmalarda kirish quvvat koeffitsientini oshirish mumkinligidir. Uchinchi sabab - yuklamaga nisbatan o'zgartirgichning elektromagnit muvofiqligini ta'minlash imkoniyati mavjudligi [8].

Gibrid tuzilmalarning ishlash printsiplari ikki marta energiyani o'zgartiruvchi qurilmalar va garmonikalar ta'sirini bartaraf etuvchi filtr tizimlarining o'zaro parallel ishlashiga asoslangan. Filtrning ulanish joyiga ko'ra gibrid tizimlar filtrning kirish qismiga ulanganida qurilmaning ta'minot manbasidan iste'mol qilinadigan tokning shaklini sinusoidal qilib ta'minlash vazifasi hal etadi. O'z o'rnida, bunday gibrid o'zgartirgichlarning tuzilmalari ikki kichik nimgurugha bo'linishi mumkin:

- Garmonikalar ta'sirini bartaraf etuvchi mustaqil (avtonom) filtrlar;
- Garmonikalar ta'sirini bartaraf etuvchi bog'langan (o'rnatilgan) filtrlar.

O'zgartirgichning matritsali tuzilmasi. Matritsa tuzilmasining tarkibiga kiruvchi oraliq o'zgaras tok bo'g'ini energiyani yig'masdan o'zgaruvchan tok manbasining parametrlarini (amplituda va chastota) yuklamani ta'minlantirish uchun zarur bo'lgan kuchlanishga aylantirishni ta'minlaydi [9]. Chunki bu toifadagi o'zgartirgichlarning tarkibida katta sig'imga ega kondensatorlar qo'llanilmaydi va shu xususiyat asosida ular kichik hajmli o'zgartirgichlarni yaratish imkonini beradi. Bundan tashqari, ularning tarkibida yuqori haroratlarda zaif bo'lgan elektrolitik katta sig'imli kondensatorlar bo'lmaganligi sababli ishlaydigan harorat diapazoni hamda buzilmasdan ishlaydigan muddati kattaroq bo'ladi.



4-rasm. O'zgartirgichning matritsali tuzilmasi. IK - ikki yo'nalishli kalit, MK - matritsa kommutatori, EQRB - energiyani qayta tiklash yoki rekuperatsiya qilish bloki

Fig. 4. Matrix structure of the converters. IK - bidirectional switch, MK - matrix switch, EQRB - energy recovery or recuperation unit

Matritsa tuzilmasidagi o'zgartirgichning prototipi sifatida tiristorlarda to'g'ridan-to'g'ri chastota o'zgartirgichlari bo'lgan deb aytish mumkin [9]. Biroq, bunday o'zgartirgichlarning qo'llanilishi, chiqish kuchlanish chastotasiga nisbatan, birlamchi o'zgaruvchan tok manbasining chastotasi yuqori bo'lishi bilan cheklangan edi.

Zamonaviy matritsa o'zgartirgichi 9 ta ikki yo'nalishli kalit asosida tuzilgan bo'lib, ular uch fazali yuklamani ixtiyoriy fazasini uch fazali kirish kuchlanishining ixtiyoriy fazasiga ulashga qodir (4-rasm). Har bir ikki yo'nalishli kalit IK, diodlar bilan shuntlangan ikki qarama-qarshi yo'nalishdagi IGBT tranzistorlardan iborat bo'ladi.

Induktiv xarakterdagi yuklamada kalitlar almashinuvi impulsli ortiqcha kuchlanishlarning paydo bo'lishiga olib kelishi mumkinligini qayd etish kerak. Kuchlanish o'ta oshib ketishlarini kamaytirish uchun o'zgartirgichning kirish va chiqishiga ulangan uch fazali diod ko'priklari va umumiy sig'imdan iborat demperlash (pasaytiruvchi) sxemasi ishlatilishi mumkin. Kalitlar almashinuvida sig'imda yig'ilgan energiya ballast rezistoriga o'tkaziladi yoki maxsus qayta tiklash yoki rekuperatsiya-energiyani qaytarish bloki (EQRB) yordamida tarmoqqa qaytariladi. Demperlovchi kondensatoridagi kuchlanishni nazorat qilish uchun, agar kuchlanish belgilangan qiymatdan ohsa, o'zgartirgichga o'chirish bloki kiritilgan. Ushbu blok, shuningdek, IGBT tranzistorlari va ularning drayverlarining ishini nazorat qilish uchun ishlatiladi. Kalitlarning tok bo'yicha himoyasi dasturiy va apparat darajada amalga oshiriladi. Kalitlarning yuklanish haqidagi ma'lumotlari o'zgartirgichning har bir kirish va chiqish fazasida o'rnatilgan yuqori tezlikdagi tok sensori orqali keladi. Kirish L-C filtri o'zgartirgichning va birlamchi quvvat manbai bilan EMM mos kelishini ta'minlaydi.

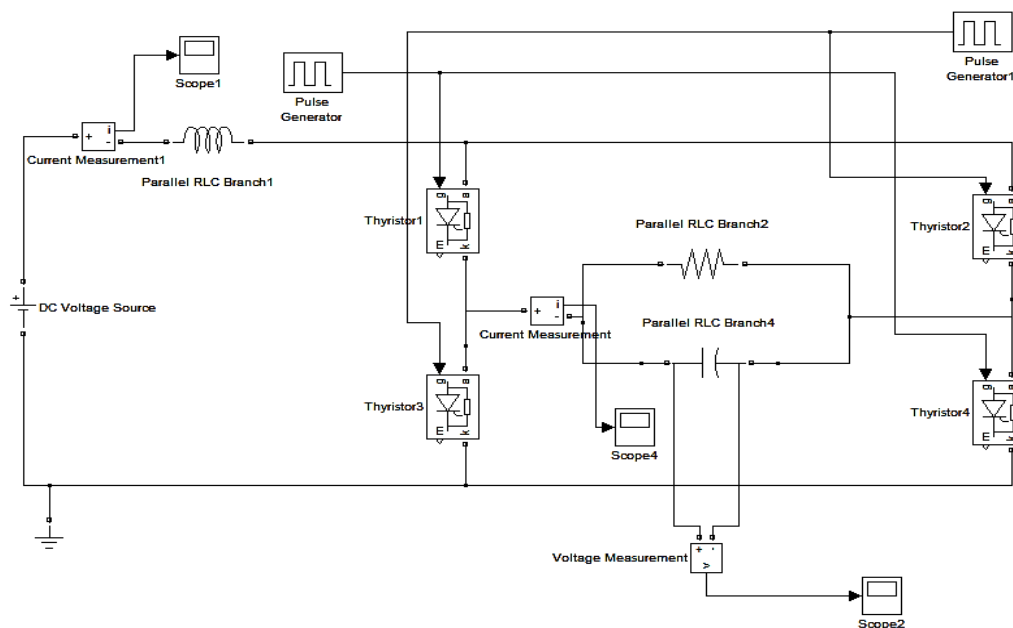
O'zgartirgichning matritsali tuzilmasi birlamchi manba chastotasiga nisbatan chiqish kuchlanishi chastotasini oshirish yoki kamaytirishga imkon beradi. Bundan tashqari, matritsali tuzilmasidan foydalanish tizimning ishonchliligini oshiradi. Agar birlamchi manbaning bir fazasi ishlamay qolsa, IK boshqaruv algoritmi kirish kuchlanishining qolgan fazalari bilan ishlashga moslashtirilishi mumkin, natijada chiqish kuchlanishi sifati pasayadi, ammo elektr yuritmaning ishlashi uchun yetarli bo'ladi [10].

Tadqiqot usuli. Ma'lumki, o'zgaruvchan tok kuchli o'zgartirgichlarini tadqiqotlash ikki asosiy matematik model guruhiga asoslanib amalga oshirilishi mumkin: analitik va imitatsion usullar [10]. Bunda analitik modellashtirish quyidagi holatlarda yanada samarali bo'ladi:

- imitatsion modellashtirish yordamida olingan natijalarining aniqligini tekshirish uchun;
- silliq tarkibiy qismlar usuliga asoslangan holda raqamli tadqiqotda boshlang'ich shartlarni tezkor olish uchun.

Imitatsion modellashtirishning afzalliklari:

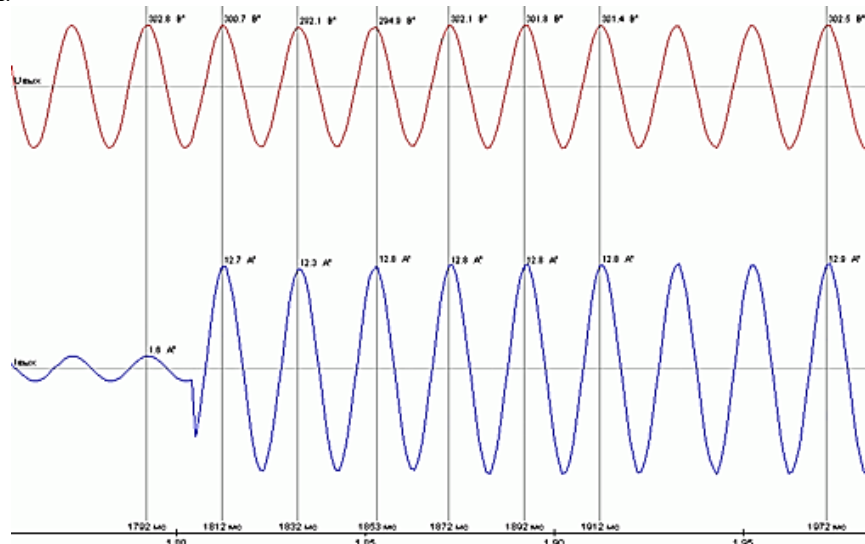
- hisoblash natijalarini avtomatlashtirib qayta ishlash va keyinchalik kerakli texnik hujjatlarni chop etish (yoki olish);
 - ko'rgazmalilik va natijalarni jadval yoki grafik ko'rinishda olish imkoniyati.
- Ushbu ishda yuqorida keltirilganlarni hisobga olgan holda, o'zgaruvchan tok kuchli o'zgartgich uchun imitatsion modellashtirish usuli qabul qilind. Quyidagi 5-rasmda o'zgartgichning imitatsion modeli ko'rsatilgan



5-rasm. O'zgartgichning imitatsion modeli
Fig. 5. Simulation model of the converters

3. Natijalar (Results)

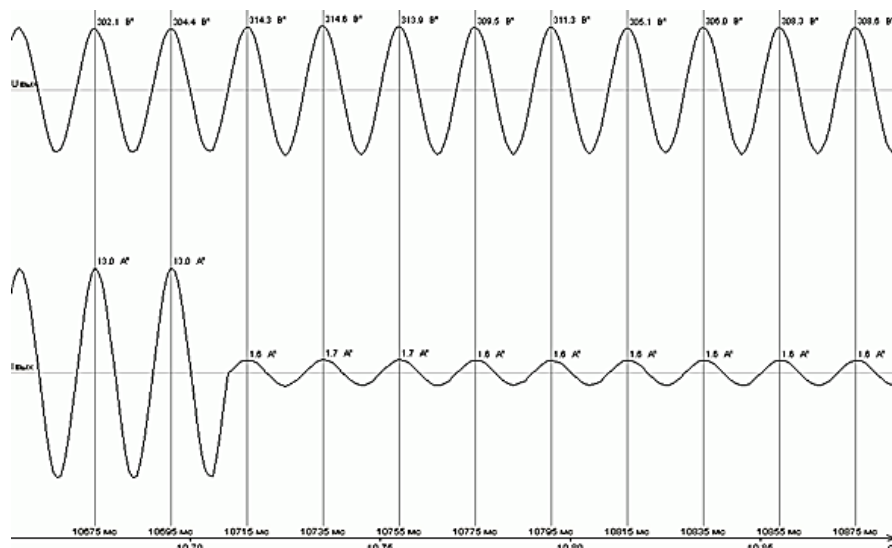
Yuqorida 5-rasmda ko'rsatilgan o'zgartgichning ishlab chiqilgan imitatsiya modelidan foydalanib, yuklama o'zgarishi paytida o'zgartgichning o'tkinchi jarayonlari uchun vaqt diagrammalari olingan. Simulyatsiya natijasida olingan tok va kuchlanishlarning vaqt diagrammalari quyida 6 va 7 rasmlarda ko'rsatilgan.



6-rasm. Chiziqli yuklamani qo'shish jarayoni
Fig. 6. The process of adding a linear load

Ma'lumotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, chiziqli yuklamaning 100% gacha oshishi natijasida chiqish kuchlanishi barqaror holat qiymatini avval 3,5% ga pasayadi va so'ngra 60 millisekund ichida dastlabki darajasiga qaytadi (6-rasm). Shuni ta'kidlash kerakki, uzluksiz quvvat manbaining (UQM) statik barqarorlik aniqligi $\pm 2\%$ ni tashkil etadi.

100% chiziqli yuklamaning keskin tushirilishi natijasida chiqish kuchlanishi 4% ga oshgani va 100 millisekund ichida barqaror holat qiymatiga qaytgani qayd etilgan (7-rasm).



7-rasm. Chiziqli yuklamani tushirish jarayoni
Fig.7. Linear load unloading process

4. Munozara (Discussion)

Ushbu tadqiqotda shakllantirilgan maqsadga muvofiq holda, keng qo'llaniladigan kuchli o'zgaruvchan tok o'zgartirgichlarning zamonaviy rivojlanish yo'nalishlari tahlil qilindi. O'tkazilgan tahlil shuni ko'rsatdiki, ikki marta energiyani o'zgartirish IEO' tizimining elektr sxemasi va funksional vazifalari, shuningdek, impuls kengligi modulyasiyalı (IKM) inverterning texnik va sxematik imkoniyatlari, gibrid va matritsali strukturasi, hamda chiqish parametrlarining garmonik tarkibini yaxshilash uchun mustaqil (avtonom) filtrlardan samarali foydalanish muhim ahamiyatga egaligi ko'rsatilgan.

Gibrid strukturaning yuqori garmonikali filtrlar bilan birgalikda ishlatilishi orqali kirish quvvat koeffitsientini oshirish va elektromagnit mos kelmaslikning oldini olish muammolarini bartaraf etish mumkinligi qayd etildi. Bu esa IEO' o'zgartirgichning matritsali tuzilmasi birlamchi manba chastotasiga nisbatan chiqish kuchlanishi chastotasini oshirish yoki kamaytirishga imkon berishi va shu bilan birga tizimning ishonchligini oshirish mumkinligini isbotlaydi.

Simulyatsiya modeli asosida o'zgartirgichning yuklamasi o'zgarishi paytida olingan natijalarga ko'ra, chiziqli yuklamaning 100% gacha oshishi natijasida chiqish kuchlanishi barqaror holat qiymati avval 3,5% ga pasayadi va so'ngra 60 millisekund ichida dastlabki darajasiga qaytadi. Shuni ta'kidlash kerakki, uzluksiz quvvat manbaining (UQM) statik barqarorlik aniqligi $\pm 2\%$ ni tashkil etadi.

O'zgartirgichlarning chiqish qismiga ulangan filtr bilan qurilgan gibrid tuzilmalari qurilmani qo'llanilishi kirish quvvat koeffitsientini oshirish hamda tarmoq bilan vujudga kelishi mumkin bo'lgan elektromagnit muvofiqlik muammosini bartaraf etilishini ko'rsatadi. O'zgartirgichning matritsali tuzilmasi birlamchi manba chastotasiga nisbatan chiqish kuchlanishi chastotasini oshirish yoki kamaytirishga imkon beradi va shu bilan birga tizimning ishonchligini oshiradi.

5. Xulosa (Conclusion)

1. Ikki marta energiyani o'zgartiruvchi qurilmalarni yaratishda impuls kengligi modulyasiyalı va garmonikalarni bartaraf etuvchi filtrlı to'g'rilagichlardan foydalanish qurilmaning kirish quvvat koeffitsientini yaxshilash va tarmoq bilan EMM muammolarini hal qilish imkoniyatini beradi.

2. O'zgartirgichlarning chiqish qismiga ulangan GAF bilan qurilgan gibrid tuzilmalari qurilmaning kirish quvvat koeffitsientini oshirish hamda tarmoq bilan vujudga kelishi mumkin bo'lgan elektromagnit muvofiqlik muammosini hal qilish imkoniyati beradi.

3. O'zgartirgichning matritsali tuzilmasi birlamchi manba chastotasiga nisbatan chiqish kuchlanishi chastotasini oshirish yoki kamaytirishga imkon beradi va shu bilan birga tizimning ishonchligini oshiradi.

ADABIYOT

1. Аллаев К.Р. Современные сценарии трансформации энергетики мира и Узбекистана //Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. – 2021. – № 1. – С. 11-27.
2. Сапаев X.B., Умаров Sh.B., Боқижонов U.A. Modern development trends of high-power AC converters//Problems of energy and sources saving. – 2025. – № 88. – pp. 76-87.



3. Климов В.П. Источники бесперебойного питания серии ДПК средней мощности// Электрическое питание. – 2006. –№2. – С. 97–109.
4. Murot Tulyaganov, Shukhrat Umarov. Improving the energy and operational efficiency of an asynchronous electric drive. III International Scientific and Technical Conference “Actual Issues of Power Supply Systems” (ICAIPSS2023) AIP Conf. Proc. 3152, 030014-1–030014-6; <https://doi.org/10.1063/5.021887>
5. Климов В.П., Москалев А.Д. Способы подавления гармоник в системах электропитания// Практическая силовая электроника. – 2003. – №6. – С. 18-24.
6. Kyo-Beum Lee, Frede Blaabjerg Reduced Order Extended Luenberger Observer Based Sensorless Vector Control Driven by Matrix Converter with Nonlinearity Compensation, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.53, no.1, 2006.
7. Умаров Ш.Б. Сопоставительный анализ по форме выходного напряжения двух схем автономных инверторов тока//Energiya va resurs tejash muammolari. – 2024. – Maxsus son (№86). – С. 79-88.
8. S.Kwak, H.A. Toliyat A Hybrid Converter System for High Performance Large Induction Motor Drives, IEEE Proc. APEC'04, vol.1, 2004.
9. A. Arias, C.A. Silva, G.M. Asher, J.C. Clare, P.W. Wheeler Use of a Matrix Converter to Enhance the Sensorless Control of a Surface Mount Permanent Magnet AC Motor at Zero and Low frequency, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.53, no.2, 2006.
10. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б. Исследование динамических режимов источников питания на основе автономных источников тока. Монография. – Т.: Изд-во Университет. –2021. –122 с.
11. Mahendra Lalwani, D. P. Kothari, Mool Singh, Investigation of Standalone Current Source Inverter for Photovoltaic System. International Journal of Physical and Mathematical Sciences Vol 3, No 1 (2012), pp. 91-97
12. Alam, K.S., Xiao, D., Zhang, D., et al.: ‘Single-phase multicell AC-DC converter with optimized controller and passive filter parameters’, IEEE Trans. Ind. Electron., 2019, 66, (1), pp. 297–306.
13. Norkhojaeva, N.N., Pirmatov, N.B., Kamalov, N.K. Mathematical model for calculating transients of a single-pole synchronous machine of longitudinally transverse excitation. E3S Web of Conferences, 2023, 402, 10041 / DOI 10.1051/e3sconf/2023402100410.
14. Hongru Yu, Jianhui Su, Haining Wang, Yiding Wang, Yong Shi., Modelling method and applicability analysis of a reduced-order inverter model for microgrid applications IET Power Electron., 2020, 13, pp. 2638-2650.
15. Han, Y, Yang, M., Yang, P., et al.: ‘Reduced-order model for dynamic stability analysis of single-phase islanded microgrid with BPF-based droop control scheme’, IEEE Access, 2019, 7, pp. 157859–157872.
16. Nikolakakos, I.P., Zeineldin, H.H., El-Moursi, M.S., et al.: ‘Reduced-order model for inter-inverter oscillations in islanded droop-controlled microgrids’, IEEE Trans. Smart Grid, 2018, 9, (5), pp. 4953–4963.

REFERENCES

1. Allaev K.R. Modern scenarios of energy transformation in the world and Uzbekistan // Energy va resource tezhash muammolari. – 2021. – № 1. – pp. 11-27. (In Russ.).
2. Sapaev X.B., Umarov Sh.B., Boqijonov U.A. Modern development trends of high-power AC converters//Problems of energy and sources saving. – 2025. – № 88. – pp. 76-87.
3. Klimov V.P. Uninterruptible power supplies of the DPK series of medium power// Electrical power supply. – 2006. –№2. – pp. 97–109. (In Russ.).
4. Murot Tulyaganov, Shukhrat Umarov. Improving the energy and operational efficiency of an asynchronous electric drive. III International Scientific and Technical Conference “Actual Issues of Power Supply Systems” (ICAIPSS2023) AIP Conf. Proc. 3152, 030014-1–030014-6; <https://doi.org/10.1063/5.021887>.
5. Klimov V.P., Moskalov A.D. Methods of suppressing harmonics in power supply systems// Practical power electronics. – 2003. – No. 6. – pp. 18-24. (In Russ.).
6. Kyo-Beum Lee, Frede Blaabjerg Reduced Order Extended Luenberger Observer Based Sensorless Vector Control Driven by Matrix Converter with Non-linearity Compensation, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.53, no.1, 2006.
7. Umarov Sh.B. Comparative analysis of the output voltage shape of two autonomous current inverter circuits// Energy va resource tezhash muammolari. – 2024. – Special issue (№ 86). – pp. 79-88. (In Russ.).
8. S.Kwak, H.A. Toliyat A Hybrid Converter System for High Performance Large Induction Motor Drives, IEEE Proc. APEC'04, vol.1, 2004.



9. A. Arias, C.A. Silva, G.M. Asher, J.C. Clare, P.W. Wheeler Use of a Matrix Converter to Enhance the Sensorless Control of a Surface Mount Permanent Magnet AC Motor at Zero and Low frequency, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.53, no.2, 2006.
10. Sapaev X.B., Umarov Sh.B. Study of dynamic modes of power supplies based on autonomous current sources. Monograph. – T.: University Publishing House. –2021. –122 p. (In Russ.).
11. Mahendra Lalwani, D. P. Kothari, Mool Singh, Investigation of Standalone Current Source Inverter for Photovoltaic System. *International Journal of Physical and Mathematical Sciences Vol 3, No 1 (2012)*, pp. 91-97.
12. Alam, K.S., Xiao, D., Zhang, D., et al.: ‘Single-phase multicell AC-DC converter with optimized controller and passive filter parameters’, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2019, 66, (1), pp. 297–306.
13. Norkhojaeva, N.N., Pirmatov, N.B., Kamalov, N.K. Mathematical model for calculating transients of a single-pole synchronous machine of longitudinally transverse excitation. *E3S Web of Conferences*, 2023, 402, 10041 / DOI 10.1051/e3sconf/2023402100410.
14. Hongru Yu, Jianhui Su, Haining Wang, Yiding Wang, Yong Shi., Modelling method and applicability analysis of a reduced-order inverter model for microgrid applications *IET Power Electron.*, 2020, 13, pp. 2638-2650.
15. Han, Y, Yang, M., Yang, P., et al.: ‘Reduced-order model for dynamic stability analysis of single-phase islanded microgrid with BPF-based droop control scheme’, *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 157859–157872.
16. Nikolakakos, I.P., Zeineldin, H.H., El-Moursi, M.S., et al.: ‘Reduced-order model for inter-inverter oscillations in islanded droop-controlled microgrids’, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2018, 9, (5), pp. 4953–4963.