

### Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»

FTAMP 44.29.37  
ЭОЖ: 621.3

DOI [10.53002/034](https://doi.org/10.53002/034)

Б.А.Жаутиков, Д.Б.Ахатов, С.Н.Камарова, В.М.Дружинин, А.В.Никульшин

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау., Қазақстан*  
(E-mail: [bakhyt.zhautikov@ttu.edu.kz](mailto:bakhyt.zhautikov@ttu.edu.kz), [s.kamarova@ttu.edu.kz](mailto:s.kamarova@ttu.edu.kz), [v.druzhinin@ttu.edu.kz](mailto:v.druzhinin@ttu.edu.kz),  
[a.nikulshin@ttu.edu.kz](mailto:a.nikulshin@ttu.edu.kz))

#### Қазақстан энергетикалық жүйесіне HVDC технологияларын енгізудің тұжырымдамалық негізі

Мақалада тұрақты токтың жоғары кернеулі (HVDC) электр энергиясын жеткізу технологиялары, соның ішінде LCC және VSC түрлендіргіштері қарастырылады. Дәстүрлі HVAC жүйелерімен салыстырмалы талдау жүргізіліп, HVDC технологиясының жоғалтуларды азайту және жүйенің тұрақтылығын арттырудағы артықшылықтары анықталды. Қытай мен Үндістанның халықаралық тәжірибесі зерттеліп, Қазақстандағы аймақтық энергетикалық теңгерімді ескере отырып, HVDC енгізу перспективалары ұсынылды. Павлодар–Алматы бағыты бойынша HVDC желісінің тұжырымдамалық моделі әзірленді. Зерттеу нәтижелері HVDC технологиясының энергетикалық жүйені жаңғырту, жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау және елдің энергетикалық қауіпсіздігін арттырудағы әлеуетін көрсетеді.

*Түйін сөздер:* HVDC, электр энергиясын беру, жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК), тұрақты токпен берілетін инфрақұрылым.

#### *Кіріспе*

Қазіргі уақытта энергия тұтынудың өсуі мен жаңартылатын энергия көздерінің үлесінің артуы электр энергиясын беру жүйелерін жаңғыртудың өзектілігін арттырып отыр [1-2]. Тұрақты токтың жоғары вольтты беру технологиялары (HVDC) электр энергиясын жеткізу кезіндегі шығындарды едәуір азайтуға, энергиямен жабдықтаудың сенімділігі мен икемділігін қамтамасыз етуге, сондай-ақ генерация мен тұтыну орналасқан қашық аймақтарды тиімді біріктіруге мүмкіндік береді [3-4]. Мақалада HVDC түрлендіргіштерінің негізгі түрлері – LCC және VSC қарастырылып, дәстүрлі айнымалы ток жүйелерімен (HVAC) салыстырмалы талдау жүргізілген, халықаралық тәжірибе (Қытай, Үндістан) сарапталып, Қазақстан энергетикалық жүйесіне HVDC енгізудің жолдары ұсынылған [5-7]. Ұсынылған тұжырымдамалық модель ұлттық энергетикалық жүйенің тиімділігі мен тұрақтылығын заманауи технологиялар есебінен арттыру мүмкіндіктерін көрсетеді [8].

#### *Материалдар мен әдістер*

Зерттеу барысында тұрақты токтың жоғары кернеулі берілуі (HVDC) технологиялары бойынша ғылыми және ресми дереккөздердегі өзекті мәліметтер жиналды. Негізгі материалдар ретінде халықаралық ғылыми мақалалар, шолу еңбектер, техникалық есептер, сондай-ақ Қазақстан Республикасының Энергетика министрлігінің ресми интернет-ресурстарындағы деректер пайдаланылды [1, 3, 7].

Ақпаратты іздеу үшін Scopus, Google Scholar, ScienceDirect сияқты ғылыми дерекқорлар қолданылды. Сонымен қатар, Қазақстанның энергетика саласындағы ағымдағы жағдайы мен даму жоспарларына қатысты ақпаратты алу үшін Энергетика министрлігінің ресми сайтындағы мәліметтер қарастырылды [7, 9].

Материалдарды таңдау кезінде жарияланған мерзімі, тақырыптың мақала мазмұнына сәйкестігі, HVDC және айнымалы ток жүйелері (HVAC) бойынша техникалық-экономикалық салыстыру

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

мәліметтерінің болуы ескерілді [4, 10, 11]. Сондай-ақ Қытай мен Үндістандағы жүзеге асырылған жобаларға қатысты нақты деректер назарға алынды [5, 6].

Жиналған ақпараттар келесі зерттеу әдістері арқылы талданды:

1. **Салыстырмалы талдау** – HVDC және HVAC желілерінің, сондай-ақ LCC және VSC түрлендіргіштерінің техникалық ерекшеліктері мен артықшылықтарын салыстыру үшін қолданылды [3, 12, 13].

2. **Халықаралық тәжірибені зерделеу** – Қытай мен Үндістандағы жобаларды қарастыра отырып, Қазақстанның энергетикалық жүйесіне бейімдеуге болатын тәсілдер айқындалды [5, 6, 14].

3. **Техникалық шешімдерді жалпылау** – Павлодар–Алматы бағыты бойынша ұсынылған HVDC желісінің тұжырымдамалық моделін қалыптастыруға негіз болды [8, 15].

Бұл зерттеу бұрынғы жарияланған материалдарды талдау негізінде жүргізіліп, тәжірибелік немесе модельдік есептеулерді қамтымайды.

#### *Негізгі бөлім*

HVDC жүйесінде электр станцияларымен өндірілетін айнымалы ток (AC) түзеткіш станциясында тұрақты токқа (DC) түрлендіріледі, содан кейін желі арқылы беріледі және қабылдаушы энергетикалық жүйеге жіберілмес бұрын инверторлық станцияда қайтадан айнымалы токқа түрленеді [3]. Мұндай тәсіл арқылы 100 МВт-тан 10000 МВт-қа дейінгі қуатты тасымалдауға болады, бұл HVDC-ті ірі энергетикалық жобалар үшін таптырмас технология етеді [1, 8]. HVDC жүйелерінің тиімділігі ең алдымен тасымалданатын қуат мөлшері мен желі архитектурасына байланысты. Түзеткіш станциялар салыстырмалы түрде қымбат болғанымен, HVDC тасымалдау желілері HVAC желілеріне қарағанда арзанырақ [10]. Нәтижесінде белгілі бір қашықтықтан бастап HVDC экономикалық жағынан тиімдірек болады. HVAC технологиясын қолданатын жерасты және суасты кабельдік желілер ұзындығы бойынша шектелген (әдетте 50 км-ге дейін), себебі сыйымдылықтық шығындар артады, ал HVDC кабельдері 600 км және одан да ұзақ қашықтықтарға қолданылуы мүмкін [4, 12].

HVDC технологиясы түрлі жиілікте жұмыс істейтін энергетикалық жүйелерді біріктіру үшін де қолданылады. Мысалы, Жапонияда энергетикалық желінің бір бөлігі 50 Гц жиілікте, ал екіншісі – 60 Гц жиілікте жұмыс істейді, сондықтан HVAC технологиясы арқылы тікелей қосу мүмкін емес. Алайда HVDC түрлендіргіш станциялары мұндай асинхронды жүйелер арасында энергия алмасуын қамтамасыз етеді, жиіліктердің тәуелсіздігін сақтай отырып. Бұл HVDC технологиясын трансшекаралық және өңіраралық байланыстар үшін негізгі құрал етеді, электр энергиясын тұрақты әрі тиімді тасымалдауды қамтамасыз етеді [1, 15].

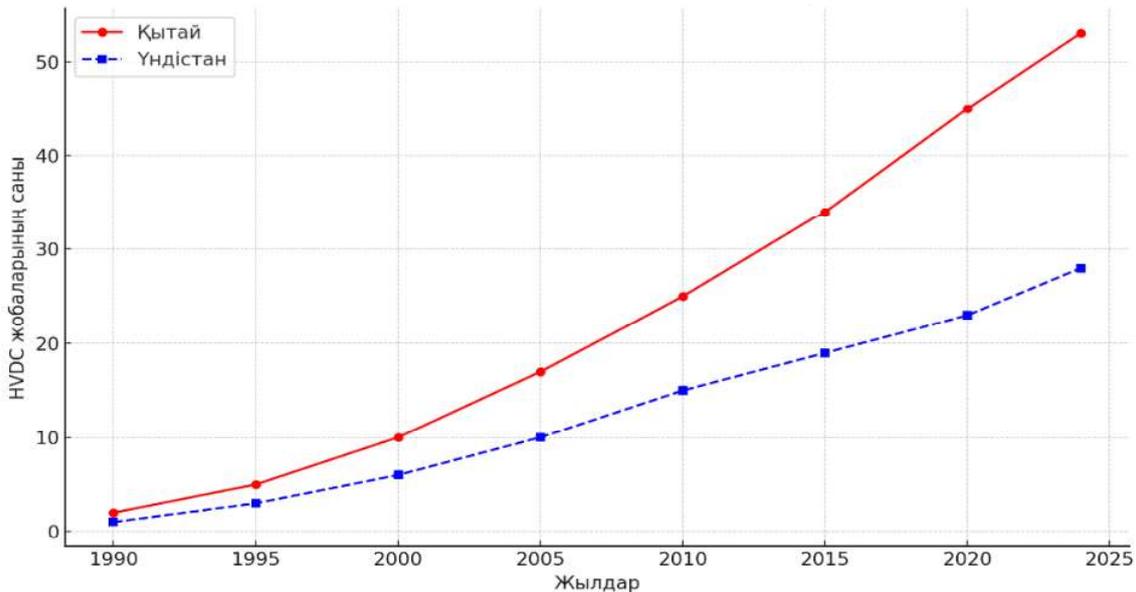
LCC-HVDC, яғни ток көзіне негізделген түрлендіргіштер (CSC) – HVDC жүйелері арқылы энергия тасымалдау үшін ең кең қолданылатын технология. Олардың жұмысы тек бір бағытта ток өткізе алатын тиристорлы вентильдерге негізделген. Тиристорлар басқарушы импульс арқылы қосылады, бірақ ток нөлге түскенде ғана автоматты түрде өшіріледі, бұл олардың негізгі жұмыс режимін анықтайды. LCC жүйелері тиристорлардың қосылу бұрышын (фаза бұрышы  $\alpha$ ) басқару арқылы жұмыс істейді, бұл түзеткіш және инверторлық станцияларда қуатты реттеуге мүмкіндік береді [3]. Мұндай жүйелерде қуат ағынының бағыты кернеу полярлығын өзгерту арқылы ауысады, ал ток бағыты өзгеріссіз қалады. Бұл LCC технологиясын жетілген әрі сенімді етеді, бүкіл әлемде осы тәсілді пайдаланатын 150-ден астам HVDC жобасы іске асырылған.

LCC-HVDC және VSC-HVDC – тұрақты токпен электр энергиясын тасымалдау жүйелерінде қолданылатын екі негізгі түрлендіргіш технологиясы. Тиристорлық түзеткіштерге негізделген LCC-HVDC – 12 ГВт-қа дейінгі қуатты  $\pm 1100$  кВ кернеуде алыс қашықтықтарға тасымалдауға жарамды, жетілген әрі кең тараған технология. Ал VSC-HVDC, яғни IGBT транзисторларын қолданатын түрі, қуатты басқаруда икемдірек және әлсіз энергетикалық жүйелерде жұмыс істей алады [12, 13]. Алайда VSC-HVDC жүйесінің өткізу қабілеті шамамен 3–4 ГВт, ал кернеу деңгейі  $\pm 640$  кВ шамасында шектелген [8].

Жоғары кернеулі тұрақты токпен (HVDC) электр энергиясын тасымалдау технологиясын дамыту белсенді түрде жалғасуда, бұл іске асырылып жатқан және жоспарланған жобалардың тұрақты өсуімен дәлелденеді [3, 8]. Бұл технология әсіресе Азияда кең таралған, бұл аймақ жалпы орнатылған қуаттың шамамен 52 %-ын құрайды. Мұның себебі – қашық орналасқан генерация нысандарынан тұтыну

### Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»

орталықтарына дейінгі арақашықтықта электр энергиясын тасымалдау қажеттілігі. Қытай мен Үндістан HVDC технологиясын жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау және энергетикалық жүйелерінің тиімділігін арттыру мақсатында ең белсенді қолданушы елдер болып табылады [5, 6, 14].



Сурет 1. Қытай мен Үндістанда HVDC технологиясын енгізу динамикасы (1990–2024 жж.)

HVDC технологиясының Қытай мен Үндістанда енгізілу динамикасын көрнекі түрде көрсету үшін негізгі көрсеткіштерді графикалық форматта ұсынайық. Деректерді визуализациялау әр елдегі технологиялардың дамуының ауқымын, жаңа желілердің құрылысы қарқынын және олардың энергетикалық инфрақұрылымға әсерін жақсырақ түсінуге мүмкіндік береді. 1-суретте ұсынылған график орнатылған қуаттың өсуін, HVDC желілерінің ұзындығын және жылдар бойынша іске асырылған жобалар санын көрсетеді [5, 8]. Бұл салыстырмалы талдау жүргізуге және негізгі үрдістерді анықтауға мүмкіндік береді.

#### Нәтижелер және талқылау

Қазақстанның энергетикалық жүйесіне жалпы орнатылған қуаттылығы 18 572 МВт болатын 71 электр станциясы кіреді. Электр энергиясының негізгі бөлігі көмірмен жұмыс істейтін станцияларында, мысалы, Екібастұз ГРЭС-2-де өндіріледі. Алайда соңғы жылдары жаңартылатын энергия көздерінің (ЖЭК) үлесі артып келеді. 2021 жылы ЖЭК қуаты 7 086 МВт-ты құрады, ал 2024 жылы ЖЭК есебінен өндірілген энергияның үлесі 6,43%-ға жетті [7, 9].

Қазақстанның энергетикалық секторының негізгі көрсеткіштері:

1. Электр станциялары: жалпы қуаттылығы 18 572 МВт болатын 71 бірлік;
2. Жаңартылатын энергия көздері: 2024 жылы ЖЭК үлесі жалпы электр энергиясы өндірісінің 6,43%-ын құрады;
3. Электр жеткізу желілері: 2021 жылғы 1 қаңтарға жалпы ұзындығы 23 383 км;
4. Негізгі тұтынушылар: өнеркәсіптік кәсіпорындар, әсіресе тау-кен және металлургия салаларында, сондай-ақ халық.

Қытай мен Үндістанның тәжірибесін ескере отырып, Қазақстан төмендегі 2-суретте көрсетілген міндеттерді шешу үшін HVDC технологияларын енгізуді қарастыруы мүмкін [5-6].

### Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»



Сурет 2. Қазақстандағы HVDC технологияларын енгізудің басым бағыттары

2-суреттен көріп отырғанымыздай, бұл талдау HVDC технологияларын енгізу Қазақстанның ұлттық энергетикалық жүйесінің сенімділігін айтарлықтай арттыра алатынын көрсетеді. Жоғары вольтты тұрақты ток (HVDC) технологиясы энергиямен жабдықтауды тұрақтандыруға, беру кезіндегі шығындарды азайтуға және жиіліктің ауытқуы тәуекелдерін төмендетуге мүмкіндік береді [8].

Қазақстанда HVDC технологияларын табысты енгізу үшін кешенді шаралар жүргізу қажет. Ең алдымен, электр беру желілерінің ұзақтығы, генерация көздерінің орналасуы мен электр энергиясын тұтыну құрылымын ескере отырып, HVDC технологияларын қолданудың мақсатқа сәйкестігін бағалайтын техникалық-экономикалық негіздеме әзірлеу қажет [2, 15]. Ерекше назар электр энергиясының тапшылығы байқалатын өңірлермен, атап айтқанда, Екібастұз ГРЭС-ін Қазақстанның оңтүстік аймақтарымен (Алматы және Жамбыл облыстары) байланыстыратын желілерге, сондай-ақ Ресейге тәуелді Батыс Қазақстанмен байланыс желілеріне аударылуы тиіс [7].

Келесі қадам ретінде HVDC технологияларын енгізудің пилоттық жобаларын әзірлеу ұсынылады. Атап айтқанда, Екібастұз – Алматы және Ақтөбе – Атырау бағыттарында, мұнда электр энергиясының үлкен көлемін аз шығынмен жеткізу қажет. Бұл учаскелер HVDC технологияларын сынақтан өткізу мен енгізу үшін алғашқы нысандар бола алады, бұл технологияның экономикалық тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді [7, 9].

Модельдің негізгі элементтері:

1. **Негізгі тұтынушылар** (модель сызбасындағы көк түйіндер): Астана, Алматы, Шымкент, Атырау, Ақтау, Қызылорда.

2. **HVDC желілерінің негізгі бағыттары**: Энергияны Екібастұздан Астанаға, одан әрі Алматыға жеткізу, оңтүстік өңірлердегі күн және жел генерациясын интеграциялау.

**Негізгі тұтынушылар:**

1. **Астана** – энергетикалық тұтыну көлемі артып келе жатқан әкімшілік орталық.

2. **Алматы** – қыстағы жүктемесі жоғары ірі қала.

3. **Шымкент** – қарқынды дамып келе жатқан оңтүстік аймақ.

4. **Атырау** – тұрақты энергиямен қамтуды қажет ететін мұнай-газ хабы.

*HVDC желілерінің маршруттары*

Солтүстіктен оңтүстікке (Екібастұз → Астана → Алматы → Шымкент) – көмір станцияларынан артық энергияны халық тығыз орналасқан оңтүстік өңірлерге жеткізу үшін.

Батыстан орталыққа (Атырау → Ақтау → Қызылорда) – мұнай-газ өңірін біртұтас энергетикалық жүйеге интеграциялау мақсатында.

Жаңартылатын энергия көздерінен → Магистральдық желілерге (Жамбыл ЖЭС, Қызылорда КЭС → Алматы, Астана) – ЖЭК-ті ұлттық желіге HVDC арқылы қосу үшін.

Қазақстанда HVDC жүйесін енгізу бірқатар маңызды артықшылықтар әкеледі. Біріншіден, ол электр энергиясын алыс қашықтыққа тасымалдау кезінде болатын шығындарды едәуір азайтуға мүмкіндік береді, бұл аумағы кең ел үшін аса маңызды [4]. Екіншіден, бұл жүйе қазіргі уақытта елдің басқа өңірлерінен келетін энергия ағындарына тәуелді және электр энергиясының жетіспеушілігі қаупіне ұшыраған оңтүстік және батыс өңірлерде тұрақты энергиямен жабдықтауды қамтамасыз етеді [6]. Соңында, HVDC технологиясын қолдану күн және жел электр станциялары сияқты жаңартылатын

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

энергия көздерін интеграциялау үшін икемді жағдай жасайды, бұл олардың Қазақстанның жалпы энергетикалық балансындағы үлесін арттырып, экологиялық тұрғыдан таза әрі орнықты энергетикаға көшуді жеделдетеді [15].

#### *Қорытынды*

Жүргізілген зерттеу нәтижелері жоғары кернеулі тұрақты токпен (HVDC) электр энергиясын беру технологиясының Қазақстан үшін айрықша өзектілігін көрсетеді. Бұл технология қашықтыққа электр энергиясын тасымалдаудағы шығындарды азайту, жүйенің сенімділігі мен тұрақтылығын арттыру, сондай-ақ жаңартылатын энергия көздерін интеграциялауда маңызды рөл атқара алады [1, 15].

Қытай мен Үндістан тәжірибесі HVDC технологиясының тиімділігін нақты дәлелдеді. Қазақстанда да бұл технологияны кезең-кезеңімен енгізу ұлттық энергетикалық жүйенің сенімділігін арттырып, энергия тапшылығы мәселелерін шешуге септігін тигізеді [7].

Павлодар–Алматы бағыты бойынша әзірленген тұжырымдамалық модель елдің солтүстік пен оңтүстік өңірлері арасындағы энергетикалық байланысты нығайтып, жаңартылатын энергия көздерінің үлесін арттыруға мүмкіндік береді [8]. Сонымен қатар, бұл технология экологиялық тұрғыдан таза энергетикаға көшу үдерісін жеделдетуге сеп болады [4].

Осыған байланысты, Қазақстан үшін HVDC технологияларын енгізуге бағытталған техникалық-экономикалық негіздемелер әзірлеу, пилоттық жобаларды іске қосу және нормативтік-құқықтық базаны жетілдіру – болашақтағы басым бағыттар қатарында болуы тиіс.

#### *Әдебиеттер тізімі*

1. Kalair A., Abas N., Khan N. Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – 2016. – Vol. 59. – P. 1653 – 1675. – DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.288.
2. Alassi A., Bañales S., Ellabban O., Adam G., MacIver C. HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – 2019. – Vol. 112. – P. 530 - 554. – DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.062.
3. Stan A., Costinaş S., Ion G. Overview and Assessment of HVDC Current Applications and Future Trends // *Energies* – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Art. 1193 – DOI: 10.3390/en15031193.
4. Pillay C.J., Kabeya M., Davidson I.E. Transmission Systems: HVAC vs HVDC // *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. – Detroit, USA, August 10–14, 2020. – P. 2060–2076.
5. Suslova O.V. R&D and Application of HVDC Power Transmissions in China // *STC of Unified Power System Proceedings* – 2016. – Vol. 73. – P. 99–109.
6. HVDC Systems in India // *International Journal of Control and Automation* – 2016. – Vol. 9, No. 5. – P. 95–107.
7. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. Official website. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo?lang=en> (accessed: 02.04.2025).
8. Wang M., An T., Ergun H., Lan Y., Andersen B., Szechtman M., Leterme W., Beerten J., Van Hertem D. Review and outlook of HVDC grids as backbone of transmission system // *CSEE Journal of Power and Energy Systems* – 2021. – Vol. 7, No. 4. – Art. 9299506. – P. 797 – 810. – DOI: 10.17775/CSEEJPES.2020.04890.
9. Kazakhstan Electricity Grid Operating Company (KEGOC). Official website. Available at: <https://www.kegoc.kz/en/> (accessed: 02.04.2025).
10. Barnwal A.K., Kumar A., Tiwari N. Comparative Analysis of HVAC and HVDC Transmission System // *IRE Journals* – 2018. – Vol. 1, No. 9. – P. 305–307. – ISSN: 2456-8880.
11. Shah Ayobe A., Gupta S. Comparative investigation on HVDC and HVAC for bulk power delivery // *Materials Today: Proceedings* – 2021. – Vol. 48. P. 958 – 964. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.025.
12. Pei Z., Liu P., Zhang A., Zhou Y. An Overview on VSC-HVDC Power Transmission Systems // *International Journal of Control and Automation* – 2016. – Vol. 9, No. 5. – P. 33–44. – DOI: 10.14257/ijca.2016.9.5.04.

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

13. Gandotra R., Kanika, Pal K. The VSC-HVDC Transmission System Performance Assessment // Journal of Physics: Conference Series – 2023. – Vol. 2570, No. 1. – Art. 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/2570/1/012025.

14. Mitra S., Pandaraboyana D.K., Arulvendhan K., Srinivasan J.D. HVDC in Indian Power Sector // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) – 2019. – Vol. 8, Issue 1S4. – P. 509–515. – ISSN: 2277-3878.

15. Watson N.R., Watson J.D. An Overview of HVDC Technology // Energies – 2020. – Vol. 13, No. 17. – Art. 4342. – DOI: 10.3390/en13174342.

Б.А.Жаутиков, Д.Б. Ахатов, С.Н.Камарова, В.М.Дружинин, А.В.Никульшин

#### **Концептуальные основы внедрения HVDC-технологий в энергетическую систему Казахстана**

В статье рассматриваются технологии передачи электрической энергии по линиям высоковольтного постоянного тока (HVDC), включая преобразователи типов LCC и VSC. Проведён сравнительный анализ с традиционными системами переменного тока (HVAC), выявлены преимущества технологий HVDC в снижении потерь и повышении устойчивости энергосистемы. Изучен международный опыт Китая и Индии, предложены перспективы внедрения HVDC в Казахстане с учётом регионального энергетического баланса. Разработана концептуальная модель HVDC-линии по маршруту Павлодар–Алматы. Результаты исследования демонстрируют потенциал технологии HVDC для модернизации энергосистемы, интеграции возобновляемых источников энергии и повышения энергетической безопасности страны.

*Ключевые слова:* HVDC, передача электроэнергии, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), инфраструктура постоянного тока.

Zhautikov B.A., Akhatov D.B., Kamarova S.N., Druzhinin V.M., Nikulshin A.V.

#### **Conceptual bases for introduction of HVDC-technologies into the energy system of Kazakhstan**

The article considers technologies of electric power transmission through high-voltage direct current (HVDC) lines, including converters of LCC and VSC types. A comparative analysis with traditional alternating current systems (HVAC) is carried out, the advantages of HVDC technologies in reducing losses and improving the stability of the power system are revealed. International experience of China and India has been studied, and the prospects of HVDC implementation in Kazakhstan have been proposed, taking into account the regional energy balance. A conceptual model of HVDC line along the Pavlodar-Almaty route was developed. The results of the study demonstrate the potential of HVDC technology to modernize the energy system, integrate renewable energy sources and improve energy security of the country.

*Keywords:* HVDC, power transmission, renewable energy sources (RES), direct current transmission infrastructure.

#### References

1. Kalair A., Abas N., Khan N. Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2016. – Vol. 59. – P. 1653 – 1675. – DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.288.

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

2. Alassi A., Bañales S., Ellabban O., Adam G., MacIver C. HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – 2019. – Vol. 112. – P. 530 - 554. – DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.062.
3. Stan A., Costinaş S., Ion G. Overview and Assessment of HVDC Current Applications and Future Trends // *Energies* – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Art. 1193 – DOI: 10.3390/en15031193.
4. Pillay C.J., Kabeya M., Davidson I.E. Transmission Systems: HVAC vs HVDC // *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. – Detroit, USA, August 10–14, 2020. – P. 2060–2076.
5. Suslova O.V. R&D and Application of HVDC Power Transmissions in China // *STC of Unified Power System Proceedings* – 2016. – Vol. 73. – P. 99–109.
6. HVDC Systems in India // *International Journal of Control and Automation* – 2016. – Vol. 9, No. 5. – P. 95–107.
7. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. Official website. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo?lang=en> (accessed: 02.04.2025).
8. Wang M., An T., Ergun H., Lan Y., Andersen B., Szechtman M., Leterme W., Beerten J., Van Hertem D. Review and outlook of HVDC grids as backbone of transmission system // *CSEE Journal of Power and Energy Systems* – 2021. – Vol. 7, No. 4. – Art. 9299506. – P. 797 – 810. – DOI: 10.17775/CSEEJPES.2020.04890.
9. Kazakhstan Electricity Grid Operating Company (KEGOC). Official website. Available at: <https://www.kegoc.kz/en/> (accessed: 02.04.2025).
10. Barnwal A.K., Kumar A., Tiwari N. Comparative Analysis of HVAC and HVDC Transmission System // *IRE Journals* – 2018. – Vol. 1, No. 9. – P. 305–307. – ISSN: 2456-8880.
11. Shah Ayobe A., Gupta S. Comparative investigation on HVDC and HVAC for bulk power delivery // *Materials Today: Proceedings* – 2021. – Vol. 48. P. 958 – 964. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.025.
12. Pei Z., Liu P., Zhang A., Zhou Y. An Overview on VSC-HVDC Power Transmission Systems // *International Journal of Control and Automation* – 2016. – Vol. 9, No. 5. – P. 33–44. – DOI: 10.14257/ijca.2016.9.5.04.
13. Gandotra R., Kanika, Pal K. The VSC-HVDC Transmission System Performance Assessment // *Journal of Physics: Conference Series* – 2023. – Vol. 2570, No. 1. – Art. 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/2570/1/012025.
14. Mitra S., Pandaraboyana D.K., Arulvendhan K., Srinivasan J.D. HVDC in Indian Power Sector // *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* – 2019. – Vol. 8, Issue 1S4. – P. 509–515. – ISSN: 2277-3878.
15. Watson N.R., Watson J.D. An Overview of HVDC Technology // *Energies* – 2020. – Vol. 13, No. 17. – Art. 4342. – DOI: 10.3390/en13174342.