ӘОЖ 62-21474
МРНТИ 44.29.37
DOI 10.56525/BHCU5793

ӨНЕРКӘСІПТІК ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ЕҢ ЖОҒАРЫ ЖҮКТЕМЕНІ ТӨМЕНДЕТУДІҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІНЕ ӘСЕРІ

Отарбаева А.Т.
Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан
e-mail: ainaerlan1984@mail.ru

Аңдатпа. Өнеркәсіптік электрмен жабдықтау жүйелеріндегі ең жоғары жүктемені төмендетудің энергия тиімділігіне ықпалы есептік модель негізінде бағаланады. Зерттеудің мақсаты өндірістік электр тұтыну графигін тегістеу кезінде қуат максимумының, желідегі жүктемелік шығындардың және өнім бірлігіне жұмсалатын энергияның өзгерісін ажыратып көрсету болып табылады. Бастапқы материал ретінде алты төрт сағаттық аралықтан тұратын шартты тәуліктік жүктеме графигі қабылданды. Бұл деректер нақты кәсіпорында жүргізілген өлшеулер емес. Әдістеме энергия балансын есептеуді, жүктеме графигінің толтыру коэффициентін анықтауды және тұрақты кернеу мен қуат коэффициенті жағдайында өткізгіштегі шығындарды бағалауды қамтиды. Салыстыру үшін технологиялық энергия тұтынуды сақтай отырып, икемді жүктемені уақыт бойынша ауыстыру сценарийі құрылды. Есептеу нәтижесінде ең жоғары қуат 2000 киловаттан 1600 киловатқа төмендеп, графиктің толтыру коэффициенті 0,65-тен 0,8125-ке өсті. Тәуліктік технологиялық энергия тұтыну 31200 киловатт-сағат деңгейінде сақталды. Қабылданған эквиваленттік желі параметрлері кезінде жүктемелік шығын 55,11-тен 51,46 киловатт-сағатқа азайды. Осылайша, қуат максимумының жиырма пайызға төмендеуі кірістегі жалпы энергияның шамамен 0,012 пайыз үнемделуімен қатар жүрді. Нәтиже шығынды қысқартудың салыстырмалы үлесі мен жалпы энергия үнемін бір көрсеткіш ретінде қарастыруға болмайтынын көрсетеді. Ұсынылған тәсіл кәсіпорынның нақты өлшеу деректерімен тексеруді қажет етеді және жүктемені басқару шараларын бастапқы техникалық бағалауға арналған.

Түйін сөздер: өнеркәсіптік электрмен жабдықтау, энергия тиімділігі, ең жоғары жүктеме, сұранысты басқару, жүктеме графигі, электр энергиясының шығындары.

Кіріспе

Өнеркәсіптік кәсіпорынның электрмен жабдықтау режимі жабдықтардың орнатылған қуатымен ғана емес, олардың бір мезгілде жұмыс істеуімен анықталады. Бірнеше энергия сыйымды операцияның уақыт бойынша қабаттасуы қысқа мерзімді жоғары жүктеме қалыптастырады. Мұндай режим өткізгіштердегі токты және жүктемелік шығындарды арттырады. Сондықтан тұтыну кестесін өндірістік шектеулермен үйлестіру энергия менеджментінің маңызды міндеті болып табылады.

Сұранысты басқарудың қалыптасуында жүктеме пішінін мақсатты өзгерту ұғымы негізгі орын алады [3]. Оның қазіргі түсіндірмесі энергия тиімділігін арттыруды, тарифтік ынталандыруды және икемді қабылдағыштарды басқаруды біріктіреді [7]. Бағалық және ынталандыру бағдарламаларының нәтижесін бағалау кезінде тұтынушы шығындары мен жүйелік пайдаларды бірге қарастыру қажет [1]. Сандық байланыс пен басқару технологиялары бұл шараларды іске асыруға мүмкіндік береді [9].

Өнеркәсіптік қолданбаларда басқару мүмкіндігі технологиялық процестің икемділігімен шектеледі [8]. Өндірістік операцияларды электрлік шектеулермен бір модельде көрсету тәсілі болат өндірісінің кестесін құру жұмыстарында қолданылған [2]. Жаңа шолулар энергия тиімділігі мен уақыт бойынша икемділікті өзара байланысты мақсаттар ретінде қарастырады [5, 10]. Дегенмен ең жоғары қуаттың азаюын энергия үнемінің дәлелі ретінде қабылдау әдістемелік қателікке әкелуі мүмкін.

Зерттеудің мақсаты — шартты өнеркәсіптік жүктеме графигі мысалында ең жоғары қуатты төмендетудің жүктемелік шығындар мен меншікті электр тұтынуға әсерін сандық бағалау. Жұмыстың әдістемелік үлесі қуат, технологиялық энергия және кірістегі энергия көрсеткіштерін бірыңғай есеп шекарасында бөлек салыстырудан тұрады. Қазақстан кәсіпорындары үшін бұл тәсіл бастапқы энергетикалық тексеру кезінде қолданылуы мүмкін; алайда мақалада Қазақстандағы нақты кәсіпорынның тәжірибелік нәтижелері келтірілмейді.

Зерттеу гипотезасы мынадай: тәуліктік технологиялық энергия тұрақты болғанда жүктемені тегістеу токтың квадратына тәуелді шығындарды азайтады, бірақ энергия үнемінің үлесі қуат максимумының төмендеу үлесіне тең болмайды. Осы гипотезаны тексеру үшін ең жоғары қуат, орташа қуат, графиктің шашырауы және желі кірісіндегі энергия қатар бағаланады. Зерттеу сұрағы ең үлкен қуатты қаншаға азайтуға болатынымен шектелмей, сол азаюдың қандай физикалық және өндірістік шарттарда тиімді болатынын қамтиды.

Жүктемелерді басқаруға жарамдылығы бойынша бөлу маңызды. Үздіксіз әрі қауіпсіздікке тікелей қатысы бар қабылдағыштардың режимі өзгеріссіз қалады. Уақыт бойынша ауыстырылатын операциялар үшін орындау терезесі, қажетті энергия және ең жоғары қуат белгіленеді. Қысқа мерзімге реттелетін қабылдағыштар үшін өнім сапасына, температураға немесе қысымға қатысты шектер енгізіледі. Мұндай жіктеу кәсіпорынның жалпы тұтынуын түгелдей икемді ресурс деп қабылдаудан сақтайды. Осы мақалада нақты жабдық топтары анықталмағандықтан, ауыстырылатын энергия көлемі агрегатталған модельдік шектеу ретінде берілген.

Материалдар мен зерттеу әдістері

Зерттеу түрі — детерминистік салыстырмалы модельдік есеп. Бақылау бірлігі төрт сағаттық уақыт аралығы, есеп көкжиегі бір тәулік, аралықтар саны алты. Модельдік график статистикалық іріктеме болып саналмайды; сенімділік аралығы мен статистикалық маңыздылық есептелмейді. Бастапқы деректер мен өзгертілген сценарий 1-кестеде берілген. Қуаттар қабылдағыштар жағында анықталады.

Кесте 1 – Модельдік тәуліктік жүктеме деректері

Уақыт	Бастапқы қуат, кВт	Басқарудан кейін, кВт	Өзгеріс, кВт
00:00–04:00	800	1000	200
04:00–08:00	1000	1200	200
08:00–12:00	1600	1500	-100
12:00–16:00	2000	1600	-400
16:00–20:00	1400	1400	0
20:00–24:00	1000	1100	100

Басқару сценарийінде 08:00–16:00 кезеңіндегі 2000 кВт·сағ энергия басқа уақыт аралықтарына ауыстырылды. Тәуліктік өндірістік тапсырма өзгермейді деп қабылданады: өнім көлемі 100 т/тәулік. Бұл көлем және барлық электрлік параметрлер авторлық есептік

жорамалдар болып табылады. Нақты өндірісте ауыстыру мүмкіндігін жабдықтың паспорттық қуаты, операция ұзақтығы, аралық қор және технологиялық тәртіп арқылы тексеру қажет.

Есептеуде симметриялы үш фазалы эквиваленттік желі қабылданды: желілік кернеу 10 кВ, қуат коэффициенті 0,90, бір фазаның активті кедергісі 0,10 Ом. Бұл кедергі тек қарастырылатын тізбекті тармаққа қатысты. Трансформатордың бос жүріс шығыны, кернеу ауытқуы, гармоникалар мен температуралық кедергі өзгерісі есепке алынбайды. Сондықтан нәтижелер толық кәсіпорын шығынын сипаттамайды.

Технологиялық энергия және орташа қуат (1) формуласы бойынша есептелді. Мұндағы P_i — i аралығындағы белсенді қуат, Δt — аралық ұзақтығы, T — тәуліктің ұзақтығы, Етех — қабылдағыштардың энергиясы.

$$E\text{тех} = \Sigma_i P_i \Delta t; \quad P\text{орт} = E\text{тех} / T \tag{1}$$

Графиктің толтыру коэффициенті мен ең жоғары қуаттың төмендеуі (2) формуласы арқылы анықталды. 0 және 1 индекстері бастапқы және өзгертілген режимдерге сәйкес келеді.

$$K\text{т} = P\text{орт} / Pmax; \quad \delta P = (Pmax,0 - Pmax,1) / Pmax,0 \times 100\% \tag{2}$$

Желі тогы мен активті қуат шығыны (3) формуласы бойынша есептелді. Бұл формулада P ваттпен, U вольтпен, I ампермен және R оммен алынады. Әр аралықтағы шығын қуатын уақытқа көбейтіп, нәтижені киловатт-сағатқа айналдыру арқылы тәуліктік шығын табылады.

$$I_i = P_i / (\sqrt{3}\, U\, cos\varphi); \quad \Delta P_i = 3 I_i^2 R; \quad E\text{шығ} = \Sigma_i \Delta P_i \Delta t \tag{3}$$

Салыстыру шекарасын сақтау үшін желі кірісіндегі энергия және өнім бірлігіне жұмсалатын энергия (4) формуласы бойынша есептелді. V — тәуліктік өнім көлемі. Технологиялық меншікті тұтыну мен кірістегі меншікті тұтыну бөлек көрсетіледі.

$$E\text{кір} = E\text{тех} + E\text{шығ}; \quad e\text{тех} = E\text{тех} / V; \quad e\text{кір} = E\text{кір} / V \tag{4}$$

Экономикалық әсерді бағалау үшін тек сезімталдық мысалы қарастырылды: шартты біркелкі энергия бағасы 30 теңге/(кВт·сағ) және жылына 300 бірдей жұмыс күні. Бұл мәндер Қазақстанның нақты тарифі немесе кәсіпорынның коммерциялық ұсынысы емес. Біркелкі тариф жағдайында жүктемені жай ауыстыру технологиялық энергия төлемін өзгертпейді; үнем есептік желі шығынының азаюынан ғана туындайды. Қуат төлемі бар келісімшарт үшін оның нақты ставкасы мен есептік максимум ережесі бөлек енгізілуі тиіс.

Жинақтауыштар бұл есептік сценарийге қосылмады. Оларды енгізгенде пайдалы сыйымдылық, заряд күйі, түрлендіру тиімділігі мен тозу шығыны есептелуі керек [6]. Өлшеу мен болжамдағы толық емес ақпарат нәтижеге әсер ететіндіктен [4], нақты енгізуде маусымдық деректерді және өндіріс көлемін бақылау қажет.

Жүктеме біркелкілігін бағалау

Тәуліктік энергия сақталған кезде графиктің шашырауын қуат дисперсиясымен сипаттауға болады. Алты аралықтың ұзақтығы бірдей болғандықтан, орташа квадрат пен дисперсия арасындағы байланыс (5) формуласымен өрнектеледі. Мұндағы n — аралықтар саны, σ^2 — қуат дисперсиясы. Бұл статистикалық қорытынды жасауға арналған бағалау емес, берілген алты нүктеден тұратын графиктің детерминистік сипаттамасы.

$$\sigma^2 = (1/n)\, \Sigma_i\, (P_i - P\text{орт})^2; \quad (1/n)\, \Sigma_i\, P_i^2 = P\text{орт}^2 + \sigma^2 \tag{5}$$

(3) және (5) формулалары бойынша кернеу, қуат коэффициенті және кедергі өзгермесе, шығынды азайту қуат дисперсиясын төмендетумен байланысты. Шашырауы нөлге тең тұрақты график қарастырылған модельдегі теориялық төменгі шығынды береді. Алайда өндірісте бұл графикке қол жеткізу міндетті емес: үздіксіз процестер, материал ағындары және жұмыс ауысымдары оны шектейді. Сондықтан теориялық шек нақты іске асырылатын технологиялық жоспар ретінде ұсынылмайды.

Басқару міндетін қою және іске асыру тәртібі

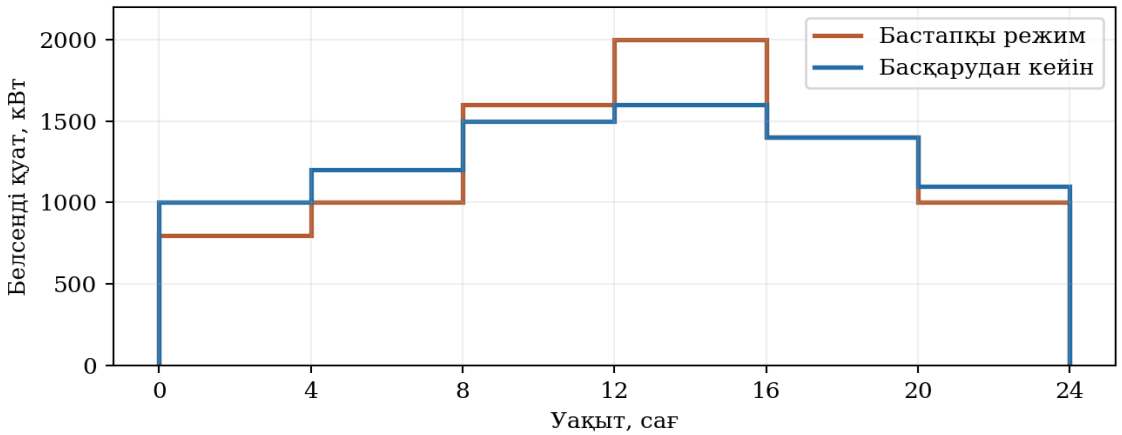
Басқарылатын қабылдағыштар үшін әр аралықтағы қуаттың рұқсат етілген шегі, тәуліктік энергия талабы және жұмыс істеуге рұқсат етілетін уақыт терезесі белгіленеді. Кәсіпорынның жиынтық қуаты осы басқарылатын жүктемелер мен өзгертілмейтін базалық жүктеменің қосындысы болады. Кесте құру кезінде алдымен энергия балансы мен өндірістік шектеулер орындалуы керек; одан кейін максимум және шығын көрсеткіштері салыстырылады. Бұл жұмыста шешімнің жаһандық оңтайлылығы дәлелденбейді: 1-кестедегі график бастапқы режиммен салыстырылатын қолмен құрылған сценарий болып табылады.

Қолданбалы басқару алгоритмі бес қадамнан тұрады. Алдымен өлшеу жүйесінен қуат пен жабдық күйі туралы деректер алынып, уақыт белгілері сәйкестендіріледі. Одан кейін алдағы есептік аралықтың тұтынуы болжанып, белгіленген қуат шегінен асу қаупі бағаланады. Үшінші қадамда рұқсат етілген икемді операциялар өндірістік басымдығы бойынша таңдалады. Төртінші қадамда олардың іске қосылуы кейінге ауыстырылып немесе реттеліп, энергия балансы қайта тексеріледі. Соңғы қадамда нақты орындалған режим тіркеліп, ауыстырылған операциялардың кейінгі уақытта жаңа максимум туғызбауы бақыланады.

Автоматты шешім технологиялық қауіпсіздік шегін бұзса немесе өлшеу деректері жоғалса, басқару қалыпты өндірістік кестеге қайтарылуы тиіс. Басқару оқиғаларының журналында пәрмен уақыты, қуат өзгерісі, орындалмаған операция және оператор араласуы сақталады. Мұндай жазба кейін үнемнің өндіріс көлемінің төмендеуінен емес, режимді басқарудан туындағанын тексеруге мүмкіндік береді. Мұнда алгоритмнің құрылымы ұсынылады; оның бағдарламалық іске асырылуы мен тәжірибелік сынағы жүргізілген жоқ.

Зерттеу нәтижелері

1-кесте деректері бойынша екі сценарийдің де технологиялық энергиясы 31200 кВт·сағ, ал орташа қуаты 1300 кВт болды. (2) формуласы бойынша қуат максимумы 20%-ға төмендеді. Бастапқы және өзгертілген графиктер 1-суретте салыстырылған. Суреттегі қисықтар өлшенген тәуліктік профильдер емес, берілген есептік аралықтардың сатылы бейнесі.



1-сурет. Модельдік тәуліктік жүктеме графиктерін салыстыру

Негізгі энергетикалық көрсеткіштер 2-кестеде жинақталды. Жүктемелік шығын (3) формуласы бойынша 55,11-тен 51,46 кВт·сағ-қа азайды. Тәуліктік үнем 3,65 кВт·сағ немесе бастапқы жүктемелік шығынның 6,63%-ын құрайды. Кірістегі энергияға қатысты үнем небәрі 0,0117% болды. Мұндай айырма желі шығынының технологиялық тұтынумен салыстырғанда аз үлес алуымен түсіндіріледі.

Кесте 2 – Модельдік сценарийлердің энергетикалық көрсеткіштері

Көрсеткіш	Бастапқы	Басқарудан кейін
Ең жоғары қуат, кВт	2000	1600
Орташа қуат, кВт	1300	1300
Толтыру коэффициенті	0,6500	0,8125
Технологиялық энергия, кВт·сағ	31200	31200
Жүктемелік шығын, кВт·сағ	55.11	51.46
Кірістегі энергия, кВт·сағ	31255.11	31251.46
Технологиялық меншікті тұтыну, кВт·сағ/т	312,00	312,00
Кірістегі меншікті тұтыну, кВт·сағ/т	312.5511	312.5146

Максимум кезіндегі ток шамамен 128,30-дан 102,64 А-ге азайды. Қарастырылған тармақтағы максимумдық жүктемелік қуат шығыны 4,94-тен 3,16 кВт-қа төмендеді. Бұл нүктелік төмендеу 36%-ды құрайды, бірақ оны тәуліктік энергия шығынының төмендеуімен теңестіруге болмайды: тәуліктік нәтиже барлық аралықтардың қосындысымен анықталады.

Шартты экономикалық есепте тәуліктік үнем 109,63 теңге, ал 300 жұмыс күніндегі жылдық үнем шамамен 32889 теңге болды. Бұл бағада жабдық енгізу, бағдарламалау, қызмет көрсету және өндірістік кестені өзгерту шығындары жоқ. Сондықтан алынған сома таза пайда немесе инвестицияның тиімділігі туралы қорытынды жасауға жеткіліксіз. Өтелу мерзімі енгізу құны мен барлық жылдық қосымша шығындар белгілі болғанда ғана анықталады.

Нәтиженің физикалық себебі токтың квадратына тәуелді шығынның жүктеме графигін тегістегенде төмендеуінде жатыр. Тұрақты энергия мен қуат коэффициенті жағдайында қуаттардың квадраттарының қосындысы азайды. Бұл қорытынды әдебиеттегі жүктеме пішінін өзгерту тұжырымымен үйлеседі [3, 7], алайда мақаладағы нақты пайыздар басқа жұмыстардан алынбаған және тек осы модельге қатысты.

Сезімталдықты тексеруде фазалық кедергіні 0,05–0,20 Ом аралығында өзгерткенде тәуліктік үнем 1,83–7,31 кВт·сағ аралығында болды. Қуат графигі өзгермегендіктен максимумның 20% төмендеуі сақталды. Демек қуат көрсеткішіндегі бірдей жетістік әртүрлі желіде әртүрлі энергия үнемін береді. Бұл қарапайым талдау желінің нақты параметрлерін анықтау қажеттігін көрсетеді.

Модельдің шектеуі — өндіріс процесінің операциялық кестесі және қысқа мерзімді іске қосу токтары берілмеген. Төрт сағаттық орташа қуаттар 15 минуттық коммерциялық максимумды немесе секундтық технологиялық шарықтауды бағалауға жеткіліксіз. Өндірістік шектеулердің орындалуы бұл жұмыста жорамал ретінде қабылданды. Нақты валидация үшін кемінде бірнеше типтік аптадағы қуат, өнім көлемі, жабдық күйі және электр сапасы туралы деректер қажет. Басқарудан кейін жаңа максимумның пайда болуын да бақылау керек.

Графиктің дисперсиясы және теориялық шек

(5) формуласы бойынша бастапқы графиктің қуат дисперсиясы 170000,00 кВт², ал басқарудан кейінгі графиктікі 46666,67 кВт² болды. Дисперсия 72,55%-ға азайды. Бұл

көрсеткіштің шығынның 6,63% төмендеуінен үлкен болуы шығын құрамында орташа қуаттың квадратымен анықталатын өзгермейтін бөліктің бар екенімен түсіндіріледі. Демек тек максимумды немесе тек дисперсияны көрсету толық энергетикалық бағалауды алмастырмайды.

Барлық алты аралықта қуат 1300 кВт болған теориялық жағдайда тәуліктік жүктемелік шығын 50,07 кВт·сағ болар еді. Бастапқы режимге қатысты мүмкін болатын төмендеу 5,04 кВт·сағ, ал қарастырылған сценарийдегі төмендеу 3,65 кВт·сағ болды. Осылайша сценарий тек берілген тұрақты параметрлер моделіндегі шығын үнемінің теориялық мүмкіндігінің 72,55%-ын іске асырады. Бұл үлес кәсіпорынның бүкіл энергия үнемдеу әлеуеті ретінде түсіндірілмейді.

Кедергі мен қуат коэффициентінің ықпалы

Параметрлерге сезімталдық 3-кестеде көрсетілген. Әр жолда екі режим үшін де бірдей кернеу, кедергі және қуат коэффициенті қолданылды; тек жүктеме графигі өзгерді. Сондықтан кесте реактивті қуатты өтеу шарасының нәтижесін емес, әртүрлі тұрақты электрлік жағдайдағы жүктемені ауыстыру әсерін сипаттайды.

Кесте 3 – Модельдік параметрлерге сезімталдық

R, Ом	**cosφ**	**Бастапқы шығын, кВт·сағ**	**Кейінгі шығын, кВт·сағ**	**Үнем, кВт·сағ**
0,05	0,90	27,56	25,73	1,83
0,10	0,80	69,75	65,12	4,62
0,10	0,90	55,11	51,46	3,65
0,10	1,00	44,64	41,68	2,96
0,20	0,90	110,22	102,91	7,31

Кедергіні екі есе арттыру жүктемелік шығынды және оны төмендетуден алынатын абсолюттік үнемді екі есе арттырады. Қуат коэффициенті төмендегенде бірдей белсенді қуатты жеткізуге үлкен ток қажет болады. Алайда кедергінің ұлғаюы энергия тиімділігі үшін пайдалы жағдай емес: бастапқы шығын да артады. Кестенің мақсаты — басқару әсерінің желі параметрлеріне тәуелділігін ашу. Қуат коэффициентін түзету мен жүктемені ауыстыруды біріктірген жағдайда олардың әрқайсысының үлесін бөлек сценарийлермен бағалау қажет.

Өндірістік валидация және экономикалық қолданылу шарттары

Қазақстандағы нақты кәсіпорында тексеру жүргізілгенде кіріс есептегіші мен басқарылатын учаскелердің өлшеулері бір уақыт шкаласына келтірілуі керек. Бастапқы және басқару кезеңдері өнім түрі, ауысым ұзақтығы және өндірілген өнім көлемі бойынша салыстырмалы болуы қажет. Ауа температурасына немесе шикізат сапасына тәуелді процестерде осы факторлар да тіркеледі. Өлшеу кезеңі әртүрлі жұмыс режимдерін қамтуы тиіс; бірнеше типтік апта бастапқы тексеруге жарамды болғанымен, маусымдық қорытынды үшін ұзағырақ деректер қажет.

Экономикалық нәтижені тек киловатт-сағат құнымен бағалау жеткіліксіз болуы мүмкін. Егер шартта қуат үшін төлем қарастырылса, есептік аралықтың анықтамасы мен айлық максимумның қалыптасу тәртібі нақты тексеріледі. Өндіріс кестесін ауыстыру қосымша еңбек ақысына, жабдықтың іске қосылу санына немесе аралық қор шығындарына әсер етуі мүмкін. Бұл факторлардың бірде-бірі берілген есепке енгізілген жоқ. Сондықтан ұсынылған сценарий техникалық тұрғыдан салыстырмалы болғанымен, коммерциялық енгізу туралы дайын шешім болып саналмайды.

Тұрақты жүктеме графигіне жақындау жабдықты пайдалану режимін жеңілдетуі мүмкін, бірақ трансформатордың қызмет ету мерзімін немесе апаттылықтың төмендеуін осы есептен сандық анықтау мүмкін емес. Ол үшін температуралық модель, нақты жүктеме тарихы және

оқшауламаның күйі туралы деректер қажет. Сол сияқты шығарындылардың азаюы электр энергиясының уақыт бойынша өндіріс құрамына тәуелді, сондықтан бұл мақалада көміртек үнемі есептелмеді.

Қорытынды

Шартты тәуліктік графикті тегістеу ең жоғары қуатты 2000-нан 1600 кВт-қа төмендетіп, толтыру коэффициентін 0,65-тен 0,8125-ке арттырды. Технологиялық энергия мен өнім көлемі сақталған жағдайда қабылдағыштардың меншікті тұтынуы өзгерген жоқ. Қарастырылған эквиваленттік желіде жүктемелік шығын 6,63%-ға, ал кірістегі жалпы энергия шамамен 0,0117%-ға азайды. Сондықтан ең жоғары қуаттың төмендеуін энергия тиімділігінің өсуімен бағалау үшін есеп шекарасы мен шығын үлесін міндетті түрде көрсету қажет.

Өнеркәсіптік кәсіпорын үшін бастапқы қадам ретінде технологиялық тұрғыдан ауыстырылатын операцияларды анықтау және олардың кестесін өлшеу деректерімен тексеру ұсынылады. Жинақтауыш немесе автоматтандыру жүйесі туралы шешім толық энергетикалық және экономикалық есептен кейін қабылдануы тиіс. Ұсынылған модель нақты кәсіпорындағы тәжірибелік тиімділікті дәлелдемейді; ол Қазақстан кәсіпорындарында қолдануға болатын салыстыру әдістемесін және болашақ өлшеулердің қажетті құрамын көрсетеді.

Қосымша талдау график дисперсиясының төмендеуін энергия балансы арқылы түсіндіруге мүмкіндік берді. Қарастырылған сценарийдегі шығын 51,46 кВт·сағ болып, біркелкі графиктің 50,07 кВт·сағ теориялық шегіне жақындады. Сезімталдық есебі басқару әсерін желі кедергісі мен қуат коэффициентінсіз бағалау жеткіліксіз екенін көрсетті. Келесі кезеңде нақты өндірістік операциялардың рұқсат етілген уақыт терезелерін енгізіп, ұсынылған алгоритмді қысқа аралықтағы өлшеулермен тексеру қажет.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Albadi M. H., El-Saadany E. F. A summary of demand response in electricity markets // Electric Power Systems Research. – 2008. – Vol. 78(11). – P. 1989–1996. – DOI: 10.1016/j.epsr.2008.04.002.

2. Castro P. M., Sun L., Harjunkoski I. Resource–Task Network Formulations for Industrial Demand Side Management of a Steel Plant // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2013. – Vol. 52(36). – P. 13046–13058. – DOI: 10.1021/ie401044q.

3. Gellings C. W. The concept of demand-side management for electric utilities // Proceedings of the IEEE. – 1985. – Vol. 73(10). – P. 1468–1470. – DOI: 10.1109/PROC.1985.13318.

4. Huang L., Liu H., Liu B., Ma S., Wang N., Xie H., He Z. Demand response with incomplete information: A systematic review // Electric Power Systems Research. – 2025. – Vol. 246. – Art. 111720. – DOI: 10.1016/j.epsr.2025.111720.

5. Leherbauer D., Schulz J., Egyed A., Hehenberger P. Demand-side management in less energy-intensive industries: A systematic mapping study // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – Vol. 212. – Art. 115315. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.115315.

6. Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation // Applied Energy. – 2015. – Vol. 137. – P. 511–536. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.

7. Palensky P., Dietrich D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2011. – Vol. 7(3). – P. 381–388. – DOI: 10.1109/TII.2011.2158841.

8. Shoreh M. H., Siano P., Shafie-khah M., Loia V., Catalão J. P. S. A survey of industrial applications of Demand Response // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 141. – P. 31–49. – DOI: 10.1016/j.epsr.2016.07.008.

9. Siano P. Demand response and smart grids—A survey // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 30. – P. 461–478. – DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.022.

10. Zhang J., Zhou B., Yang Z., Guo Y., Lv C., Xu X., Liu J. A Review of Industrial Load Flexibility Enhancement for Demand-Response Interaction // Sustainability. – 2025. – Vol. 17(11). – Art. 4938. – DOI: 10.3390/su17114938.

REFERENCES

Albadi M. H., El-Saadany E. F. (2008). A summary of demand response in electricity markets. Electric Power Systems Research, 78(11), 1989–1996. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002

Castro P. M., Sun L., Harjunkoski I. (2013). Resource–Task Network Formulations for Industrial Demand Side Management of a Steel Plant. Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(36), 13046–13058. https://doi.org/10.1021/ie401044q

Gellings C. W. (1985). The concept of demand-side management for electric utilities. Proceedings of the IEEE, 73(10), 1468–1470. https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13318

Huang L., Liu H., Liu B., Ma S., Wang N., Xie H., He Z. (2025). Demand response with incomplete information: A systematic review. Electric Power Systems Research, 246, 111720. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111720

Leherbauer D., Schulz J., Egyed A., Hehenberger P. (2025). Demand-side management in less energy-intensive industries: A systematic mapping study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 212, 115315. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115315

Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 137, 511–536. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081

Palensky P., Dietrich D. (2011). Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 7(3), 381–388. https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841

Shoreh M. H., Siano P., Shafie-khah M., Loia V., Catalão J. P. S. (2016). A survey of industrial applications of Demand Response. Electric Power Systems Research, 141, 31–49. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.07.008

Siano P. (2014). Demand response and smart grids—A survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 461–478. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022

Zhang J., Zhou B., Yang Z., Guo Y., Lv C., Xu X., Liu J. (2025). A Review of Industrial Load Flexibility Enhancement for Demand-Response Interaction. Sustainability, 17(11), 4938. https://doi.org/10.3390/su17114938

ВЛИЯНИЕ СНИЖЕНИЯ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Отарбаева А.Т.
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
e-mail: ainaerlan1984@mail.ru

Аннотация. Влияние снижения пиковой нагрузки на энергоэффективность промышленных систем электроснабжения оценивается на основе расчётной модели. Цель исследования состоит в разграничении изменений максимальной мощности, технологического потребления и нагрузочных потерь при выравнивании суточного графика. Исходные данные представлены шестью четырехчасовыми интервалами условной нагрузки. Они не являются результатами измерений на действующем предприятии. Методика включает расчет энергетического баланса, коэффициента заполнения графика и потерь в эквивалентной симметричной трехфазной линии при постоянных напряжении и коэффициенте мощности. Рассмотрен сценарий переноса гибкой нагрузки при сохранении суточного объема производства. Максимальная мощность снизилась с 2000 до 1600 киловатт, а коэффициент заполнения увеличился с 0,65 до 0,8125. Технологическое потребление сохранилось на уровне 31200 киловатт-часов. При принятых параметрах линии нагрузочные потери уменьшились с 55,11 до 51,46 киловатт-часа. Снижение максимума на двадцать процентов сопровождалось сокращением общей энергии на входе примерно на 0,012 процента. Показано, что процент уменьшения потерь нельзя отождествлять с процентом общего энергосбережения. Экономическая иллюстрация выполнена по условной постоянной цене, без использования действующего тарифа конкретного предприятия. Полученные результаты относятся исключительно к заданному сценарию. Практическое применение требует проверки производственных ограничений и подтверждения результатов фактическими данными учета. Методика предназначена для предварительного сравнения мероприятий по управлению нагрузкой и определения требований к последующему обследованию предприятия.

Ключевые слова: промышленное электроснабжение, энергоэффективность, пиковая нагрузка, управление спросом, график нагрузки, потери электроэнергии.

PEAK LOAD REDUCTION AND ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Otarbayeva Ainagul
K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: ainaerlan1984@mail.ru

Abstract. The impact of peak load reduction on the energy efficiency of industrial power supply systems is evaluated using a computational model. The objective is to distinguish changes in maximum demand, process energy consumption, and load dependent network losses when a daily load profile is flattened. The input consists of six hypothetical four hour load intervals and does not represent measurements from an operating industrial facility. The method combines energy balance calculations, load factor assessment, and resistive loss calculations for an equivalent balanced three phase feeder with constant voltage and power factor. A load shifting scenario preserves daily process energy and assumes an unchanged production output. Maximum demand decreases from 2000 to 1600

kilowatts, while the load factor increases from 0.65 to 0.8125. Daily process consumption remains at 31200 kilowatt hours. Under the assumed feeder parameters, daily load dependent losses decrease from 55.11 to 51.46 kilowatt hours. A twenty percent reduction in maximum demand therefore corresponds to approximately 0.012 percent savings in total incoming energy. These findings demonstrate why relative loss reduction and overall energy savings require separate reporting. An illustrative cost calculation uses an assumed flat electricity price rather than an actual industrial tariff. The numerical findings apply only to the specified model and cannot establish savings for a particular enterprise. Implementation requires measured demand profiles, verified process flexibility, and consistent accounting boundaries. The proposed approach supports preliminary technical comparison and helps identify the information needed for subsequent industrial validation.

Keywords: industrial power supply, energy efficiency, peak load, demand management, load profile, electricity losses.