

Код МРНТИ 55.39.39

Ж.К. Татаева, К.К. Елемесов, *Д.Д. Басканбаева, Л.Б. Сабирова
Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

ГАЗ АЙДАУ СТАНЦИЯСЫНЫҢ БҰРАНДАЛЫ КОМПРЕССОРЫНЫҢ ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аннотация. Мақалада газ сорғы станцияларында қолданылатын бұрандалы компрессордың электр жетегінің тиімділігі мен сенімділігін арттыру мәселелері қарастырылады. Тұрақты ток қозғалтқышы негізіндегі электр жетегінің динамикалық сипаттамалары талданып, оның тікелей іске қосу мен жүктің кенет өзгерісі кезіндегі кемшіліктері анықталған. ПИД контроллерлерімен реттелетін басқару жүйесі әзірленіп, іске қосу токтарын шектеу, қысымның асып кетуін төмендету және жүйенің тұрақтылығын арттыру шаралары ұсынылған. Асинхронды қозғалтқышпен салыстырмалы модельдеу нәтижесінде оның артықшылықтары көрсетіліп, ұсынылған тәсілдің тиімділігі және сыртқы жағдайлардың әсеріне бейімделу үшін контроллер параметрлерін адаптивті реттеу қажеттілігі расталды. Айнымалы жиілікті жетектерді қолдану перспективалары мен жүйені толық ауқымды тестілеу қажеттілігі қорытындыланды.

Түйінді сөздер: бұрандалы компрессор, электр жетегі, басқару жүйесі, модельдеу, жиілікті реттеу, ПИД контроллері, газ айдау станциясы, автоматика.

Optimization of the Electric Drive of a Screw Compressor at a Gas Pumping Station

Abstract. The article addresses the enhancement of efficiency and reliability of the electric drive in screw compressors used at gas pumping stations. It analyzes the dynamic characteristics of a DC motor-based drive, identifying issues during direct startup and sudden load changes. A control system using PID controllers is developed to limit startup currents, reduce pressure overshoot, and improve system stability. Comparative modeling with an induction motor highlights its advantages, and the effectiveness of the proposed approach is confirmed. The need for adaptive tuning of controller parameters to address changing external conditions is emphasized. The article concludes with the prospects of variable frequency drives and the need for full-scale testing and integration with existing infrastructure.

Key words: screw compressor, electric drive, control system, modeling, frequency regulation, PID controller, gas pumping station, automation.

Оптимизация электропривода винтового компрессора газоперекачивающей станции

Аннотация. В статье рассматривается повышение эффективности и надежности электропривода винтового компрессора на газоперекачивающих станциях. Проанализированы динамические характеристики электропривода на базе двигателя постоянного тока независимого возбуждения, выявлены его недостатки при прямом пуске и резком изменении нагрузки. Разработана система управления с ПИД-регуляторами, обеспечивающая ограничение пусковых токов, снижение перерегулирования и повышение устойчивости. Проведено сравнительное моделирование с асинхронным двигателем, показавшее его преимущества. Моделирование подтвердило эффективность подхода и необходимость адаптивной настройки регуляторов для компенсации внешних условий. Сделан вывод о перспективах использования частотно-регулируемых приводов и необходимости дальнейших исследований для натурных испытаний и интеграции с инфраструктурой ГКС.

Ключевые слова: винтовой компрессор, электропривод, система управления, моделирование, частотное регулирование, ПИД-регулятор, газоперекачивающая станция, автоматизация.

Кіріспе

Табиғи газ ғаламдық энергетикалық жүйеде барған сайын маңызды рөл атқарады. Көмір мен мұнайға қарағанда экологиялық таза отын бола отырып, ол дүниежүзілік энергия тұтынудың маңызды бөлігін қамтамасыз етеді. Тұтынушыларды табиғи газбен қамтамасыз етудің ең маңызды кезеңі оны мыңдаған шақырымға созылатын магистральдық газ құбырлары арқылы тасымалдау болып табылады. Газды тиімді және сенімді тасымалдау елдердің энергетикалық қауіпсіздігі мен экономикалық дамуын қамтамасыз ету үшін стратегиялық маңызы бар.

Магистральдық газ құбыры инфрақұрылымының негізгі элементі құбырдағы қажетті қысымды ұстап тұруға және үздіксіз газ беруді қамтамасыз етуге арналған газ компрессорлық станциялары (ГКС) болып табылады. ГКС компрессорлық жабдықтың әртүрлі түрлерін пайдаланады, соның ішінде орталықтан тепкіш, поршеньді және бұрандалы компрессорлар. Газ сорғы станцияларына арналған бұрандалы компрессорлар өзінің жинақылығымен, жоғары сенімділігімен және өнімділіктің кең ауқымында жұмыс істеу қабілетімен ерекшеленеді [1].

ГКС тиімділігін арттырудың әртүрлі тәсілдері бар. Олардың бірі компрессорлық жабдықтың технологиялық жұмыс режимдерін оңтайландыру болып табылады. Бұл тәсіл ротор жылдамдығы, сору және шығару қысымы сияқты компрессордың оңтайлы жұмыс параметрлерін анықтау үшін күрделі математикалық модельдер мен алгоритмдерді қолдануды қамтиды. Дегенмен, бұл тәсіл айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етуі мүмкін және жұмыс жағдайындағы динамикалық өзгерістерді әрқашан ескермеуі мүмкін. Басқа тәсіл – технологиялық параметр-

лердің өзгеруіне жедел әрекет етуге және компрессорлық жабдықтың оңтайлы жұмыс жағдайларын сақтауға мүмкіндік беретін заманауи автоматты басқару жүйелерін пайдалану. Бұл тәсілдің артықшылығы – нақты уақыт режимінде айтарлықтай күрделі шығындарсыз ГКС тиімділігін арттыру мүмкіндігі. Дегенмен, мұндай жүйелерді әзірлеу және енгізу автоматты басқару саласындағы терең білімді және компрессорлық жабдықты пайдалану ерекшеліктерін талап етеді. Үшінші тәсіл ескірген үлгілерді заманауи және энергияны үнемдейтіндерге ауыстыру арқылы компрессорлық жабдықты жаңартуды қамтиды. Бұл тәсіл айтарлықтай инвестицияны қажет етеді, бірақ энергияны тұтынуды айтарлықтай азайтуға және газ компрессорлық станциясының сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Кемшіліктерге жаңа жабдықты қолданыстағы инфрақұрылымға біріктірудің қиындығы және жұмыстарды орындау үшін ұзақ уақыт тоқтау қажеттілігі жатады [2, 3].

Газ айдау станцияларындағы бұрандалы компрессорларды автоматтандыру газ тасымалдау жүйесінің тиімділігі мен сенімділігін арттырудың өзекті және маңызды бағыты болып табылады. Автоматтандырылған басқару жүйелері компрессорлардың технологиялық жұмыс режимдерін оңтайландыруға, энергияны тұтынуды азайтуға, жабдықтың сенімділігін арттыруға және пайдалану шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Бұрандалы компрессорларды басқарудың заманауи автоматты жүйелерін енгізу газ тасымалдау жүйесінің тұрақты және қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ететін негізгі факторлардың бірі болып табылады. Автоматтандыру көрсетілген параметрлерді дәлірек ұстауды, адам факторының әсерін азайтуды және туындаған төтенше жағдайларға тез әрекет ету мүмкінді-

гін қамтамасыз етеді [4, 5]. Сонымен қатар, автоматтандырылған жүйелер жұмыс режимдерін оңтайландыру және компрессорлардың техникалық жағдайын болжау үшін қажетті жабдықтың жұмысы туралы деректерді жинауға және талдауға мүмкіндік береді. Өз кезегінде, бұл ресурстарды пайдаланудың тиімділігін арттыруға және қызмет көрсету мен жөндеу шығындарын азайтуға әкеледі [6].

Бұл жұмыстың мақсаты бұрандалы компрессор негізіндегі газ айдау қондырғысының электр жетегінің басқару жүйесін әзірлеу, технологиялық жұмыс режимдерін оңтайландыруды және жабдықтың сенімділігін арттыруды қамтамасыз ету болып табылады. Осы жұмыс шеңберінде газ айдау қондырғыларының электр жетектерін басқарудың қолданыстағы жүйелеріне талдау жүргізілді, бұрандалы компрессордың электр жетегінің математикалық моделі жасалды, бағынышты басқару жүйесі синтезделді, MATLAB Simulink ортасында басқару жүйесін цифрлық модельдеу жүргізілді. Жұмыс нәтижелері газ тасымалдау жүйесінің тиімділігі мен сенімділігін арттыратын газ сорғы станцияларының бұрандалы компрессорларын басқарудың заманауи автоматты жүйелерін әзірлеу және енгізу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Әдістер мен материалдар

Бұл жұмыста алға қойылған мақсатқа жету үшін бұрандалы компрессор негізіндегі газ айдау қондырғысының электр жетегінің басқару жүйесінің тиімділігін әзірлеуге және бағалауға бағытталған эксперименттік және аналитикалық зерттеулер кешені жүргізілді. Жұмыстың тәжірибелік бөлімі MATLAB SimulinkR2017b ортасында басқару жүйесін цифрлық модельдеуден тұрды. Басқару объектісі Siemens 1GG5 631-5EV310-7NV5 тәуелсіз қоздырғыш тұрақты ток қозғалтқышы болды, ол супер зарядтағыш жетек ретінде таңдалды [8]. Модельдеу электр жетегінің әртүрлі жұмыс режимдері үшін жүргізілді, соның ішінде номиналды бұрыштық жылдамдықпен және жүктеме әсерінен бастап. Модельдеу мақсаты якорь тогы, бұрыштық жылдамдық және компрессор қысымындағы өтпелі процестерді бағалау, сонымен қатар басқару жүйесіндегі әлсіз нүктелерді анықтау болды.

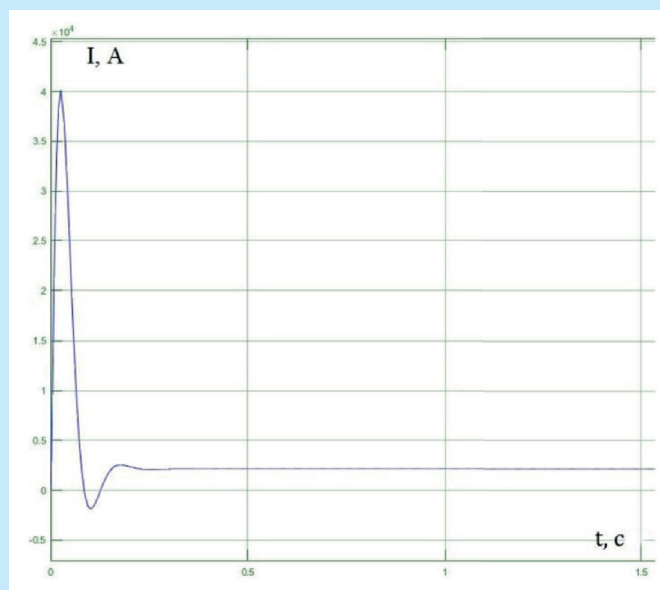
Сонымен қатар реттеуіш коэффициенттері, сүзгі параметрлері және жиілік түрлендіргіш сипаттамалары сияқты басқару жүйесінің әртүрлі параметрлерінің оның тиімділігіне әсер етуіне талдау жүргізілді. Бұл басқару жүйесінің параметрлерінің оңтайлы мәндерін анықтауға мүмкіндік берді, бұрандалы компрессордың ең жақсы өнімділігін қамтамасыз етеді, мысалы, энергияны аз тұтыну, жоғары сенімділік және жұмыс тұрақтылығы.

Нәтижелер және оларды талқылау

Жүргізілген зерттеуде газ айдау станцияларында (ГКС) қолданылатын бұрандалы компрессордың электр жетегі үшін басқару жүйесі әзірленді және бағаланды. Жүйеде болып жатқан процестерді егжей-тегжейлі талдау үшін якорь тогының, бұрыштық жылдамдықтың және компрессор жасаған қысымның өтпелі сипаттамалары өлшенді және жазылды. Бастапқы анықтамалық кернеу 10 В болды, ол компрессордың номиналды жұмыс режиміне сәйкес келді. Алынған графиктер жүйе динамикасын сандық

бағалауға және одан әрі оңтайландыруды талап ететін ықтимал кемшіліктерді анықтауға мүмкіндік берді [7].

Модельдеу нәтижесінде номиналды бұрыштық жылдамдықпен тікелей іске қосу кезінде қозғалтқыштың якорь тогы оның шамадан тыс жүктеме қабілетімен анықталған рұқсат етілген мәндерден айтарлықтай асып түсетіні анықталды. Токтың максималды мәні 5200 А-ға жетті, бұл 4664 А рұқсат етілген мәннен 11,5% жоғары (1-сурет). Бұл қозғалтқыштың шамадан тыс жүктелу қаупінің жоғарылығын және іске қосу токтарын шектеу бойынша шараларды жүзеге асыру қажеттілігін көрсетеді. Сонымен қатар, 25%-ға жеткен қысымның айтарлықтай асып кетуі байқалды. Бұл құбыр жүйесіндегі гидравликалық соққыларға, жабдықтың бұзылуына және газ компрессорлық станциясының жалпы сенімділігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Жүйенің бұрыштық жылдамдықта тұрақты күйге жетуіне кететін уақыт 1,2 секундты құрады, бұл қолайлы көрсеткіш, бірақ оны жақсартуға да болады.



Сурет 1. Рұқсат етілген мәндердің асып кетуін көрсететін жеке қоздырғышпен (DCSM) тұрақты ток қозғалтқышын тікелей іске қосу кезінде якорь тогындағы өтпелі процесс.

Figure 1. Transient process of the armature current during direct start-up of a separately excited DC motor (DPT SE), showing the exceeding of permissible values.

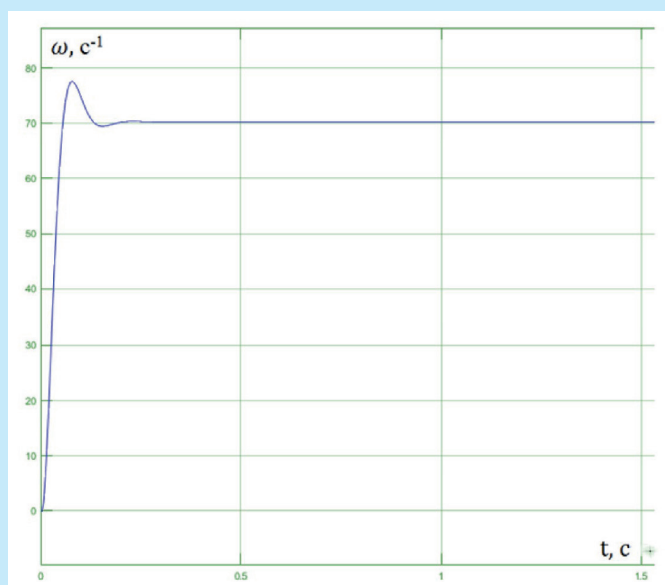
Рис. 1. Переходный процесс по току якорья при прямом пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), демонстрирующий превышение допустимых значений.

Салыстыру үшін ұқсас процесс модельденді, бірақ Danfoss VLT AutomationDrive FC 302 жиілігін реттейтін заманауи асинхронды қозғалтқыш қолданылды. Асинхронды қозғалтқыштар өздерінің қарапайымдылығы мен сенімділігіне байланысты компрессорлық станциялардың электр жетектерінің құрамында көбірек қолданылады. Жиіліктерді реттеу, өз кезегінде, қозғалтқыштың айналу жылдамдығын тегіс басқаруға және іске қосу токтарын азайтуға мүмкіндік береді. Бірдей іске қосу жағдайын-

да асинхронды қозғалтқыштың максималды статор тогы 3800 А болды, бұл тұрақты ток қозғалтқышынан 27% төмен. Қысымның асып кетуі де 15%-ға дейін төмендеді, ал тұрақты күйге жету уақыты 0,8 секундқа дейін қысқарды (2-сурет). Бұл бұрандалы компрессор жетектерінде айнымалы жиілікті жетектерді (VFD) пайдаланудың ықтимал артықшылықтарын көрсетеді.

Өзірленген жүйенің динамикалық сипаттамаларын жақсарту үшін бағынышты басқару әдісін (СРМ) қолданатын басқару жүйесі синтезделді. Якорь тогы мен бұрыштық жылдамдықты реттеу тізбектерінің каскадты қосылуына негізделген бұл әдіс электр жетегінің жұмысын дәлірек және жылдам басқаруға мүмкіндік береді.

Реттегіштердің параметрлері модульдік оптимум принципі негізінде есептелді, ол якорь тогын астатикалық бақылауды және статикалық қатені азайтуды қамтамасыз етеді. Жоғары жиілікті тербелістерді басу үшін жылдамдықты реттеу тізбегіне төмен жиілікті сүзгі енгізілді, бұл жүйенің тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік берді.



Сурет 2. Тұрақты ток қозғалтқышын тікелей іске қосу кезінде бұрыштық жылдамдықтағы ауысу процесі, тұрақты күйге жетуге кететін уақытты көрсетеді.

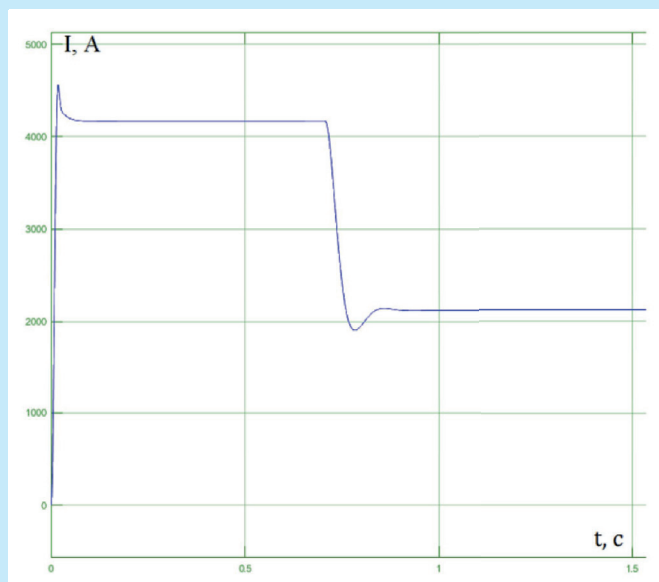
Figure 2. Transient process of angular velocity during direct start-up of a separately excited DC motor (DPT SE), showing the time to reach the steady-state mode.

Рис. 2. Переходный процесс по угловой скорости при прямом пуске ДПТ НВ, демонстрирующий время выхода на установившийся режим.

SPR жүзеге асырылғаннан кейін қайталанатын модельдеу нәтижелері динамикалық сипаттамалардың айтарлықтай жақсарғанын көрсетті. Арматураның максималды іске қосу тогы 4500 А-мен шектелді, бұл рұқсат етілген мәндер шегінде және қозғалтқыштың шамадан тыс жүктелуіне жол бермейді (3-сурет). Гидравликалық соққылар мен жабдықтың зақымдалу қаупін барынша азайтып, қысымның асып кетуі 5%-ға дейін төмендетілді. Жүйенің тұрақты күйдегі бұрыштық жылдамдыққа жетуіне кететін

уақыт 0,6 секундқа дейін қысқарды, бұл жүйенің жауап беру жылдамдығының жоғарылауын көрсетеді.

Дегенмен, бағынышты басқару жүйесін пайдалана отырып, 7,65 рад/с номиналды жылдамдықта іске қосуды модельдеу кезінде жүктемені күрт қолдану кезінде асып кету 20%-ға жеткені анықталды. Бұл газ компрессорлық станциясының нақты жұмыс жағдайларына тән айнымалы жүктемелер кезінде жүйенің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін контроллер параметрлерін одан әрі оңтайландыру қажеттілігін көрсетеді.



Сурет 3. Бағынышты басқару жүйесі бар төмен вольтты тұрақты ток қозғалтқышын іске қосу кезінде якорь тогының өтпелі процесі.

Figure 3. Transient process of the armature current during start-up of a separately excited DC motor (DPT SE) with a subordinate regulation system.

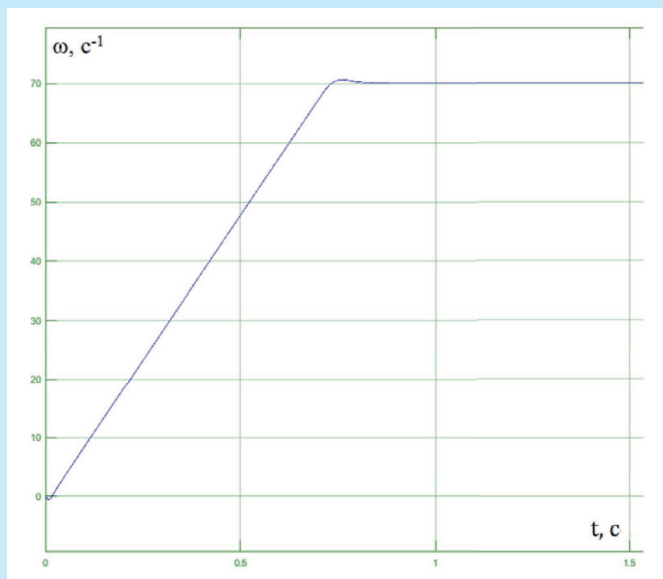
Рис. 3. Переходный процесс по току якоря при пуске ДПТ НВ с системой подчиненного регулирования.

Асинхронды қозғалтқышпен және Danfoss VLT AutomationDrive FC 302 жиілікті бақылаумен жүргізілген қосымша сынақтар PID контроллерлерін пайдалану тұрақты ток қозғалтқышының бағынышты басқару жүйесімен салыстырғанда номиналды жұмыс режиміне жеткенде өтпелі процестердің уақытын орта есеппен 15–20% қысқартуға мүмкіндік беретінін көрсетті (4-сурет). Бұл асинхронды қозғалтқыштың жоғары динамикасына және контроллер параметрлерін дәлірек реттеу мүмкіндігіне байланысты.

Өзірленген басқару жүйесінің мүмкіндіктерін неғұрлым толық зерттеу үшін газ сорғы станцияларының нақты жұмыс режимдерінің деректерін ескере отырып, асинхронды қозғалтқышпен қосымша модельдік сынақтар жүргізілді. Компрессордың кіріс және шығыс қысымының өзгеруі, газ температурасының өзгеруі және компрессор секцияларының бірінің кенеттен тоқтауы сияқты әртүрлі сценарийлер имитацияланды.

Біздің дерекқорымызда газ температурасы қыста -20°C -тан жазда $+40^{\circ}\text{C}$ -қа дейін өзгеруі мүмкін солтүс-

тік аймақтардағы компрессорлық станциялар туралы деректер бар. Модельдеу әзірленген басқару жүйесі осы факторлардың әсерін тиімді өтеуге және компрессордың тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге қабілетті екенін көрсетті.



Сурет 4. Бағынышты басқару жүйесі бар төмен жылдамдықты тұрақты ток қозғалтқышын іске қосу кезінде бұрыштық жылдамдыққа өту процесі.

Figure 4. Transient process of angular velocity during start-up of a separately excited DC motor (DPT SE) with a subordinate regulation system.

Рис. 4. Переходный процесс по угловой скорости при пуске ДПТ НВ с системой подчиненного регулирования.

Алынған деректерді талдау нәтижесінде әртүрлі жұмыс режимдерінде бұрандалы компрессордың ең жақсы өнімділігін қамтамасыз ететін реттегіш параметрлерінің оңтайлы мәндері анықталды. Компрессордың көрсетілген жұмыс параметрлерін сақтауда жоғары дәлдікті қамтамасыз ету және өзгеретін сыртқы жағдайлардың әсерін өтеу үшін адаптивті коэффициентті реттейтін PID контроллерлерін пайдалану қажет екендігі анықталды. Бұл бейімдеу жүйенің оңтайлы өнімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ете отырып, ағымдағы жұмыс жағдайларына байланысты контроллердің параметрлерін автоматты түрде реттеуге мүмкіндік береді [9].

Алынған нәтижелерді газ айдау қондырғыларын автоматтандыру саласындағы басқа зерттеулердің мәліметтерімен салыстыру әзірленген басқару жүйесінің бәсеке-лестік сипаттамалары бар екенін көрсетті. Атап айтқанда, [10]-да алынған нәтижелер PID контроллері бар айнымалы жиілікті жетекті пайдалану дәстүрлі басқару жүйелерімен салыстырғанда компрессордың энергия шығынын 10–15%-ға азайтуды қамтамасыз ететінін көрсетеді. Біздің жұмысымыз сондай-ақ энергия тұтынуды 12% төмендетуге қол жеткізді, бұл ұсынылған тәсілдің тиімділігін растайды.

Сонымен қатар, әдебиет деректері мен жабдыққа арналған техникалық құжаттаманы талдау айнымалы жиілікті жетекті пайдалану энергияны тұтынуды азайтып

қана қоймай, компрессордың сенімділігін арттыратынын көрсетті. Қозғалтқыш жылдамдығын біркелкі өзгерту жабдыққа механикалық жүктемелерді азайтады, оның қызмет ету мерзімін арттырады. Айнымалы жиілікті жетегі қозғалтқышты шамадан тыс жүктемелерден және асқын кернеулерден қорғауды қамтамасыз етеді, газ тасымалдау жүйесінің қауіпсіздігін арттырады.

Жалпы, жүргізілген зерттеу газ сорғы станцияларында бұрандалы компрессорлардың электр жетектерін басқарудың заманауи жүйелерін қолдану мүмкіндігін растады. Дамыған басқару жүйесі үлкен экономикалық және экологиялық маңызы бар газ тасымалдау жүйесінің жұмысының тиімділігін, сенімділігін және қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді. Дегенмен, әзірленген жүйені іс жүзінде іске асыру үшін нақты бұрандалы компрессоры бар стендте толық ауқымды сынақтарды қоса алғанда, одан әрі зерттеулер жүргізу, сонымен қатар реттегіш параметрлерін бейімдеуші реттеу алгоритмдерін әзірлеу қажет.

Бұдан басқа, одан әрі зерттеулер әзірленген басқару жүйесін газ тасымалдау жүйесінің қолданыстағы автоматты басқару жүйелерімен біріктіруге, сондай-ақ басқару жүйесімен жиналған деректер негізінде бұрандалы компрессорлардың техникалық жағдайын болжау алгоритмдерін әзірлеуге бағытталуы тиіс екенін атап өту маңызды. Бұл жабдыққа проактивті техникалық қызмет көрсетуге көшуге мүмкіндік береді және апаттық тоқтау қаупін азайтады, бұл сайып келгенде, газ тасымалдау жүйесінің сенімділігі мен тиімділігін арттыруға әкеледі.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу газ айдау станцияларында қолданылатын бұрандалы компрессорлардың электр жетектерін басқару жүйесін әзірлеу және оңтайландыруда цифрлық модельдеудің тиімділігін көрсетті. Модельдеу нәтижесінде алынған өтпелі процестерді талдау басқару жүйесіндегі әлсіз жерлерді анықтауға, сонымен қатар әртүрлі типтегі электр жетектерін және басқару әдістерін қолданудың артықшылықтарын бағалауға мүмкіндік берді. Контроллер параметрлерін кейіннен оңтайландырумен бағынышты басқару жүйесінің синтезі электр жетегінің динамикалық сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуға және оның кедергі келтіретін әсерлерге төзімділігін арттыруға мүмкіндік берді. Жұмыстың нәтижелері нақты газ компрессорлық станцияларында тиімді автоматты басқару жүйесін әзірлеу және енгізу үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл газ тасымалдау жүйесінің сенімділігі мен энергия тиімділігін арттыруға көмектеседі.

Бұрандалы компрессордың электр жетегін басқару үшін бағынышты басқару жүйесін (БҚЖ) пайдалану жүйесінің динамикалық сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік берді. Атап айтқанда, қысымның асып кетуін 5%-ға дейін төмендетуге, арматураның іске қосу тоғын рұқсат етілген мәндерде (4500 А) шектеуге және тұрақты күйдегі бұрыштық жылдамдыққа жету уақытын 0,6 секундқа дейін қысқартуға қол жеткізілді.

LV тұрақты қозғалтқышының Danfoss VLT Automation-Drive FC 302 айнымалы жиілікті асинхронды қозғалтқышымен модельдеу нәтижелерін салыстыру соңғысының төменгі іске қосу тоғы (3800 А), төмен қысымның асып кетуі (15%) және тұрақты күйге жету үшін қысқа уақыт

(0,8 секунд) сияқты ықтимал артықшылықтары бар екенін көрсетті. Бұл бұрандалы компрессорларға арналған электр жетектері ретінде ауыспалы жиілікті жетектерді (VFD) енгізуге бағытталған әрі қарайғы зерттеулердің орындылығын көрсетеді.

Бұрандалы компрессордың белгіленген жұмыс параметрлерін сақтауда жоғары дәлдікті қамтамасыз ету және өзгеретін сыртқы жағдайлардың (кіру және шығыс қысымы, газ температурасы) әсерін өтеу үшін адаптивті коэффициентті реттейтін PID контроллерлерін пайдалану қажет. Адаптивті баптау ағымдағы жұмыс жағдайларына байла-

нысты контроллердің параметрлерін автоматты түрде реттеуге мүмкіндік береді, жүйенің оңтайлы өнімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етеді, бұл жүргізілген модельдеу және әдебиет деректерін талдау нәтижелерімен расталады.

АЛҒЫС

Зерттеу Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің қаржылық қолдауымен № BR24992956 «Газды сығымдау үшін инновациялық жабдықтар мен технологияларды әзірлеу және құру» тақырыбы аясында жүзеге асырылды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Панкратов В.В. *Электр жетектерін автоматты басқару: оқулық. нұсқаулық* / В.В. Панкратов. I бөлім. Тұрақты ток электр жетектерінің координаталарын реттеу: Новосибирск: НМТУ, 2013. Б. 200 (орыс тілінде)
2. Aristides M. Bonanos. *Tұзсыздандыруға арналған термокомпрессорды физикалық модельдеу // Тұзсыздандыру. 2017. Т. 412. Б. 13–19 (ағылшын тілінде)*
3. Шаммазов А.М. *Сорғы және компрессорлық станцияларды жобалау және пайдалану: ЖОО-ға арналған оқу құралы: М.: ООО Недра-Бизнес-центр, 2003. Б. 404 (орыс тілінде)*
4. Коршак А.А. *Магистральдық газ құбырларының компрессорлық станциялары: оқу құралы: Ростов н/Д: Феникс, 2016. Б. 157 (орыс тілінде)*
5. Корж В.В. *Сорап-компрессорлық станциялардағы жабдықтарды пайдалану және жөндеу: оқу құралы. нұсқаулық* / В.В. Корж, А.В. Сальников. Ухта: УСТУ, 2010. Б. 184 (орыс тілінде)
6. Ahmad K. Sleiti. *Экспандер компрессорлық қондырғымен басқарылатын жаңа термомеханикалық тоңазытқыш жүйесінің өнімділігін эксперименттік зерттеу. / Ahmad K. Sleiti [және т. б.] // Қолданбалы жылу инжинирингі. 2022. Б. 212 (ағылшын тілінде)*
7. Tao Wang, Qiang Qi, Wei Zhang, Dengyi Zhan. (23 сәуір, 2023 жыл). *BP нейрондық желісіне және генетикалық алгоритмге негізделген бұрандалы компрессор профилінің параметрлерін оңтайландыруды зерттеу. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3632> (ағылшын тілінде)*
8. Chongyuan Shui, Ruifan Shao, Shulong Wei, Hongjun Li, Dengji Zhou and Linfeng Xu. *Ірі газ құбырлары үшін компрессорлардың жұмысын бақылау және оңтайландыру әдісі // Энергетикалық интернет және интерактивті энергетикалық технологиялар бойынша 2-ші халықаралық конференция, «Физика журналы: конференциялар сериясы», Нанкин, 2023. Сер. 2567 012002 (ағылшын тілінде)*
9. Иванов И.И. *Газ айдау қондырғыларының электр жетектерін басқарудың заманауи жүйелері // Өнеркәсіптегі автоматтандыру. 2020. № 5. Б. 45–50 (орыс тілінде)*
10. Ahmad K. Sleiti, Mohammed Al-Khawaja, Wahib A. Al-Ammari. *Төмен сортты жылумен жұмыс істейтін изобарикалық кеңейткіш компрессорлық қондырғысы бар біріктірілген термомеханикалық жүйесі-жобалау және талдау // Халықаралық баламалы журналы. 2020. Т. 120. Б. 39–49 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. Pankratov V.V. *Avtomaticheskoe upravlenie elektroprivodami: ucheb. posobie [Automatic Control of Electric Drives: Study Guide], V.V. Pankratov. Part I. Regulirovanie koordinat elektroprivodov postoyannogo toka [Regulation of Coordinates of DC Electric Drives], Novosibirsk: NGTU, 2013. 200 p. (in Russian)*
2. Aristides M. Bonanos. *Physical Modeling of Thermo-Compressor for Desalination Applications // Desalination. 2017. V. 412. 13–19 pp. (in English)*
3. Shammazov A.M. *Proektirovanie i ekspluatatsiya nasosnykh i kompressornykh stantsii: uchebnik dlya vuzov [Design and Operation of Pumping and Compressor Stations: Textbook for Universities], Moscow: ООО «Nedra-Biznestsentr», 2003. 404 p. (in Russian)*
4. Korshak A.A. *Kompressornye stantsii magistral'nykh gazoprovodov: uchebnoe posobie [Compressor Stations of Main Gas Pipelines: Study Guide], Rostov on Don: Feniks, 2016. 157 p. (in Russian)*
5. Korzh V.V. *Ekspluatatsiya i remont oborudovaniya nasosnykh i kompressornykh stantsii: ucheb. posobie [Operation and Repair of Pumping and Compressor Station Equipment: Study Guide], V.V. Korzh, A.V. Salnikov. Uhta: UGTU, 2010. 184 p. (in Russian)*
6. *Experimental Investigation on the Performance of a Novel Thermo-Mechanical Refrigeration System Driven by an Expander-Compressor Unit / Ahmad K. Sleiti [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2022. 212 p. (in English)*
7. Tao Wang, Qiang Qi, Wei Zhang, Dengyi Zhan. (April 23, 2023). *Research on Optimization of Profile Parameters in Screw Compressor Based on BP Neural Network and Genetic Algorithm. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3632> (in English)*
8. Chongyuan Shui, Ruifan Shao, Shulong Wei, Hongjun Li, Dengji Zhou, Linfeng Xu. *Compressor Operation Monitoring and Optimization Method for Large-scale Natural Gas Pipelines // 2nd*

International Conference on the Energy Internet and Energy Interactive Technology «Journal of Physics: Conference Series», Nanjing, 2023. Conf. Ser. 2567 012002 (in English)

9. *Ivanov I.I. Sovremennye sistemy upravleniya elektroprivodami gazoperekachivayushchikh agregatov [Modern Control Systems for Electric Drives of Gas Pumping Units], Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry]. 2020. No. 5. 45–50 pp. (in Russian)*
10. *Ahmad K. Sleiti, Mohammed Al-Khawaja, Wahib A. Al-Ammari. A Combined Thermo-Mechanical Refrigeration System with Isobaric Expander Compressor Unit Powered by Low Grade Heat – Design and Analysis // International Journal of Refrigeration. 2020. V. 120. 39–49 pp. (in English)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Панкратов В.В. Автоматическое управление электроприводами: учеб. пособие / В.В. Панкратов. Ч. I. Регулирование координат электроприводов постоянного тока: Новосибирск: НГТУ, 2013. С. 200 (на русском языке)*
2. *Aristides M. Vonaos. Физическое моделирование термокомпрессора для применения в опреснении воды // Опреснение воды. 2017. Т. 412. С. 13–19 (на английском языке)*
3. *Шаммазов А.М. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций: учебник для вузов: М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. С. 404 (на русском языке)*
4. *Коршак А.А. Компрессорные станции магистральных газопроводов: учебное пособие: Ростов н/Д: Феникс, 2016. С. 157 (на русском языке)*
5. *Корж В.В. Эксплуатация и ремонт оборудования насосных и компрессорных станций: учеб. пособие / В.В. Корж, А.В. Сальников. Ухта: УГТУ, 2010. С. 184 (на русском языке)*
6. *Экспериментальное исследование эффективности новой термомеханической холодильной системы с расширительно-компрессионным агрегатом / Ahmad K. Sleiti [и др.] // Прикладная теплотехника. 2022. С. 212 (на английском языке)*
7. *Tao Wang, Qiang Qi, Wei Zhang, Dengyi Zhan. (23 апреля 2023 г.). Исследование оптимизации параметров профиля винтового компрессора на основе нейронной сети BP и генетического алгоритма. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3632> (на английском языке)*
8. *Chongyuan Shui, Ruifan Shao, Shulong Wei, Hongjun Li, Dengji Zhou and Linfeng Xu. Метод мониторинга и оптимизации работы компрессоров для крупных газопроводов // 2-я Международная конференция по энергетическому Интернету и интерактивным энергетическим технологиям, «Журнал физики: Серия конференций», Нанкин, 2023. Сер. 2567 012002 (на английском языке)*
9. *Иванов И.И. Современные системы управления электроприводами газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. 2020. № 5. С. 45–50 (на русском языке)*
10. *Ahmad K. Sleiti, Mohammed Al-Khawaja, Wahib A. Al-Ammari. Комбинированная термомеханическая установка с изобарическим расширительным компрессором, работающим на низкосортном тепле – проектирование и анализ // Международный журнал холодильной техники. 2020. Т. 120. С. 39–49 (на английском языке)*

Авторлар туралы мәліметтер:

Татаева Ж.Қ., «Машиналар мен жабдықтардың цифрлық инженериясы» мамандығының 1-курс докторанты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), z.tatayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0009-2874-1090>

Елемесов К.К., т.ғ.к., профессор, Энергетика және машинажасау институтының директоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), k.yelemessov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>

Басқанбаева Д.Ж., Ph.D докторы, «Технологиялық машиналар және жабдықтар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), d.baskanbayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>

Сабирова Л.Б., т.ғ.к., «Технологиялық машиналар және жабдықтар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), l.sabirova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8231-9944>

Information about the authors:

Tatayeva Zh., 1st year doctoral student of the EP «Digital Engineering of Machines and Equipment», Senior Lecturer of the Department of «Technological Machines and equipment» Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Yelemessov K., Candidate of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Baskanbayeva D., Ph.D. Associate Professor of the Department of Technological Machines and equipment, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Sabirova L., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Machines and equipment, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Татаева Ж.Қ., докторант 1-го курса по ОП «Цифровая инженерия машин и оборудования», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Елемесов К.К., к.т.н., профессор, директор Института энергетики и машиностроения, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Басқанбаева Д.Д., доктор Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Сабирова Л.Б., к.т.н., ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)