



ӘОЖ 621.548.5

ҒТАХА 50.51.19

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_6

С.Қ. Оразалиева^{1*}, А.Р. Фазылова¹, С.Б. Абдрешова¹, Б.Ж. Ырыскелдиев²
¹«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті»
 КЕАҚ, Алматы, Қазақстан

² «Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті» Алматы, Қазақстан

*E-mail: s.orazalieva@aes.kz

ЖЕЛДІҢ КРИТИКАЛЫҚ ЖЫЛДАМДЫҒЫ КЕЗІНДЕ ЖЕЛ ГЕНЕРАТОРЫНЫҢ РОТОРЫН АВТОМАТТЫ ТҮСІРУДІҢ ЖАЛПЫ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Мақалада желдің күшті жүктемелерінен қорғау үшін жел генераторының роторын автоматты түрде түсіру жүйесін әзірлеудің жалпы тұжырымдамасы берілген. Жел турбинасының жұмысын автоматтандыру және оңтайландыру саласындағы заманауи зерттеулер айтарлықтай прогресті көрсетеді. Мақалада турбинаның тиімділігі мен тұрақтылығын жақсарту үшін адаптивті және болжамды басқару әдістерінің маңыздылығы және іске асыру мәселелері бойынша бірталай ғалымдардың еңбектеріне шолу жасалған. Аталған жетістіктер жел қондырғыларының тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін, оларды енгізу үшін айтарлықтай теориялық және тәжірибелік күш-жігерді қажет ететініне қарамастан, озық технологияларды енгізудің маңыздылығын көрсетеді. Сондай-ақ, қатты жел жүктемелерінде жел қондырғыларын түсіруге арналған сызықтық жетекті басқару жүйесін жасау үшін әртүрлі компоненттер зерттелді және талданды.

Негізгі назар анемометр, PID-реттегіші, жиілік түрлендіргіші және сызықтық жетек сияқты жүйенің негізгі құрамдас бөліктерінің сипаттамасына, сондай-ақ олардың математикалық модель шеңберіндегі өзара әрекеттестігіне аударылады. Қатты жел жағдайында жел генераторының роторын төмендету үшін PID-реттегішін қолданатын автоматты басқару жүйесінің сұлбасына талдау жасалады. Басқару жүйесін оңтайлы параметрлерге келтіру үшін жел жылдамдығының критикалық мәні энергетикалық әдіс арқылы есептелінеді. Желдің критикалық жылдамдығының есебі бойынша қорғаныс жүйесі іске қосылады. Басқару жүйесінің барлық компоненттерді тұйықталған басқару контуры бар бір жүйеге біріктіру, жел генераторының тұрақты және сенімді жұмысын қамтамасыз етеді, зақымдану қаупін азайтады және өнімділікті оңтайландырады. Ұсынылған тұжырымдама жел генераторларының сенімділігі мен тиімділігін арттыруға бағытталған толық шешімдерді одан әрі зерттеу және әзірлеу үшін негіз болады.

Түйін сөздер: PID-реттегіш, анемометр, жиілік түрлендіргіші, сызықтық жетек, жел генераторлары.

Кіріспе.

Заманауи экологиялық мәселелер мен энергия қажеттіліктері жел энергиясы маңызды рөл атқаратын жаңартылатын көздердің дамуын ынталандырады. Дегенмен, экстремалды ауа-райы жағдайларынан туындаған жел турбиналарының істен шығуының көбеюі жаңа шешімдерді талап етеді. Мысалы, 2000-2017 жылдар аралығында мұндай жағдайлардың

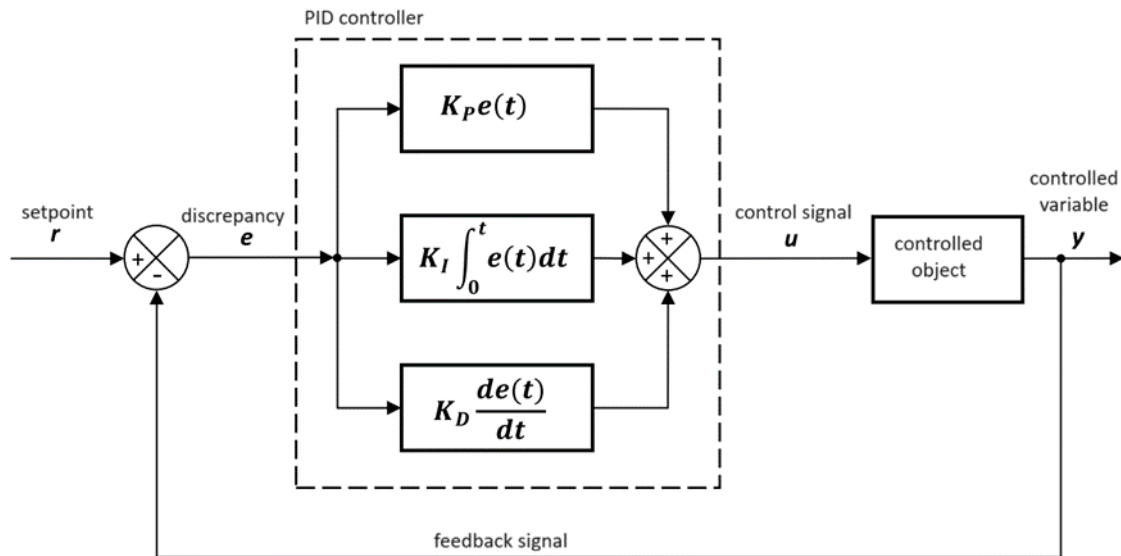
саны жылына 57-ден 167-ге дейін өсті [1]. Негізгі себептерге қалақшалардың зақымдануына және басқару жүйесінің істен шығуына әкелетін күшті желдің екпіні жатады. Қалақшалардағы жарықшақтардың жиілігі оның ұштарында 77,78% және ортаңғы бөлігінде 22,22% жетеді. Жел қондырғыларына техникалық қызмет көрсету олардың жалпы өнімділігінің 20-25%-ын құрауы мүмкін [3]. Ақауларды азайту үшін композиттер және жүктемені белсенді бақылау жүйелері сияқты, жаңа материалдар мен технологиялар қолданылады. Бұл тәсілдер құрылымдардың беріктігін арттырады және оларды экстремалды жағдайларда зақымданудан қорғайды [4]. Онипко роторы желдің төмен жылдамдығында жоғары тиімділігімен ерекшеленеді, 0,1 м/с жылдамдықпен жұмыс істей бастайды, бұл дәстүрлі жел генераторларына қарағанда айтарлықтай төмен. Алайда оның айтарлықтай салмағы мен төмен айналу жылдамдығы оны қатты желге осал етеді [5]. Сенімділікті арттыру үшін желдің критикалық жылдамдығы кезінде роторды автоматты түрде түсіру жүйесі ұсынылған [9]. Бұл шара бұзылу қаупін азайтады, жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартады және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтады. Жобаның экологиялық маңыздылығы айқын. Жаңартылатын энергияны пайдалану CO₂ шығарындыларын (выбросы) азайтады, ал сенімділікті жақсарту жабдықты өндіру мен жөндеу кезіндегі экологиялық шығындарды азайтады [6]. Басқару жүйесі БС-тың экологиялық стандарттарына сәйкес келеді және жаңартылатын энергия саласындағы мемлекеттік бастамалармен қолдау көрсетіледі. Осылайша, Онипко роторын автоматты басқару сенімділікті арттырады, шығындарды азайтады және жаңартылатын энергияның тұрақты дамуына ықпал ете отырып, тұрақты энергия өндіруді қамтамасыз етеді.

Жел турбинасының жұмысын автоматтандыру және оңтайландыру саласындағы заманауи зерттеулер айтарлықтай прогресті көрсетеді. Назарбаев Университетінде қалақшалардың аэроқұрылымдық оңтайландыруы жүргізілді, ол қолданылатын технологияларды біріктірудің күрделілігіне қарамастан өнімділіктің 6,78%-ға өсуін және салмағының 4,22%-ға төмендеуін қамтамасыз етті. Қалқымалы жел турбиналары үшін дәлдік пен тұрақтылық бойынша дәстүрлі PID реттегіштерінен асып түсетін болжамды басқару (MPC) жүйесі ұсынылады, бірақ жоғары дәлдіктегі модельдер мен маңызды есептеу ресурстарын қажет етеді [7]. Турбинаның тиімділігі мен тұрақтылығын жақсарту үшін адаптивті және болжамды басқару әдістерінің маңыздылығы *Energies* журналында атап өтілген, бірақ іске асыру қиындықтары мен жоғары есептеу жүктемесі шектеуші факторлар болып қала береді. *Fluids*-та зерттеу ресурсты көп қажет ететініне қарамастан, ағынның әрекетін дәл болжауға мүмкіндік беретін тік осьтік турбинаның (VAWTs) қалақшаларының аэродинамикасын талдау үшін LES модельдеуінің артықшылықтарын көрсетеді [8]. DOE әдісімен қалақшаның дизайнын оңтайландыру VAWTs қуат коэффициентін 22,8%-ға арттырды, бірақ күрделі баптау кеңінен қолдануды шектейді [9]. *Sustainability*-да, бөлшектердің шоғырын оңтайландыруды және тіректі векторлық регрессияны қоса алғанда, машиналық оқыту әдістерін қолдану есебінде шығындарды азайтатын және сенімділікті арттыратын датчиктерсіз басқару әдісі сипатталады [10]. Бұл жетістіктер жел қондырғыларының тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін, оларды енгізу үшін айтарлықтай теориялық және тәжірибелік күш-жігерді қажет ететініне қарамастан, озық технологияларды енгізудің маңыздылығын растайды.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

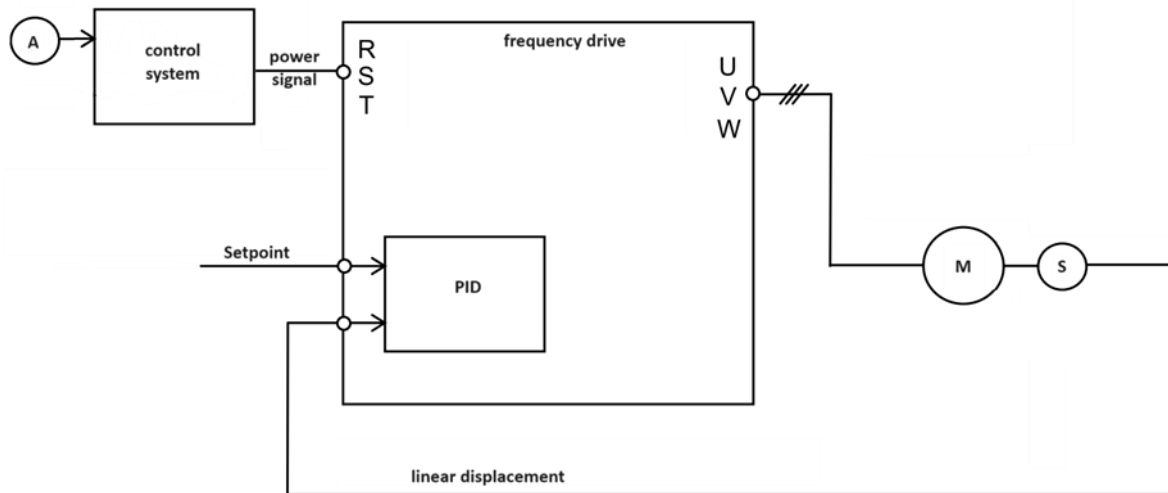
Қатты жел жүктемелерінде жел қондырғыларын түсіруге арналған сызықтық жетекті басқару жүйесін жасау үшін әртүрлі компоненттер зерттелді және талданды. Бұл бөлімде PID-реттегішінің жұмысының егжей-тегжейлері ұсынылды, оның мақсатты мәнін таңдаудың негіздемесі, таңдалған сызықтық жетектің сипаттамасы, жетектің математикалық моделі, сондай-ақ датчиктер мен жиілікті түрлендіргіштерді пайдалануды қоса алғандағы, жүйе интеграциясының ерекшеліктері келтірілген. PID-реттегіші (пропорционалды-интегралды-дифференциалды реттегіш) берілген нәтижеге жету үшін, орнатылған мән (Set Point) мен жүйенің ағымдағы күйі (Process Variable) арасындағы

айырмашылықты азайту арқылы, кері байланысы бар жүйені басқаруды жүзеге асырады [11]. 1 суретте PID-реттегішінің, контроллерінің жұмыс сұлбасы көрсетілген.



Сурет 1 – PID-реттегіші, контроллері [11]

2 суретте көрсетілген сұлба, қатты жел жағдайында жел генераторының роторын төмендету үшін PID-реттегішін қолданатын автоматты басқару жүйесі болып табылады. Жел жылдамдығының датчигі (А) ағымдағы жел жылдамдығын өлшейді және жел жылдамдығы белгіленген шекті мәннен асып кетсе, басқару жүйесін іске қосады. Мақсатты мән (SetPoint, SP) жүйенің қауіпсіздігі мен тиімділігіне қойылатын талаптар негізінде анықталатын, толық жетек жүрісінің 40% таңдалады. Бұл, берілген мәні мен жетектің ағымдағы жағдайы арасындағы айырмашылық ($e = r - y$) пропорционалды (K_P), интегралды (K_I) және дифференциалды (K_D) компоненттерінен тұратын PID контроллерінің кірісіне беріледі, олар басқару сигналын (u) ағымдағы қатге пропорционалды, жиналған қатге және қатенің өзгеру жылдамдығына сәйкес сәйкес түзетеді. Шығыс сигналдарының қосындысы, жел генераторының роторын төмендететін сызықтық жетекте әсер ететін басқару сигналын құрайды. Жетекке орнатылған сызықтық потенциометр, жетектің ағымдағы орнын өлшейді және бұл ақпаратты кері байланыс (linear displacement) ретінде жүйеге қайтарады. Жел күшті болған кезде контроллер, жел генераторының тұрақты және қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ете отырып, оның айналу жылдамдығын қауіпсіз деңгейге дейін төмендету үшін, роторды төмендететін сызықтық жетекті іске қосатын басқару сигналын генерациялайды. Қауіпсіздік пен тиімділік арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ету үшін SP мәні 40% таңдалады: ол желдің жоғары жылдамдықтарында жел генераторына желдің әсерін құрылымды толығымен түсіруді талап етпей жеткілікті түрде азайтуға мүмкіндік береді.



Сурет 2 – PID контроллеріне негізделген басқарудың жалпы сұлбасы

Мысал ретінде Оникко роторы бар жел генераторы (3 сурет) таңдалды, оның келесідей сипаттамалары бар: ротордың диаметрі 2 метр, ол 1 метр радиусқа сәйкес келеді. Ротор өтетін ауаның тығыздығы $1,225 \text{ кг/м}^3$, ал ротордың кедергі коэффициентінің мәні - 1. Осы ротормен байланысқан генератор 10 кВт-қа дейін қуат өндіруге қабілетті. Жел генераторы $0,1 \text{ м/с}$ -тан басталатын жел жылдамдығының диапазонында жұмыс істейді және желдің жылдамдығы $5,6 \text{ м/с}$ -тан аз болатын жағдайларда жұмыс істей алады, бұл жер бетінің көп бөлігін құрайды. Ротордың спиральды дизайны оның айналасында ауа жастықшасын жасайды, бұл жұмыс тиімділігін арттырады. Үлкен белсенді ротор аймағы минималды желмен максималды энергияны қамтамасыз етеді, ал қалақшаның ұзын беті желге ұшыраған үлкен аумақтың есебінде тиімділікті арттырады. Ротордың дизайны жасалудың жоғары дәлдігімен және дыбыссыз жұмыс істеуімен ерекшеленеді, бұл оны құстар үшін қауіпсіз етеді.



Сурет 3 – Оникко роторы бар жел генераторы [12]

Басқару жүйесін оңтайлы параметрлерге келтіру үшін жел жылдамдығының критикалық мәнін анықтау қажет. Күшті жел кезінде Оникко жел генераторлары роторын түсіру жүйесінің жел жылдамдығын анықтау сенімді және қауіпсіз жұмысты қамтамасыз етудегі маңызды қадамы болып табылады. Желдің критикалық жылдамдығы - жел

генераторы шамадан тыс жүктеме салдарынан зақымдалуы немесе тұрақсыз жұмыс істеуі мүмкін, шекті жылдамдық. Бұл шама жабдықты механикалық зақымданудан қорғау, оның қызмет ету мерзімін ұзарту, төтенше жағдайлардың қаупін азайту, адамдар мен қоршаған ортаның қауіпсіздігін қамтамасыз ету, генератордың тиімділігін қолдау, мәжбүрлі өшіруді болдырмау және энергия шығындарын азайту үшін қажет. Желдің критикалық жылдамдығын дәл анықтау жөндеу және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтуға, тоқтап қалу салдарынан табыстың жоғалуын болдырмауға және тұтастай алғанда жүйенің сенімділігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Жел жылдамдығының критикалық мәнін есептеу үшін энергетикалық әдіс қолданылды. Алдымен роторға түсетін желдің күшін есептейік.

Жел қуатын P_{wind} ауа ағынының кинетикалық энергиясы арқылы көрсетуге болады [13]:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

мұндағы:

A — ротордың көлденең қимасының ауданы,

ρ — ауаның тығыздығы,

v — жел жылдамдығы.

Ротордың көлденең қимасының ауданы анықталды:

$$A = \pi r^2 = 3.14 m^2 \quad (2)$$

P_{gen} генераторының қуаты C_p қуатты пайдалану коэффициенті арқылы жел қуатымен байланысқан, ол әдетте зерттелетін жел генераторының түрі үшін шамамен 0,4 болады:

$$P_{gen} = C_p P_{wind} \quad (3)$$

Демек, жел қуаты:

$$P_{wind} = \frac{P_{gen}}{C_p} \quad (4)$$

Мәндерді қоя келе, жел қуаты келесідей болып табылды:

$$P_{wind} = \frac{10 kW}{0.4} = 25 kW \quad (5)$$

Содан кейін желдің жылдамдығы, жел қуатын есептеуге арналған өрнек арқылы есептелді:

$$25 \times 10^3 = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 3.14 \cdot v^3$$

v^3 теңдеуін шешу арқылы желдің критикалық жылдамдығының мәні табылды:

$$v = \sqrt[3]{13000} \approx 23,5 m/s$$

Содан кейін осы жылдамдықта, жел күші F есептелді:

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 552,25 \cdot 3,14 \approx 1058,65 H$$

Энергетикалық тәсіл мен жел генераторының сипаттамалары негізінде желдің критикалық күші мен жылдамдығын анықтау үшін есептеулер жүргізілді. 10 кВт генератор қуаты мен $Cp \approx 0,4$ қуатты пайдалану коэффициентіне сүйене отырып, роторға түсетін жел қуаты 25 кВт құрайды. Берілген жел қуаты үшін желдің болжамды жылдамдығы шамамен 23,5 м/с құрайды. Бұл жылдамдықта роторға әсер ететін жел күші шамамен 1058,65 Н құрайды. Осылайша, роторды түсіру жүйесін іске қосу қажет желдің критикалық күші шамамен 1058,65 Н құрайды, бұл қателер мен қосымша факторларды ескере отырып, 1200 Н қажетті мәнге жақын. Бұл шамамен 25 м/с желдің мақсатты критикалық жылдамдығы жел генераторын қорғау жүйесінің берілген параметрлеріне сәйкес келетінін растайды.

Нәтижелер және оларды талқылау.

Бұл бөлімде анемометр, PI-реттегіші, жиілік түрлендіргіші және сызықтық жетек сияқты әртүрлі компоненттердің өзара әрекеттесуіне негізделген басқару жүйесінің математикалық моделі ұсынылған. Бұл компоненттердің әрқайсысы жүйенің толық моделін құруға және процесті тиімді басқаруды қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін дифференциалдық теңдеулермен сипатталады.

Жел жылдамдығын өлшеу және бұл деректерді басқару жүйесіне жіберу үшін анемометр қолданылады. Ол маңызды рөл атқарады, өйткені жел жылдамдығын дәл өлшеусіз, жүйені дұрыс басқару мүмкін емес. Анемометрдің математикалық моделі бірінші ретті сызықтық дифференциалдық теңдеумен берілген:

$$\tau_a \frac{dV_a(t)}{dt} + V_a(t) = K_a V_w(t) \quad (7)$$

мұндағы, $\tau_a = 0.1s$ – анемометрдің уақыт тұрақтысы;

$V_a(t)$ – t уақытындағы анемометрдің шығыс кернеуі;

$K_a = 2$ В/(м/с) – жел жылдамдығын кернеуге түрлендіру коэффициентіне;

$V_w(t)$ – t уақытындағы жел жылдамдығы.

Содан кейін 7 теңдеуден Лаплас түрлендіруі орындалды:

$$\tau_a s V_a(s) + V_a(s) = K_a V_w(s) \quad (8)$$

8 теңдеуді $V_a(s)$ қатысты шешіп, біз мынаны алдық:

$$V_a(s) = \frac{K_a}{\tau_a s + 1} V_w(s) \quad (9)$$

Лапласстың кері түрлендіруі уақыт аймағындағы шешімін береді:

$$V_a(t) = K_a V_w(t) (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (10)$$

PI-реттегішін іске асыратын контроллер, реттеу қатесі негізінде басқару сигналын түзетеді. PI-реттегіші ең жақсы басқаруға қол жеткізу үшін пропорционалды және интегралды әрекеттерді біріктіреді. Лаплас аймағында PI-реттегішінің теңдеуі келесідей көрінеді [14]:

$$U(s) = k_p E(s) + \frac{k_i}{s} E(s) \quad (11)$$

мұндағы, k_p – пропорционалды коэффициент;

K_i – интегралдық коэффициент;

$E(s)$ – Лаплас аймағында басқару қатесі

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (12)$$

мұндағы, $R(s)$ – берілген мән;

$Y(s)$ – жүйенің шығысы.

Уақыт аймағында PI-контроллерінің теңдеуі болып табылады:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (13)$$

мұндағы, $u(t)$ — t уақыт моментіндегі басқару сигналы;
 $e(t)$ — реттеу қатесі.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (14)$$

мұндағы, $r(t)$ — берілген мән;
 $y(t)$ — жүйенің шығысы.

Жжиілік түрлендіргіші жиілікті, демек, сызықтық жетектің жылдамдығын басқарады. Ол біркелкі және дәл басқаруды қамтамасыз ететін жетек қозғалысын дәл бақылауға, басқаруға мүмкіндік береді. Жиілік түрлендіргіш моделі келесі дифференциалдық теңдеумен сипатталады:

$$\tau_f \frac{dF(t)}{dt} + F(t) = K_f U(t) \quad (15)$$

мұндағы, $\tau_f = 0.2s$ – жиілік түрлендіргішінің уақыт тұрақтысы;
 $F(t)$ – t уақыт моментіндегі түрлендіргіштің шығыс жиілігі;
 $K_f = 50$ Гц/В – кернеуді жиілікке түрлендіру коэффициенті;
 $U(t)$ – t уақыт моментіндегі контроллерден басқару кернеуі.

Лаплас түрлендіруінен кейін келесі теңдеу алынды:

$$\tau_f s F(s) + F(s) = k_f U(s) \quad (16)$$

Салыстырмалы түрде шешім қабылдай отырып, $F(s)$:

$$F(s) = \frac{K_f}{\tau_f s + 1} U(s) \quad (17)$$

Лапласстың кері түрлендіруі уақыт аймағының шешімін береді:

$$F(t) = K_f U(t) (1 - e^{-t/\tau_f}) \quad (18)$$

Сызықтық жетек жел генераторы роторының физикалық қозғалысына жауап береді, зақымдануды болдырмау және өнімділікті оңтайландыру үшін жел жылдамдығына байланысты оның орнын бейімдейді. Сызықтық жетектің динамикасы екінші дифференциалдық теңдеумен сипатталады [15]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F(t) \quad (19)$$

мұндағы:

$m=10$ кг — жетек массасы.

$c=50$ Н·с/м — демпферлік коэффициент.

$k=200$ Н/м — серіппенің қаттылығы.

$y(t)$ — t уақыт моментіндегі жетектің орын ауыстыруы.

$F(t)$ — t уақыт моментінде жетекке түсірілген күш.

19 теңдеудің Лаплас түрлендіруі келесідей болады:

$$ms^2 Y(s) + cs Y(s) + kY(s) = F(s) \quad (20)$$

$Y(s)$ үшін салыстырмалы түрде шешіп, келесі теңдеу алынды:

$$Y(s) = \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k} \quad (21)$$

Лапластың кері түрлендіруі [38] уақыт аймағындағы шешімін береді:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k} \right\} \quad (22)$$

Потенциометр сызықтық жетектің ағымдағы жағдайын өлшеу және басқару жүйесінде кері байланысты қамтамасыз ету үшін қолданылады. Потенциометр моделі сызықтық теңдеумен сипатталады:

$$V_p(t) = K_p y(t) \quad (23)$$

мұндағы, $V_p(t)$ - t уақыт моментіндегі потенциалдың шығыс кернеуі;

$K_p = 0.5$ В/м – орын ауыстыруды кернеуге түрлендіру коэффициентіне;

$y(t)$ – t уақыт моментіндегі сызықтық жетектің орын ауыстыруы.

Әрі қарай, басқару жүйесінің толық моделін құру үшін барлық дифференциалдық теңдеулер біріктірілді. Ол үшін компоненттер арасындағы байланысты олардың шығыс және кіріс көрсеткіштері арқылы қарастырайық. Жел жылдамдығы $V_w(t)$ анемометрмен өлшенеді, ол оны шығыс кернеуге $V_a(t)$ түрлендіреді. Бұл кернеу, $E(t)$ реттеу қатесі негізінде басқару сигналын $U(t)$ есептейтін ПІ контроллеріне келіп түседі. Басқару кернеуі $U(t)$ жиілікті түрлендіргішке беріледі, ол берілген сигналға сәйкес $F(t)$ жиілігін өзгертеді. Жиілік сызықтық жетекке түсетін күшті анықтайды. Сызықтық жетек өз кезегінде роторды $y(t)$ қашықтыққа жылжытады, ол потенциалмен өлшенеді. Потенциометр орын ауыстыруды $V_p(t)$ шығыс кернеуіне түрлендіреді, ол ротордың ағымдағы жағдайына негізделген басқару сигналын реттеу үшін контроллерге кері беріледі, осылайша тұйықталған басқару контурын қамтамасыз етеді. Әрбір компоненттің математикалық модельдерінің теңдеулерін біріктіру арқылы жүйенің толық теңдеуі алынды:

$$Y(s) = \frac{k_f \left(k_p (R(s) - Y(s)) + \frac{k_I}{s} (R(s) - Y(s)) \right)}{(\tau_f s + 1)(ms^2 + cs + k)} \quad (24)$$

Жел генераторын басқару жүйесінің ұсынылған математикалық моделі жүйенің тиімді жұмысы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін дәл өлшеу және көрсеткіштерді дұрыс басқару маңыздылығын көрсетеді. Анемометр, ПІ-контроллері, жиілік түрлендіргіші және сызықтық жетек арасындағы өзара әрекеттесуді модельдеу процесті дәл баптауға, реттеуге және басқаруға мүмкіндік береді. Барлық компоненттерді тұйықталған басқару контуры бар бір жүйеге біріктіру, жел генераторының тұрақты және сенімді жұмысын қамтамасыз етеді, зақымдану қаупін азайтады және өнімділікті оңтайландырады.

Қорытынды.

Бұл мақалада жел генераторы роторын қатты жел жүктемелері кезінде автоматты түрде түсіруге бағытталған басқару жүйесінің жалпы тұжырымдамасы берілген. Жүргізілген есептеулер ұсынылған модельдің тиімділігін растады және қорғаныс жүйесі іске қосылған жел жылдамдығының критикалық мәнін анықтауға мүмкіндік берді. Желдің критикалық жылдамдығы 23,5 м/с болатыны анықталды, бұл роторға шамамен 1058,65 Н күштің әсеріне сәйкес келеді. Бұл көрсеткіштер жабдықты механикалық зақымданудан қорғауды қамтамасыз етеді, жұмыс сенімділігін арттырады және қондырғының қызмет ету мерзімін ұзартады. Ұсынылған тұжырымдама тәжірибелік тексеруді және инженерлік шешімдерді әзірлеуді қоса алғанда, одан әрі зерттеулерге негіз болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Тянь К., Сон, Л., Чен Ю., Цзяо Х., Фэн Р., Тянь Р. (2022). Қатты жел кезінде жел турбинасы қалақтарының кернеулі муфталарын талдау және ақаулардың зақымдануын бағалау. Энергия 15(2), с. 464. DOI: 10.3390/en15020464
2. Сю Л., Юань Ю., Ван Дж., Ли Х. (2021). Жел турбинасы қалақтарының зақымдануын жан-жақты талдау. Энергия 14(20), с. 6768. DOI: 10.3390/en14206768
3. Чжан Т., Ван Ю., Лю З., Сун Х., Ли Дж. (2023). Жел турбинасы жабдықтарының істен шығуын талдау және интеллектуалды пайдалану пд техникалық қызмет көрсетуді зерттеу. Тұрақтылық, 15(10), с. 8333. DOI: 10.3390/su15108333
4. Ким Х., Ли Дж., Пак С., Чо Г., Чой М. (2022). Жел турбинасы қалақтарының істен шығуының негізгі себептері мен механизмдері: Шолу. Материалдар, 15(9), с. 2959. DOI: 10.3390/ma15092959
5. Браун, Р., Смит, К., Джонс, П., Уилсон, А. (2021). Жел турбинасы компоненттерінің істен шығу режимдеріне шолу. Энергия, 14(17), с. 5241. <https://doi.org/10.3390/en14175241>
6. Миллер Д., Томпсон Б., Джонсон С., Мартинес Р. (2021). Жел энергиясын пайдалану мен техникалық қызмет көрсетудегі жаңа тенденциялар. Қолданбалы ғылымдар, 11(4), с. 1386. DOI: 10.3390 / app11041386
7. Фазылова А., Илиев Т. А. (2022) Жел генераторының қалақтарының жаңа түрі механикалық автоматты басқару жүйесі. Байланыс, ақпараттық, электронды және энергетикалық жүйелер бойынша халықаралық конференция, CIEES 2022 – Конференция материалдары.
8. Ли Х., Чжан Ю., Ван К., Чжоу Т. (2022). Жел турбиналарының жағдайын бақылау жүйесін жобалау. Энергия, 15(2), с. 464. DOI: 10.3390/en15020464
9. Андерсен П., Педерсен Л., Хансен Дж., Кристенсен М. (2017). Жел турбинасының қалақтарына арналған материалдар: Шолу. Материалдар, 10(11), с. 1285. DOI: 10.3390/ma10111285
10. Уилсон Дж., Митчелл А., Томпсон Д., Грин С. (2021). Жел турбиналарының планетарлық берілістерінің істен шығуын талдау. Энергия, 14(20), с. 6768. DOI: 10.3390/en14206768
11. Тейлор Р., Уилсон М., Джонсон Б., Браун Т. (2021). Жел турбинасындағы апаттар туралы онжылдық жаңалықтарды тақырыптық модельдеу арқылы талдау. Тұрақтылық, 13(22), с. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
12. Ван Си-С., Чианг М. - Х. (2016). Кері байланысты сызықтық басқарумен екі дәрежелі еркіндік қозғалысын басқаруды қолданатын үлкен жел турбинасының қадамды басқарудың жаңа жүйесі. Энергия, 9 (10), с. 791. DOI: 10.3390/en9100791
13. Симани С. (2015). Жел турбиналары жүйелерін модельдеуге және басқарудың озық стратегияларына шолу. Энергия, 8 (12), 13395-13418. DOI: 10.3390/en81212374
14. Надими Э.С., Герп Дж. (2023). Арнайы шығарылым: жел турбиналары жүйелерін нақты уақыт режимінде бақылау және бақылау. Энергия, 13(22), с. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
15. Батай С., Байдуллаева А., Чжао Ю., Вэй Д., Байғарина А., Сәрсенов Е., Шабдан Ю. (2024). Жел турбиналарының қалақтарын аэроқұрылымдық жобалауды оңтайландыру. Процестер, 12(1), 22. DOI: 10.3390/pr12010022

References

1. Tian K., Son, L., Chen Y., Jiao X., Feng R., Tian R. (2022). Stress coupling analysis and failure damage evaluation of wind turbine blades during strong winds. Energies 15(2), s. 464. DOI: 10.3390/en15020464
2. Xu L., Yuan Y., Wang J., Li H. (2021). A comprehensive analysis of wind turbine blade damage. Energies 14(20), s. 6768. DOI: 10.3390/en14206768

3. Zhang T., Wang Y., Liu Z., Sun H., Li J. (2023). Analysis of wind turbine equipment failure and intelligent operation and maintenance research. Sustainability, 15(10), s. 8333. DOI: 10.3390/su15108333
4. Kim H., Lee J., Park S., Cho G., Choi M. (2022). Root causes and mechanisms of failure of wind turbine blades: Overview. Materials, 15(9), s. 2959. DOI: 10.3390/ma15092959
5. Brown R., Smith K., Jones P., Wilson A. (2021). A review on failure modes of wind turbine components. Energies, 14(17), s. 5241. <https://doi.org/10.3390/en14175241>
6. Miller D., Thompson B., Johnson C., Martinez R. (2021). New tendencies in wind energy operation and maintenance. Applied Sciences, 11(4), s. 1386. DOI: 10.3390/app11041386
7. Fazylova A., Iliev T.A (2022) New type of wind generator blades mechanical automatic control system. International conference on communications, information, electronic and energy systems, CIEES 2022 – Proceedings.
8. Li X., Zhang Y., Wang Q., Zhou T. (2022). Design of a condition monitoring system for wind turbines. Energies, 15(2), s. 464. DOI: 10.3390/en15020464
9. Andersen P., Pedersen L., Hansen J., Kristensen M. (2017). Materials for wind turbine blades: An Overview. Materials, 10(11), s. 1285. DOI: 10.3390/ma10111285
10. Wilson J., Mitchell A., Thompson D., Green S. (2021). Failure analysis of wind turbine planetary gear. Energies, 14(20), s. 6768. DOI: 10.3390/en14206768
11. Taylor R., Wilson M., Johnson B., Brown T. (2021). Analyzing a decade of wind turbine accident news with topic modeling. Sustainability, 13(22), s. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
12. Wang C.-S., Chiang M.-H. (2016). A novel pitch control system of a large wind turbine using two-degree-of-freedom motion control with feedback linearization control. Energies, 9(10), s. 791. DOI: 10.3390/en9100791
13. Simani S. (2015). Overview of modelling and advanced control strategies for wind turbine systems. Energies, 8(12), s. 13395-13418. DOI: 10.3390/en81212374
14. Nadimi E. S., Herp J. (2023). Special issue: real-time monitoring and control for wind turbine systems. Energies, 13(22), s. 12757. DOI: 10.3390/su132212757
15. Batay S., Baidullayeva A., Zhao Y., Wei D., Baigarina A., Sarsenov E., Shabdan Y. (2024). Aerostructural design optimization of wind turbine blades. Processes, 12(1), s. 22. DOI: 10.3390/pr12010022

РАЗРАБОТКА ОБЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПУСКАНИЯ РОТОРА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ПРИ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

***Аннотация.** В статье представлена общая концепция разработки системы автоматического опускания ротора ветрогенератора для защиты от сильных ветровых нагрузок. Современные исследования в области автоматизации и оптимизации работы ветряных турбин показывают значительный прогресс. В статье представлен обзор работ ряда ученых по вопросам важности и реализации адаптивных и прогнозных методов управления для повышения эффективности и устойчивости турбины. Данные достижения подчеркивают важность внедрения передовых технологий для повышения эффективности и надежности ветроустановок, несмотря на то, что для их внедрения требуются значительные теоретические и практические усилия. Также были исследованы и проанализированы различные компоненты для разработки системы управления линейным приводом для разгрузки ветровых установок при сильных ветровых нагрузках. Основное внимание уделено описанию ключевых компонентов системы, таких как анемометр, PID-регулятор, частотный преобразователь и линейный привод, а также их взаимодействию в рамках математической модели.*

Анализируется схема системы автоматического управления, использующей PID-регулятор для понижения Ротора ветрогенератора в условиях сильного ветра. Для приведения системы управления к оптимальным параметрам критическое значение

скорости ветра вычисляется энергетическим методом. Приводится расчет критической скорости ветра, при достижении которой активизируется система защиты. Объединение всех компонентов системы управления в единую систему с замкнутым контуром управления обеспечивает стабильную и надежную работу ветрогенератора, снижает риск повреждения и оптимизирует производительность.

Предложенная концепция служит основой для дальнейших исследований и разработки полноценных решений, направленных на повышение надежности и эффективности ветрогенераторов.

Ключевые слова: PID-регулятор, анемометр, частотный преобразователь, линейный привод, ветрогенератор.

DEVELOPMENT OF A GENERAL SYSTEM FOR AUTOMATIC LOWERING OF A WIND GENERATOR ROTOR AT CRITICAL WIND SPEED

Abstract. The article presents the general concept of developing a system for automatically lowering the rotor of a wind turbine to protect against strong wind loads. Modern research in the field of automation and optimization of wind turbines shows significant progress. The article provides an overview of the work of a number of scientists on the importance and implementation of adaptive and predictive control methods to improve turbine efficiency and stability. These achievements emphasize the importance of introducing advanced technologies to improve the efficiency and reliability of wind turbines, despite the fact that significant theoretical and practical efforts are required to implement them. Various components were also investigated and analyzed for the development of a linear actuator control system for unloading wind turbines under heavy wind loads. The main focus is on describing the key components of the system, such as an anemometer, a PID controller, a frequency converter, and a linear actuator, as well as their interaction within a mathematical model. The scheme of an automatic control system using a PID controller to lower the rotor of a wind turbine in high wind conditions is analyzed. To bring the control system to optimal parameters, the critical value of the wind speed is calculated using the energy method. The calculation of the critical wind speed is given, at which the protection system is activated. Combining all components of the control system into a single closed-loop control system ensures stable and reliable operation of the wind turbine, reduces the risk of damage and optimizes performance. The proposed concept serves as the basis for further research and development of full-fledged solutions aimed at improving the reliability and efficiency of wind turbines.

Key words: PID controller, anemometer, frequency converter, linear drive, wind generator.

Авторлар туралы мәлімет

Оразалиева Сандуғаш Құдайбергеновна	PhD, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚның «Электрондық инженерия» кафедрасының меңгерушісі, қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан E-mail: s.orazalieva@aes.kz
Фазылова Алина Ринатовна	PhD, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚның «Электрондық инженерия» кафедрасының аға оқытушысы, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: a.fazylova@aes.kz
Абдрешова Самал Бексултановна	PhD, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚның «Электрондық инженерия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан E-mail: s.abdrashova@aes.kz
Ырыскелдиев Бексултан Жанайұлы	Магистрант, «Халықаралық көлік гуманитарлық университеті» Алматы қ., Қазақстан, E-mail: yryskeldiev06@gmail.com

Сведение об авторах

Оразалиева Сандугаш Кудайбергеновна	PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой Электронной инженерии, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан, E-mail: s.orazalieva@aes.kz
Фазылова Алина Ринатовна	PhD, старший преподаватель кафедры Электронной инженерии, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан, E-mail: a.fazylova@aes.kz
Абдрешова Самал Бексултановна	PhD, ассоциированный профессор кафедры Электронной инженерии, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан, E-mail: s.abdreshova@aes.kz
Ырыскелдиев Бексултан Жанайулы	Магистрант, «Международный транспортно- гуманитарный университет» г. Алматы, Казахстан, E-mail: yryskeldiev06@gmail.com

Information about the authors

Orazalieva Sandugash Kudaibergenovna	PhD, Associate Professor, Head of the Department of Electronic Engineering, NAO "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, E-mail: s.orazalieva@aes.kz
Fazylova Alina Rinatovna	PhD, Senior Lecturer, Department of Electronic Engineering, NAO "Almaty University of Power Engineering and Communications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.fazylova@aes.kz
Abdreshova Samal Beksultanovna	PhD, Associate Professor, Department of Electronic Engineering, NAO "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, E-mail: s.abdreshova@aes.kz
Yryskeldiev Beksultan Zhanayuly	Master's Student, «International University of Transport and Humanities» Almaty, Kazakhstan, E-mail: yryskeldiev06@gmail.com