

УДК 681.513.6

DOI 10.52167/1609-1817-2022-121-2-580-590

А.К.Шукирова¹, Г.А.Ускенбаева¹, Л.Г.Рзаева¹,
Ж.К.Абдугулова¹, А.И.Наурызбаева²

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Казахстан

E-mail: aliya.shukirova@mail.ru

АДАПТИВНЫЙ НЕЧЁТКИЙ ПИД-РЕГУЛЯТОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОМ НАКЛОНА ЛОПАСТИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Аннотация. В статье представлена разработка адаптивного регулятора для управления углом наклона лопастей ветрогенератора с целью повышения стабильности, производительности и выходной мощности. Для увеличения мощностей ветряной турбины строятся роторы большего размера, что увеличивает аэродинамические нагрузки на лопасти, но с помощью хороших регуляторов угла наклона можно улучшить профиль подъема лопастей несущего винта. В исследовании системы управления выбраны ПИД-регулятор, регулятор нечеткой логики и адаптивный нечеткий ПИД-регулятор. На основе математической модели ветряной турбины было выполнено моделирование системы управления углом наклона лопасти в MATLAB.

Ключевые слова. Адаптивное управление, ПИД-регулятор, регулятор нечеткой логики, ветряная турбина, угол наклона лопасти.

Введение.

Согласно прогнозам, ожидается, что к 2050 году мировой спрос на энергию вырастет в 3 раза. По меньшей мере от 15 до 20 процентов мирового спроса на энергию будет удовлетворяться непосредственно за счет новых и возобновляемых источников энергии [1]. В продвижении низкоуглеродной экономики и усилении защиты окружающей среды на сегодняшний день ветряная энергетика становится одной из самых быстрорастущих новых источников энергии. Ожидается, что общая установленная мощность ветряной энергетики в 2025 г. достигнет 1 019,5 ГВт и более. Использование ветряной энергетики растет, потому что она экологически чистая, но данный вид энергии стоит дорого, и для экономичного использования необходимо свести к минимуму возникновение ошибок. Одним из факторов, вызывающих напряжение и амортизацию в ветряных турбинах, являются колебания и высокий выброс. Так как ось генератора ветряной турбины соединена с валом генератора, колебания скорости будут передаваться на генератор, поэтому амортизация генератора и ветряной турбины увеличится. По этой причине возрастает потребность в профилактическом уходе и техническом обслуживании турбин. Из-за высокой стоимости ветряных турбин и их установки в труднодоступных регионах такая большая амортизация повлечет за собой высокие затраты, что свидетельствует о важности регулирования скорости ветряных турбин путем управления углом наклона лопасти. Если не контролировать колебания ветряной турбины, в асинхронных генераторах можно наблюдать колебания электрической частоты, поэтому скорость ветряной турбины необходимо регулировать. В этой статье будут представлены три типа регуляторов, состоящих из регулятора нечеткой логики, ПИД-регулятора и

адаптивного нечеткого ПИД-регулятора для управления углом наклона лопасти ветряной турбины, который с свою очередь будет регулировать скорость ветряной турбины на опорном уровне. Результаты его моделирования показаны с использованием программного обеспечения Simulink / Matlab.

Методы и исследования.

Виды ветряных турбин.

С точки зрения физической установки различают ветряные турбины с горизонтальной осью (ВГО) и ветряные турбины с вертикальной осью (ВВО). Первоначально рассматривались конструкции с вертикальной осью из-за их ожидаемых преимуществ все направленности (следовательно, не требуется система рыскания) и наличия зубчатых колес и генерирующего оборудования в основании башни. Однако снижение аэродинамической эффективности вследствие нахождения большей части поверхности лопасти близко к оси привели к уменьшению присутствия ВВО на коммерческом рынке.

В ВГО лопасти ветряной турбины вращаются вокруг оси, параллельной земле и ветровому потоку. Почти все более крупные турбины, используемые в современных ветряных электростанциях, являются ВГО, потому что они лучше подходят для использования большего количества ветряной энергии. Однако ВГО подвергаются реверсивным гравитационным нагрузкам, которые накладывают ограничение на размеры таких турбин. Вращение как ВГО, так и ВВО может приводиться в действие главным образом подъемной силой или силой сопротивления в зависимости от конструкции лопасти.

Современная индустрия ветряных турбин смещается в сторону переменной скорости из-за их лучшей общей производительности. Они в полной мере используют вариации скорости ветра, испытывают меньшее механическое напряжение и меньшие колебания мощности и обеспечивают на 10-15% более высокую выходную мощность по сравнению с генераторами с постоянной скоростью.

Чтобы получить от ветра максимально возможное количество ветряной энергии, лопасти должны как можно больше взаимодействовать с ветром, дующим в пределах стреловидной зоны. Теоретически, чем больше лопастей у ветряной турбины, тем она эффективнее. Но на самом деле, когда число лопастей увеличивается, внутри лопастей будет больше помех. В результате более вероятно, что лопасть пройдет через нарушенную область более слабого ветрового потока. С точки зрения устойчивости конструкции число лопастей ВГО должно быть нечетным и больше или равно 3, и в этом случае динамические свойства ротора турбины аналогичны динамическим свойствам диска. Поэтому большинство доступных современных ветряных турбин являются трехлопастными.

Компоненты ветряных турбин.

Основные компоненты системы ветряных турбин показаны на рисунке 1. Турбина состоит из лопастей, ступицы ротора и соединительных компонентов. Приводная передача образована вращающейся массой турбины, низкоскоростным валом, коробкой передач, высокоскоростным валом и вращающейся массой генератора. Он передает механическую энергию турбины на ротор генератора, где она преобразуется в электрическую энергию. Ветер ударяет в ротор турбины с горизонтальной осью, заставляя ее вращаться. Низкоскоростной вал передает энергию в коробку передач, которая увеличивает скорость и вращает высокоскоростной вал. Высокоскоростной вал заставляет генератор вращаться, следовательно, вырабатывать электричество. Система рыскания используется для поворота гондолы так, чтобы ротор был обращен к ветру.

Низкоскоростной вал содержит трубы для гидравлической системы, приводящей в действие аэродинамический тормоз. Высокоскоростной вал оснащен аварийным механическим тормозом, который используется в случае выхода из строя аэродинамического тормоза.

Генератор преобразует механическую энергию ветра в электрическую. Обычно генератор вырабатывает мощность при низком напряжении, а трансформатор повышает выходное напряжение генератора до напряжения подключенной сети. Трансформатор может быть размещен в нижней части башни или в гондоле для минимизации потерь.

Другими компонентами системы ветряных турбин являются анемометр для измерения скорости ветра и флюгер для измерения направления ветра. Информация о скорости ветра используется для определения достаточности скорости ветра для запуска турбины и отключения турбины для обеспечения безопасности, тогда как измерение направления ветра используется механизмом управления рысканием, который помогает ориентировать ротор в направлении ветра. Электрические вентиляторы и маслоохладители используются для охлаждения трансмиссии и генератора.

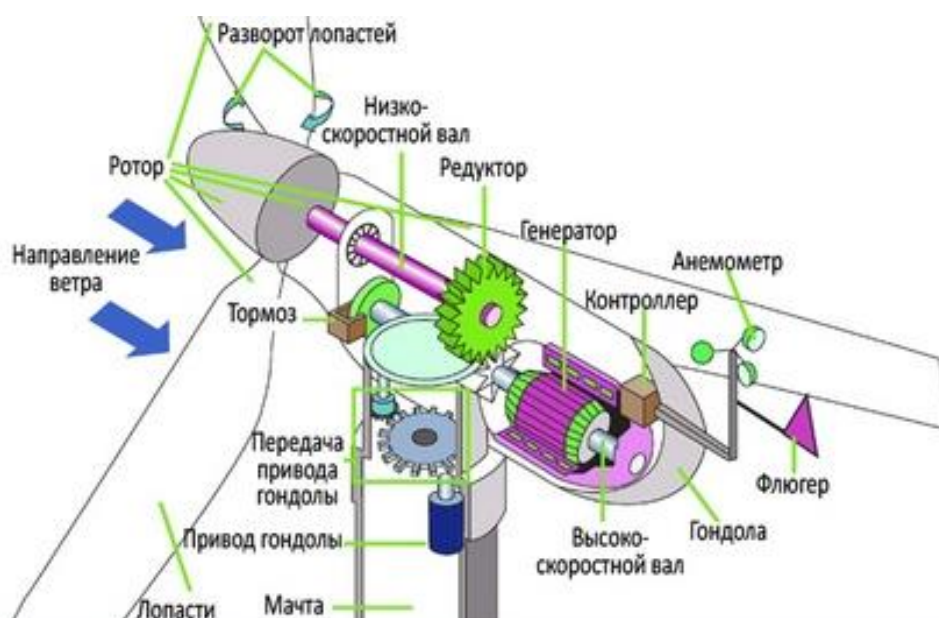


Рисунок 1 – Компоненты ветряных турбины с горизонтальной осью

Модель ветряной турбины.

Взаимосвязь регулятора угла наклона с другими компонентами системы ветровой турбины показана на рисунке 2.

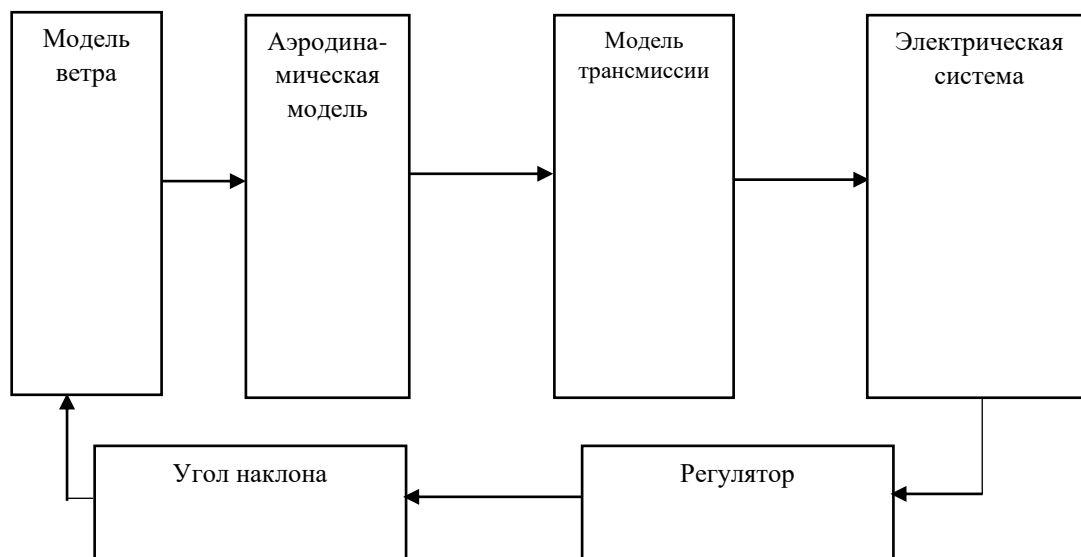


Рисунок 2 – Общая модель ветряной турбины

Аэродинамическая модель.

Ветряные турбины захватывают энергию с помощью вращающихся лопастей, а захваченная энергия затем передается через вал к генератору в виде крутящего момента для выработки электроэнергии. Связь между мощностью и скоростью ветра можно выразить следующим образом [2]:

$$P_a = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho R^2 \pi v^3 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}, \quad (2)$$

где P_a — аэродинамическая мощность, захватываемая лопастями ротора ветряной турбины;

C_p — коэффициент мощности ротора;

ρ — плотность воздуха;

R — радиус вращения лопасти;

v — скорость ветра;

λ — соотношение угла наклона лопасти к скорости;

β - угол наклона лопасти.

Коэффициент мощности C_p связан с передаточным числом λ и углом наклона лопастей несущего винта β . На рисунке 3 показана типичная кривая C_p в зависимости от отношения угла наклона лопасти к скорости. C_p изменяется при различных значениях угла наклона лопасти, но наилучшая эффективность достигается при $\beta=0$.

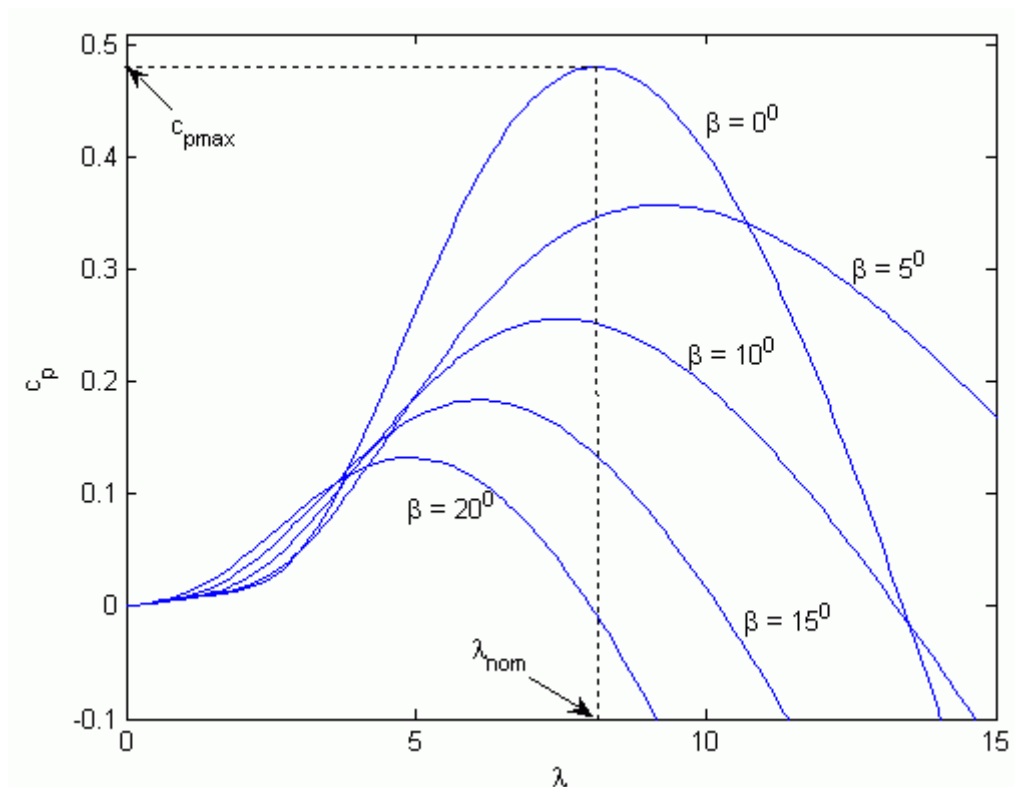


Рисунок 3 – C_p при различных значениях угла наклона лопасти

Зависимость C_p от соотношения λ и угла наклона β может равняться уравнению ниже.

$$C_p = (\lambda, \beta) = c_1 \left[c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5 \right] \exp() - c_6 \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Используемые значения коэффициентов: $c_1 = 0.5$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 0$, $c_5 = 5$, $c_6 = 21$.

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \right)^{\frac{0.085}{1+\beta^3}}} \quad (4)$$

Модель трансмиссии.

Система привода ветряных турбин в основном состоит из ротора ветряной турбины, низкоскоростного вала, трансмиссии, высокоскоростного вала и ротора генератора. В данной статье выбрана двухмассовая модель с гибкой осью (рисунок 4). В модели учтено, что низкоскоростной и высокоскоростной валы являются гибкими, что позволяет ротору ветроустановки и ротору генератору иметь свои вращательные степени свободы. Ускорение ротора ветряной турбины определяется дисбалансом между аэродинамическим моментом и тормозным моментом низкоскоростного вала, а ускорение ротора генератора определяется дисбалансом между моментом привода высокоскоростного вала и генератором момента [3].

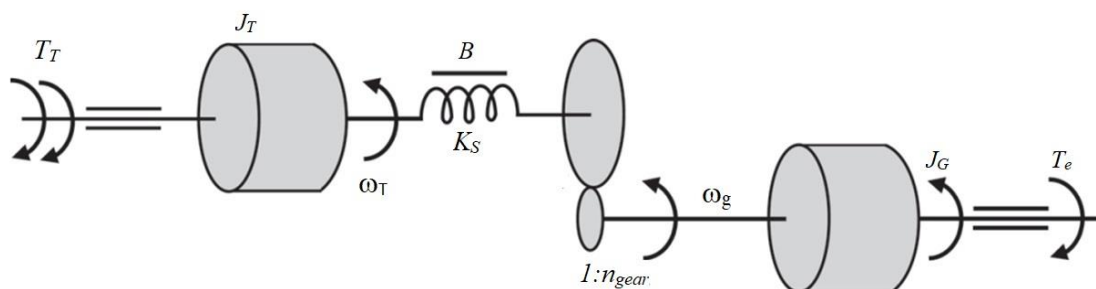


Рисунок 4 – Механическая модель трансмиссии

Трансмиссия преобразует аэродинамический крутящий момент низкоскоростного вала T_T в крутящий момент высокоскоростного вала T_e . Динамика трансмиссии описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_T = \frac{1}{J_T} [T_T - (K_s \delta\theta + B \delta\omega)], \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} (\delta\theta) = \delta\omega, \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_g = \frac{1}{J_G} \left[\frac{1}{n_{gear}} (K_s \delta\theta + B \delta\omega) - T_e \right], \quad (7)$$

где $\delta\theta = \frac{\theta_T - \theta_g}{n_{gear}}$, $\delta\omega = \frac{\omega_T - \omega_g}{n_{gear}}$,

T_T - крутящий момент механической турбины;

T_e - крутящий момент электромеханического генератора;

J_T - момент инерции ветряной турбины;

J_G - момент инерции генератора;

K_s - коэффициент жесткости;

B - коэффициент демпфирования;

ω_T - скорость вала ветряной турбины;

ω_g - скорость вала генератора;

θ_T - угол вала ветряной турбины;

θ_g - угол вала генератора;

$1 : n_{gear}$ - передаточное число.

Система управления углом наклона.

А) ПИД-управление. ПИД-управление является наиболее широко используемой традиционной стратегией управления ветряными турбинами с переменной скоростью. Результаты моделирования показывают, что, когда скорость ветра выше номинальной, звено регулировки усиления может эффективно улучшить характеристики управления ветряными турбинами. ПИД-регулятор предназначен для управления скоростью ветряных турбин с переменной скоростью и постоянной частотой для регулировки угла наклона. ПИД-регулятор имеет простую структуру, высокую надежность и хорошую стабильность, но чрезмерно зависит от параметров модели управляемых объектов.

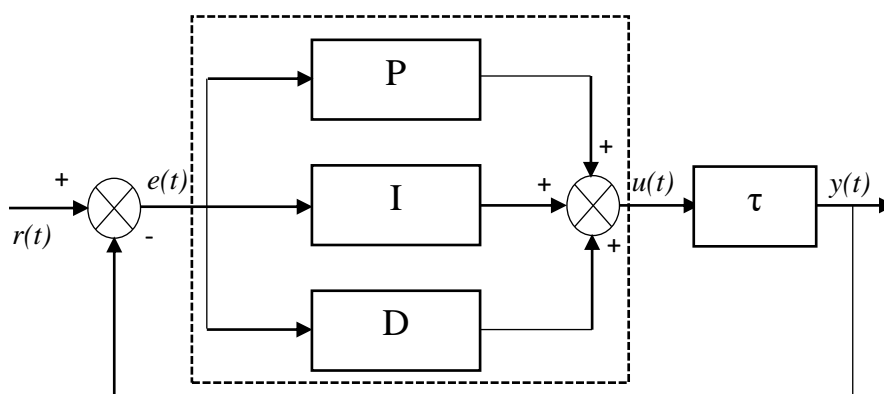


Рисунок 5 – Структурная схема ПИД-регулятора

ПИД-регулятор широко используется в промышленности и обладает некоторыми интересными свойствами. Он состоит из трех частей: пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего управления, которое соответственно обрабатывает значения в настоящем, прошлом и будущем времени. Пропорциональная часть определяет скорость системы, а интегрирующая часть дополняет ее, уменьшая установившуюся ошибку. Чтобы иметь возможность противодействовать предстоящей ошибке, вызванной системой, она должна включать дифференцируемую часть, которая может повысить стабильность. Входной сигнал при использовании ПИД-регулятора определяется как

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t). \quad (8)$$

Б) Регулятор нечеткой логики полезен, когда динамика системы недостаточно известна или, когда она содержит значительные нелинейности, например, при ветре, характеризующемся сильной турбулентностью. Регулятор нечеткой логики применяет правила так же, как люди принимают решения. Таким образом, правила регулятора содержат экспертные знания о системе. Процесс проектирования регулятора нечеткой логики состоит из определения входных данных, настройки правил и разработки метода преобразования нечеткого результата правил в выходной сигнал, известного как дефазификация. Для получения точного выходного сигнала регулятора нечеткой логики используется метод средневзвешенного значения [4].

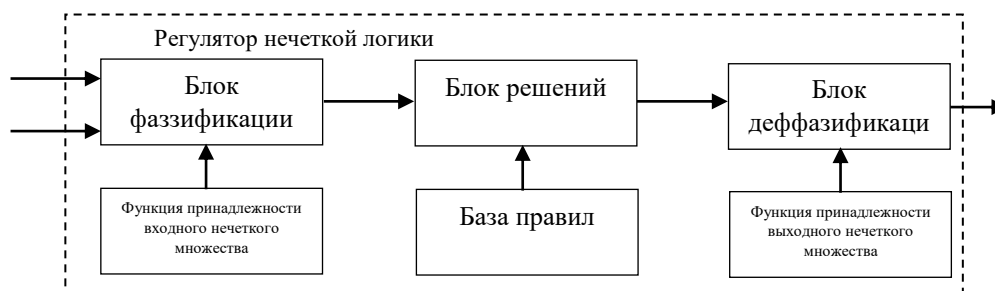


Рисунок 6 – Структурная схема системы с нечеткой логикой

В) Адаптивное управление. Основанное на новой теории и новых технологиях, нечеткое адаптивное управление является эффективным методом решения проблемы самонастройки параметров ПИД. Идея нечеткого адаптивного ПИД-регулирования заключается в сочетании обычного ПИД-регулятора с регулятором нечеткой логики (рисунок 7). С одной стороны, он обладает адаптивной способностью, что позволяет ему автоматически идентифицировать параметры контролируемого процесса, задавать параметры управления и адаптироваться к изменениям параметров процесса. С другой стороны, он также обладает преимуществами ПИД-регулятора, такими как простая структура, высокая надежность и знакомство с практическим инженерно-конструкторским персоналом [5].

Адаптивное управление — это стратегия управления, которая может идентифицировать эталонную модель управления. Когда в процессе работы системы возникают динамические изменения, адаптивная система управления будет корректировать параметры или алгоритмы управления регулятора в режиме реального времени, чтобы максимально приблизить заданный показатель производительности к оптимальному и поддерживать его на необходимом уровне. Таким образом, учитывая неопределенность моделирования управления с переменной скоростью ветряных турбин, адаптивное управление имеет широкую перспективу применения. Результаты моделирования показывают, что при изменении скорости ветра или параметров этот метод управления может эффективно поддерживать постоянную скорость генератора и выходную мощность.

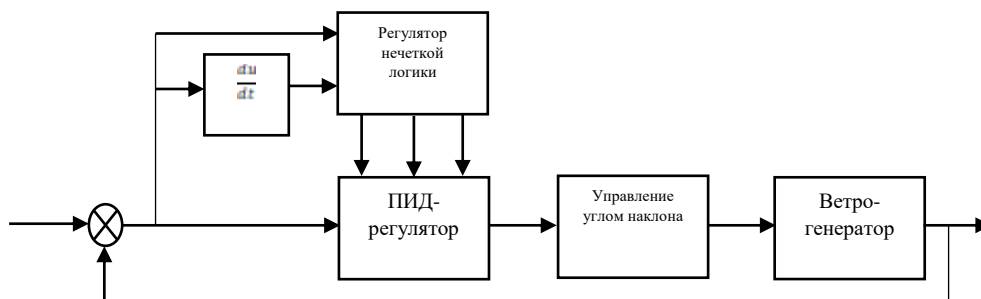


Рисунок 7 – Структурная схема адаптивного нечеткого ПИД-регулятора

Результаты.

Согласно результатам моделирования, адаптивный нечеткий ПИД-регулятор обладает высокой устойчивостью, когда модель управляемого объекта является неопределенной. Когда система нарушена или электрическая сеть нестабильна, адаптивный регулятор имеет преимущества перед другими промышленными регуляторами, и может быть получен лучший эффект управления (рисунок 8).

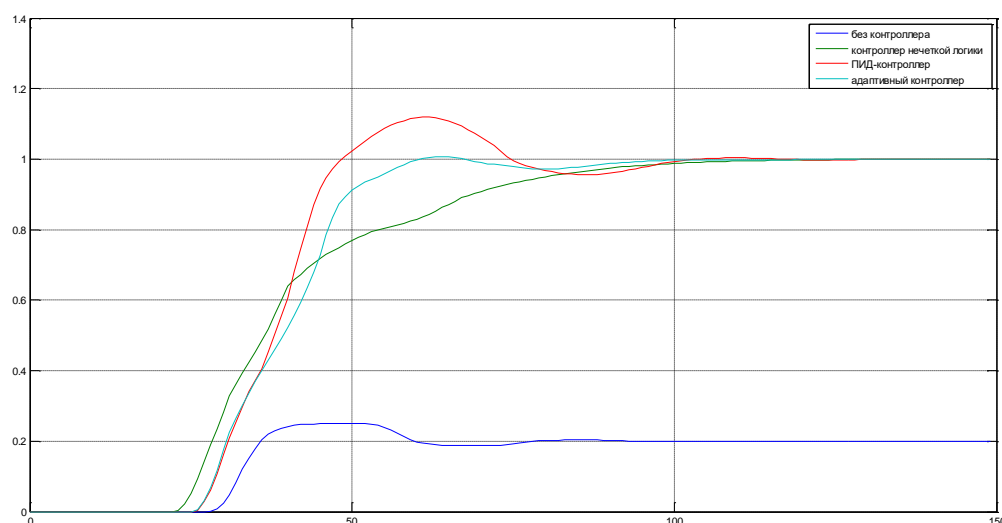


Рисунок 8 – Сравнение переходных характеристик регуляторов ветряных турбин

Обсуждение.

Результат исследования доказывает эффективность применения нечеткого адаптивного регулятора для системы управления углом наклона лопасти ветрогенератора. Моделирование системы управления позволило определить, что представленный регулятор дает быстрый и плавный отклик и сохраняет устойчивость, максимально приближая заданный показатель к оптимальному. На примере построенной системы управления можно заключить, что нечеткий адаптивный регулятор применим в широких областях исследований.

Заключение.

Согласно результатам исследования можно увидеть, что адаптивный нечеткий ПИД-регулятор имеет наилучший отклик по сравнению с другими регуляторами. Время стабилизации быстрое, а перерегулирование очень мало (всего 0,05%), поэтому адаптивный нечеткий ПИД-регулятор обеспечивает лучший контроль угла наклона системы ветровой турбины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. J. Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan, and S. Rajapandian, «A review of wind energy technologies,» *Renewable and sustainable energy Reviews*, vol. 11, pp. 1117-1145, 2007.
- [2] Dunne, F. «Optimizing Blade Pitch Control of Wind Turbines with Preview Measurements of the Wind.» Order No. 10108716 University of Colorado at Boulder, 2016.
- [3] A. Merabet, J. Thongam, and J. Gu, “Torque and pitch angle control for variable speed wind turbines in all operating regimes,” 2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC.EU 2011 - Conf. Proc., vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2011, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874598.
- [4] L. Suganthi, S. Iniyar, and A. A. Samuel, «Applications of fuzzy logic in renewable energy systems—a review,» *Renewable and sustainable energy Reviews*, vol. 48, pp. 585-607, 2015.

[5] S. Baburajan and A. Ismail, "Pitch Control of Wind Turbine through PID , Fuzzy and an Adaptive Fuzzy-PID Controller System ;," Int. Res. J. Eng. Technol., vol. 4, no. 9, P. 669–675, 2017, <https://irjet.net/archives/V4/i9/IRJETV4I9115>.

Алия Шукирова, PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының доценті м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан, aliya.shukirova@mail.ru.

Гульжан Ускенбаева, PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының меңгерушісі, доценті м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан, uskenbayeva_ga_1@enu.kz.

Лейла Рзаева, PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының доценті м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан, rzayeva_lg@enu.kz.

Жанат Абдугулова, экономикалық ғылымдар кандидаты, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының доценті м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан, abdugulova_zhk@enu.kz.

Аршын Наурызбаева, магистр, «Киберқауіпсіздік, ақпараттарды өңдеу және сақтау» кафедрасының лекторы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, n_arshin@list.ru.

ЖЕЛ ГЕНЕРАТОРЫ ҚАЛАҚШАСЫНЫҢ БҰРЫЛУ БҰРЫШЫНЫҢ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ АДАПТИВТІ АНЫҚ ЕМЕС ПИД-РЕТТЕГІШІ

Аңдатпа. Мақалада тұрақтылықты, өнімділікті және шығыс қуатты жоғарылату мақсатымен жел генераторының қалақшасының бұрылу бұрышының басқару жүйесі үшін адаптивті реттегішті әзірлеу ұсынылған. Жел турбинасының қуатын арттыру үшін қалақтаршаларға аэродинамикалық жүктемелерді арттыратын өлшемі үлкен роторлар салынады, бірақ жақсы бұрылу бұрышы реттегіштерінің көмегімен негізгі бұрандауыштың қалақшаларын көтеру профилін жақсартуға болады. Басқару жүйесін зерттеуде ПИД-реттегіш, анық емес логикалық реттегіш және адаптивті анық емес ПИД-реттегіш таңдалды. Жел турбинасының математикалық моделі негізінде MATLAB жүйесінде қалақшалардың бұрылу бұрышын басқару жүйесінің модельдеуі орындалды.

Түйінді сөздер. Адаптивті басқару, ПИД-реттегіші, анық емес логикалық реттегіш, жел турбинасы, қалақшаның бұрылу бұрышы.

Aliya Shukirova, PhD, associated professor of Department of «System analysis and control», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, aliya.shukirova@mail.ru.

Gulzhan Uskenbayeva, PhD, Head of the Department of «System analysis and control», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, uskenbayeva_ga_1@enu.kz.

Leyla Rzaeva, PhD, associated professor of Department of «System analysis and control», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, rzayeva_lg@enu.kz.

Zhanat Abdugulova, candidate of economic sciences, associated professor of Department of «System analysis and control», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, abdugulova_zhk@enu.kz.

Arshyn Nauryzbayeva, master, lecturer, Department of «Cyber security, information processing and storage», Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, n_arshin@list.ru.

ADAPTIVE FUZZY PID CONTROLLER OF THE WIND TURBINE PITCH ANGLE CONTROL SYSTEM

Abstract. The article presents the development of an adaptive regulator to control the angle of inclination of the blades of a wind turbine in order to increase stability, performance and output power. To increase the capacity of a wind turbine, larger rotors are being built, which increases the aerodynamic loads on the blades, but with the help of appropriate tilt angle regulators, the lifting profile of the rotor blades can be improved. In the study of the control system, PID controller, fuzzy logic controller and adaptive fuzzy PID controller are considered. Based on a mathematical model of a wind turbine, a simulation of the blade angle control system in MATLAB is performed.

Keywords. Adaptive control, PID controller, fuzzy logic controller, wind turbine, blade pitch angle.
