

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 1680-9165

№ 4 (2020)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ63VPY00028965

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация результатов фундаментальных и прикладных научных исследований
по широкому спектру проблем в области металлургии, машиностроения, транспорта,
строительства и естественных наук

Подписной индекс – 76129

Импакт-фактор РИНЦ – 0,344

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Гумаров Гали Сагингалиевич – д.т.н., профессор (Уральск, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Украинец Виталий Николаевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомоллов Алексей Витальевич - к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Жажибаева Галия Тулеуевна - к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Baigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Исаева КуралайСметкановна Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Бочкарев Петр Юрьевич – д.т.н., профессор (Саратов, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Чайкин Владимир Андреевич – д.т.н., профессор (Магнитогорск, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

М. К. Жакенов¹, А. М. Солтанова²

¹ПФ ТОО «KSP Steel»,

Республика Казахстан, г. Павлодар;

²Инновационный Евразийский университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ

Рассмотрена задача об устойчивости ветроэнергетической установки с горизонтальной осью в условиях изменения скорости вращения ветроколеса, которое вызывается подключением и отключением потребителей электроэнергии. Проанализированы факторы, влияющие на устойчивость ветроэнергетической установки. Движения представлены в виде математических уравнений. Математической моделью мачты служит перевернутый маятник с упругим закреплением в основании, поток воздуха предполагается квазистационарным. Найдены режимы изменения скорости вращения ветроколеса, приводящие к нарастающим колебаниям мачты. Приводятся результаты численного моделирования.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, устойчивость, линейная обратная связь, оптимальное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Возникновение понятия устойчивости в целом связано техническими соображениями. Так как во многих технических задачах важно, чтобы невозмущенное движение было асимптотически устойчивым, и эта устойчивость имела место при любых, даже сколь угодно больших начальных возмущениях [1].

Частным случаем проблемы устойчивости в целом является задача об абсолютной устойчивости, т.е. задача о сохранении устойчивости в целом при любых значениях нелинейности специального вида из заданной области. В технических задачах к этому понятию приводит то обстоятельство, что вид некоторой характеристики исследуемой системы не может быть точно определен и может меняться во время эксплуатации, а устойчивость должна сохраняться [2].

Рассмотрим ветроэнергетическую установку, состоящую из турбины с горизонтальной осью, расположенной на вершине мачты. Мачта моделируется как перевернутый маятник с упругой заделкой в основании. Воздушный поток предполагается квазистационарным [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Движение описывается системой уравнений:

$$(J + ml^2)\ddot{\psi} = \left(\frac{M}{2} + m\right)gl \sin \psi - M_{air} + cI - kl^2\psi,$$

$$J_m(J + ml^2)\ddot{\omega}$$

$$= -\left(\frac{M}{2} + m\right)glJ_m \sin \psi + M_{air}(J_m + J + ml^2) - cI(J_m + J + ml^2) + kl^2J_m\psi,$$

$$LI = c\omega - (r + R)I.$$

ψ – угол между вертикалью и мачтой;

ω – угловая скорость вращения турбины;

I – сила тока,

J – момент инерции мачты относительно основания;

M – масса мачты;

m – масса лопастей турбины;

l – длина мачты;

g – ускорение силы тяжести;

J_m – момент инерции лопастей и электродвигателя турбины относительно оси вращения;

k – коэффициент упругости (сила упругости является линейной функцией координаты);

M_{air} – момент аэродинамических сил относительно оси вращения турбины;

c – коэффициент;

L – индуктивность;

r – внутреннее сопротивление;

R – сопротивление внешней нагрузки[4].

Введем безразмерное время τ и коэффициент θ по формулам: $t = \tau\theta$, где

$$\theta = \frac{J + ml^2}{\left(\frac{M}{2} + m\right)gl}$$

Тогда

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{\theta^2} \psi''', \quad \ddot{\omega} = \frac{1}{\theta^2} \sigma''$$

где штрих означает производную по безразмерному времени, σ – безразмерная угловая скорость вращения турбины. Введем следующие обозначения для комбинаций исходных переменных и коэффициентов:

$$u = \rho c l, \quad w = \psi', \quad \rho = \frac{1}{\left(\frac{M}{2} + m\right) g l},$$

$$k = k \rho l^2, \quad K = 1 - k, \quad j = \frac{J_m + J + m l^2}{J_m},$$

$$\pi = \frac{\rho c^2}{L}, \quad \rho = \frac{(r + R)\theta}{L}$$

Предположим, что угол ψ достаточно мал, и ограничимся приближением $\sin\psi \approx \psi$ [5]. Для аппроксимации аэродинамического момента примем, что установочный угол лопастей $\phi = \pi/2$, угол атаки настолько мал, что подъемную силу лопасти можно рассматривать как линейную функцию угла атаки, а силу сопротивления – независимой от него. Тогда простейшая аппроксимация момента аэродинамических сил такова (см. [6]): $M_{\text{air}} = C_1 V^2 - C_2 \sigma^2$. В безразмерных переменных система имеет вид:

$$\begin{aligned} \psi' &= w, \\ w' &= K\psi + C_2 \sigma^2 - C_1 V^2 + u, \\ \sigma' &= K\psi - j C_2 \sigma^2 + j C_1 V^2 - ju, \\ u' &= \pi \sigma - \rho u. \end{aligned}$$

Заметим, что возмущение ρ входит только в четвертое уравнение системы. Отбросим это уравнение и перейдем к редуцированной системе, где в качестве возмущения рассматривается параметр u :

$$\begin{aligned} \psi' &= w, \\ w' &= K\psi + C_2 \sigma^2 - C_1 V^2 + u, \\ \sigma' &= K\psi - j C_2 \sigma^2 + j C_1 V^2 - ju. \end{aligned}$$

Если наилучший закон $u(t)$ определен, то соответствующее возмущение $\rho(t)$ может быть вычислено из четвертого уравнения системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Стационарные решения системы имеют вид [7]: $w^* = 0, \psi^* = 0, \sigma^* = \sqrt{(C_1 V^2 - u/C_2)}$, где u рассматривается как константа. Для системы, линеаризованной в окрестности стационарного решения, с помощью критерия Гурвица [8] установлено, что рассматриваемое стационарное решение асимптотически устойчиво. Соответствующая линейная управляемая система управляема по Калману, и, следовательно, существует линейная обратная связь,

обеспечивающая положительные собственные значения характеристического многочлена[9]. Более того, потеря устойчивости возможна, когда возмущение является линейной функцией только угловой скорости вращения турбины [10], $\Delta u = a\sigma$; условие неустойчивости решения задается неравенством $a < -2C_2\sigma$.

ВЫВОДЫ

Показано, что устойчивость мачты с ветроэнергетической установкой на вершине может быть нарушена с помощью возмущения в виде обратной связи по угловой скорости вращения турбины. Дальнейшие исследования предполагают исследование задачи нахождения наилучшего возмущения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Байрамов, Ф. Д., Галимов, Н. С., Марданшин, Р. Г.** Уравнения динамики и устойчивость номинального режима работы ветроэнергоустановки (ВЭУ) // Онлайн-журнал. Камский государственный политехнический институт. – Набережные Челны, 2002. – № 9.
- 2 **Александров, В. В.** Оптимизация динамики управляемых систем. – М. : МГУ, 2000. – 304 с.
- 3 **Досаев, М.И.З.** Конструктивная теория МВЭУ. Ч. 1. – М. : МГУ, 2007. – 76 с.
- 4 **Смирнов, А. Ф., Александров, А. В., Лашенков, Б. Я., Шапошников, Н. Н.** Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / Стройиздат, 1984.
- 5 **Денисенко, Г. И.** Возобновляемые источники энергии. – Киев :Вища школа, 1983.
- 6 **Илиев, В., Алмас, Л.** Использование энергии ветра. – Издательство «Техника», Бухарест, 1984.
- 7 **Panofsky, H. A.** Wind structure in strong winds below 150 m.//Wind Engineering. 1977. – Voll. – P. 91–103.
- 8 **Шефтер, Я. И.** Использование энергии ветра. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 199 с.
- 9 **Шефтер, Я. И.** Ветроэлектрические агрегаты. – М. : «Машиностроение», 1972. – 288 с.
- 10 **Федоров, М. П.** Эколого-технические системы в энергетике // Проблемы гидроэнергетики и их решение. – Л. : Энергоатомиздат, 1980. – С. 21–25.

Материал поступил в редакцию 29.12.20.

М. К. Жакенов¹, А. М. Солтанова²

¹«KSP Steel» ЖШС,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

²Инновациялық Еуразия университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

Материал 29.12.20 баспаға түсті.

КӨЛДЕНЕҢ ОСЬТІК ЖЕЛЭЛЕКТРОСТАНЦИЯСЫНЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ТАЛДАУ

Көлденең осі бар жел қондырғысының тұрақтылығы мәселесі электр дөңгелегінің айналу жылдамдығының өзгеруі жағдайында қарастырылады, бұл электр энергиясын тұтынушыларды қосу және ажырату салдарынан туындайды. Жел энергетикалық қондырғының орнықтылығына әсер ететін факторлар талданды. Қозғалыс математикалық теңдеулер түрінде ұсынылған. Материктің математикалық моделі негізінде серпімді бекітілетін инверттелген маятник болып табылады да, ауа ағыны квази-стационарлы деп саналады. Математикалық тербелістердің жоғарлауына әкелетін жел доңғалағының айналу жылдамдығын өзгерту режимдері табылған. Сандық модельдеудің нәтижелері келтірілген.

Кілтті сөздер: жел қуатын орнату, тұрақтылық, сызықтық кері байланыс, оңтайлы басқару.

M. K. Zhakenov¹, A. M. Soltanova²

¹KSP Steel LLP,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²Innovative Eurasian University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Material received on 29.12.20.

ANALYSIS OF SUSTAINABILITY OF A HORIZONTAL AXLE WIND POWER INSTALLATION

The problem of the stability of a wind power installation with a horizontal axis is considered under conditions of a change in the speed of the wind wheel rotation, which is caused by connecting and disconnecting electricity consumers. Factors affecting the stability of a wind power plant are analyzed. The movements are represented as mathematical equations. The mathematical model of the mast is an inverted pendulum with elastic fastening at the base, the air flow is assumed to be quasi-stationary. The modes of changing the rotational speed of the wind wheel, leading to an increase in mast oscillations, are found. The results of numerical simulation are presented.

Keyword: wind power installation, stability, linear feedback, optimal control.

Теруге 29.12.20. ж. жіберілді. Басуға 10.01.21. ж. қол қойылды.
Форматы 297*420/2. Кітап-журнал қағазы.
Шартты баспа табағы 6,04. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген З. С. Исакова
Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3721

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@psu.kz
www.vestnik.psu.kz
www.nitk.psu.kz