

УДК 621.658.012.531

В.И. Буяльский, аспирант*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: v.ios@yandex.ru*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА И УГЛА АТАКИ ЛОПАСТИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ, С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ

Рассмотрена математическая модель прогнозирования угловой скорости ротора генератора; требуемого угла атаки лопасти. Приведена система линейных дифференциальных уравнений для автоматического регулирования с учетом влияния скорости ветра, мощности потребляемой электроэнергии и времени запаздывания по регулированию. Представлен графический анализ эффективности управления на основе результатов моделирования системы автоматического регулирования.

Ключевые слова: *прогнозирование, система автоматического регулирования, ветроэнергетическая установка, автоматическое управление, система, методика, инерция, модель, система линейных дифференциальных уравнений.*

Общий вид дифференциального уравнения [1] ветроустановки $J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = M_{кр} - M_c$, где $M_{кр}$ – крутящий момент; M_c – момент сопротивления. При увеличении скорости ветра – увеличивается крутящий момент, что приводит к увеличению угловой скорости ротора генератора. При увеличении мощности потребляемой электроэнергии увеличивается момент сопротивления и уменьшается угловая скорость ротора генератора [2]. Таким образом, наряду со скоростью ветра, как возмущающего внешнего воздействия следует рассматривать и мощность потребляемой электроэнергии. В работе [3], произведено описание недостатков в принципе управления ветроэнергетической установкой по отношению к скорости ветра как внешнего возмущающего воздействия, следовательно, такие недостатки могут распространяться и по отношению к потребляемой электроэнергии. В этой связи запаздывание по принятию управляющих воздействий системы существует и при изменении мощности потребляемой электроэнергии.

Цель статьи – разработка математической модели прогнозирования угловой скорости ротора генератора, угла атаки лопасти с учетом изменения мощности потребляемой электроэнергии и моделирование системы автоматического регулирования с постоянным запаздыванием на основе системы дифференциальных уравнений автоматического регулирования с запаздывающим аргументом.

Математическая модель, прогнозирования угловой скорости ротора генератора и угла атаки лопасти с учетом изменения мощности потребляемой электроэнергии.

Общий вид математической модели угловой скорости ротора генератора в соответствии с изменением скорости ветра и потребляемой мощности:

$$\Omega_1 = \Omega_2 + \Delta\Omega_2.$$

Здесь Ω_2 – значение угловой скорости ротора генератора на отрезке времени прогнозирования скорости ветра; $\Delta\Omega_2$ – приращение значения угловой скорости ротора генератора на отрезке времени прогнозирования мощности потребляемой электроэнергии. Предложенный метод описания математической модели угловой скорости ротора генератора основан на зависимости угловой скорости ротора генератора от скорости ветра и угла атаки лопасти $\Omega = 668 \frac{V}{\alpha}$ [3]. Функциональная зависимость по определению приращения угловой скорости ротора генератора в соответствии с изменением мощности потребляемой электроэнергии имеет вид:

$$\Delta\Omega_2 = \Omega_0 \left(\frac{P_0}{P_1} - 1 \right),$$

где Ω_0 – текущее значение угловой скорости ротора генератора; P_0 – текущее значение мощности потребляемой электроэнергии; P_1 – прогнозируемое значение мощности потребляемой электроэнергии.

Таким образом, получена математическая модель прогнозирования угловой скорости ротора генератора в соответствии с изменением скорости ветра и потребляемой мощности:

$$\Omega_1 = 668 \frac{V_1}{\alpha_0} + \Omega_0 \left(\frac{P_0}{P_1} - 1 \right).$$

Зависимость угла атаки лопасти от изменения скорости ветра и потребляемой электроэнергии имеет вид:

$$\alpha_1 = \alpha_2 + \Delta\alpha_2,$$

где α_0 – текущее значение угла питча лопасти; α_2 – значение угла атаки лопасти на прогнозируемом отрезке времени с учетом изменения скорости ветра; $\Delta\alpha_2$ – приращение значения угла атаки лопасти на прогнозируемом отрезке времени с учетом изменения мощности потребляемой электроэнергии. На основе, математической модели зависимости угловой скорости ротора генератора от скорости ветра и угла атаки лопасти [3], получим функциональную зависимость угла атаки лопасти от скорости ветра и угловой скорости ротора генератора. Подставив в знаменатель, номинальное значение угловой скорости ротора генератора получим математическую модель угла атаки лопасти:

$$\alpha_1 = 668 \frac{V_1}{\Omega_n},$$

где Ω_n – номинальное значение угловой скорости ротора генератора.

Функциональная зависимость по определению приращения угла атаки лопасти в соответствии с изменением мощности потребляемой электроэнергии:

$$\Delta\alpha_2 = \alpha_0 \left(\frac{P_0}{P_1} - 1 \right).$$

Таким образом, получена математическая модель угла атаки лопасти в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии:

$$\alpha_1 = 668 \frac{V_1}{\Omega_n} + \alpha_0 \left(\frac{P_0}{P_1} - 1 \right).$$

В таблице 1 приведены результаты тестирования полученных зависимостей.

Система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для системы автоматического регулирования. Дифференциальное уравнение ветротурбины:

$J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = M_{кр} - M_c = M_{кр} - \frac{P}{\Omega}$ [1], где P – мощность потребляемой электроэнергии; $M_{кр}$ – крутящий момент; M_c – момент сопротивления; Ω – угловая скорость ротора генератора.

Дифференциальное уравнение зависимости угловой скорости ротора генератора от угла поворота лопасти и от скорости ветра с учетом приведенного момента инерции [4]: $J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = 1,45 \frac{V^2}{\alpha} - M_c$ или

$J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = 1,45 \frac{V^2}{\alpha} - \frac{P}{\Omega}$. Система дифференциальных уравнений для автоматического регулирования без

учета нагрузки (P) имеет вид [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,0000002 \Delta \Omega = -0,0000007 \Delta \alpha + 0,000003 \Delta V \\ \frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n). \end{cases}$$

Тогда с учетом (P), отклонения координат от значений, соответствующих равновесному состоянию, характеризующие движение объекта (угловую скорость ротора генератора Ω) являются ΔV ; $\Delta \alpha$; ΔP . Поэтому текущие координаты объекта $V = V_0 + \Delta V$; $\alpha = \alpha_0 + \Delta \alpha$; $P = P_0 + \Delta P$ [5] или

$\begin{cases} M_{кр.}(\alpha; V) = M_{кр.0} + \frac{\partial M_{кр.}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_{кр.}}{\partial V} \Delta V \\ M_c(\Omega; P) = M_{c.0} + \frac{\partial M_c}{\partial \Omega} \Delta \Omega + \frac{\partial M_c}{\partial P} \Delta P \end{cases}$. С учетом этих зависимостей получим:

$J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} + \frac{\partial M_c}{\partial \Omega} \Delta \Omega - \frac{\partial M_{кр.}}{\partial \Omega} \Delta \Omega = \frac{\partial M_{кр.}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_{кр.}}{\partial V} \Delta V - \frac{\partial M_c}{\partial \Omega} \Delta \Omega - \frac{\partial M_c}{\partial P} \Delta P$ – линеаризованное

дифференциальное уравнение. Так как $\alpha_0 = \frac{668 V_0}{\Omega_0}$, то

$J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} + 2 \left(\frac{P_0}{\Omega_0} \Delta \Omega \right) - 0,02 \Omega' \Delta \Omega = 1,45 \frac{V_0^2}{\alpha_0'} \Delta \alpha + 1,45 \frac{V_0^2}{\alpha_0} \Delta V - \frac{P_0'}{\Omega_0} \Delta P$. Решая производные, получаем:

$J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 9 \Delta \Omega = 0,34 \Delta V - 0,1 \Delta \alpha - 0,006 \Delta P$, где $P_0 = 110$ кВт, и после соответствующих преобразований ($J = 126000 \text{ кг} \times \text{м}^2$ [4]) получим линеаризованное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами:

$$\frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,00008 \Delta \Omega = 0,000001 \Delta V - 0,0000002 \Delta \alpha - 0,0000005 \Delta P.$$

Дифференциальное уравнение для положения лопасти:

$$\frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n) J.$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений для системы автоматического регулирования имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,00008 \Delta \Omega = 0,000001 \Delta V - 0,0000002 \Delta \alpha - 0,0000005 \Delta P, \\ \frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n) J. \end{cases}$$

Система линейных дифференциальных уравнений для системы автоматического регулирования с запаздывающим аргументом. Математическая модель оценки, времени включения двигателя привода питча для прогнозируемой скорости ветра с учетом постоянной времени переходного процесса и инерционности системы имеет следующий вид:

$$T_{вкл.} = t_1 + \left(\ln \left(1,26 - 1,13 \frac{V_1}{\alpha_0} \right) 0,001 J - t_{ном.сп.} \right) \text{ [4]}. \text{ После преобразования } \alpha_0 = 668 \frac{V_1}{\Omega_n} \text{ в соответствии с}$$

$\Omega = 668 \frac{V}{\alpha}$ [3], формула оценки времени начала разворота лопастей запишется в виде:

$$T_{вкл.V} = t_1 + \left(\ln \left(1,3 - 0,3 \frac{V_1}{V_0} \right) 0,001 J - t_{ном.сп.} \right).$$

Таким образом, принимая во внимание, что угловая скорость ротора генератора имеет обратную зависимость от потребляемой мощности электроэнергии, то формулу оценки параметра времени включения двигателя привода угла питча лопасти для прогнозируемой нагрузки можно записать как:

$$T_{вкл.P} = t_1 + \left(\ln \left(1,3 - 0,3 \frac{P_0}{P_1} \right) 0,001 J - t_{ном.сп.} \right),$$

где t_1 – интервал времени прогноза мощности потребляемой электроэнергии; P_1 – значение изменения потребляемой мощности на шаге t_1 ; P_0 – текущее значение потребляемой мощности; J – приведенный момент инерции; $t_{ном.сп.}$ – постоянная времени переходного процесса. Поскольку $t_{зан.} = 0$ при $T_{вкл.} = t_1$, как для скорости ветра, так и для потребляемой мощности, следовательно,

$t_{зан} = t_{зан.V} + t_{зан.P}$, где $t_{зан.V} = \ln \left(1,3 - 0,3 \frac{V_1}{V_0} \right) 0,001 J - t_{ном.сп.}$ – время запаздывания за счет

изменения скорости ветра; $t_{зан.P} = \ln \left(1,3 - 0,3 \frac{P_0}{P_1} \right) 0,001 J - t_{ном.сп.}$ – время запаздывания за счет

изменения мощности потребляемой электроэнергии. Тогда, формула определения оценки, времени включения двигателя привода угла питча лопасти с учетом изменения скорости ветра и потребляемой мощности будет иметь следующий вид:

$$T_{вкл} = t_1 + \left(\left(\ln \left(1,3 - 0,3 \frac{V_1}{V_0} \right) + \ln \left(1,3 - 0,3 \frac{P_0}{P_1} \right) \right) 0,001 J - t_{ном.сп.} \right).$$

Дифференциальное уравнение для угла атаки лопасти с запаздыванием имеет вид [5]:

$$\frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_H)_{t_1 - T_{\text{вкл}} V}.$$
 Следовательно, с учетом изменения P и V можно записать

$$\frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_H)_{t_1 - T_{\text{вкл}}}.$$
 Тогда систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для автоматического регулирования с запаздыванием будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,00008 \Delta \Omega = 0,000001 \Delta V - 0,0000002 \Delta \alpha - 0,00000005 \Delta P \\ \frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_H)_{t_1 - T_{\text{вкл}}} \end{cases}$$

В таблице 1 представлены результаты тестирования при разных комбинациях ΔV и ΔP .

Таблица 1 – Результаты тестирования

$T_{\text{прогн}}$ с	V , м/с	ΔV , м/с	P_1 , кВт	ΔP , кВт	α_n , град	Ω_1 , 1/с	$T_{\text{вкл}}$, с	$T_{\text{без-оц}}$, с	$t_{\text{зан}}$, с
0	8	$\Delta V = 0$	110	$\Delta P = 0$	34	157	0	0	0
60	10	$\Delta V > 0$	110	$\Delta P = 0$	43	196	43	60	17
120	10	$\Delta V = 0$	90	$\Delta P < 0$	52	192	104	120	16
180	12	$\Delta V > 0$	77	$\Delta P < 0$	60	181	159	180	21
240	13	$\Delta V > 0$	80	$\Delta P > 0$	53	139	230	240	10
300	12	$\Delta V < 0$	75	$\Delta P < 0$	55	162	292	300	8
360	10	$\Delta V > 0$	75	$\Delta P = 0$	43	122	357	360	3
420	10	$\Delta V = 0$	93	$\Delta P > 0$	34	127	418	420	2
480	9	$\Delta V < 0$	110	$\Delta P > 0$	33	151	480	480	0

Моделирование системы автоматического регулирования с постоянным запаздыванием. Дифференциальное уравнение ПИД-регулятора с запаздыванием, системы автоматического регулирования для изменения скорости ветра имеет вид [4]:

$$\Delta \alpha_{t_1 - T_{\text{вкл}}} = \left(150 \Delta \Omega + 0,12 \int_t \Delta \Omega dt + 0,3 \frac{\partial}{\partial t} \Delta \Omega \right) J. \quad \text{С учетом нагрузки:}$$

$$\Delta \alpha_{t_1 - T_{\text{вкл}}} = \left(150 \Delta \Omega + 0,12 \int_t \Delta \Omega dt + 0,3 \frac{\partial}{\partial t} \Delta \Omega \right) J. \quad \text{Тогда систему линейных дифференциальных уравнений с}$$

постоянными коэффициентами для автоматического регулирования с запаздывающим аргументом можно записать как

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,00008 \Delta \Omega = 0,000001 \Delta V - 0,0000002 \Delta \alpha - 0,00000005 \Delta P \\ \Delta \alpha_{t_1 - T_{\text{вкл}}} = \left(150 \Delta \Omega + 0,12 \int_t \Delta \Omega dt + 0,3 \frac{\partial}{\partial t} \Delta \Omega \right) J. \end{cases} \quad (1)$$

Из результатов тестирования следует, что экстремальным случаем является изменение скорости ветра в большую сторону, а потребляемой мощности в меньшую, так как время запаздывания будет наибольшим, чем при других различных комбинациях и составит $t_{\text{зан.}} = 21$ с.

На рисунке 1 изображена simulink-модель автоматического регулирования, реализованная на основе системы уравнений (1).

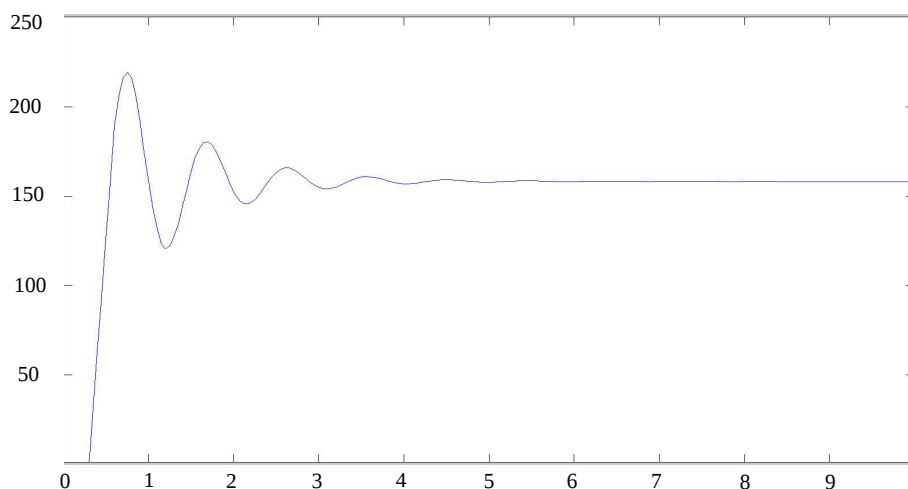


Рисунок 2 – График регулирования угловой скорости ротора генератора с запаздыванием 17 с

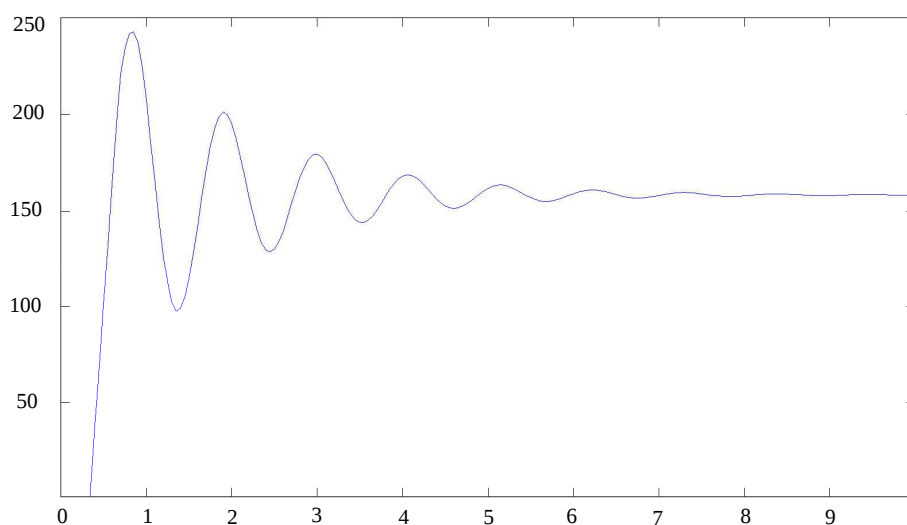


Рисунок 3 – График регулирования угловой скорости ротора генератора с запаздыванием 21 с

Вывод. Из результатов моделирования следует, что на графике (рисунок 2) время переходного процесса меньше, чем на графике, представленном на рисунке 3. Это обусловлено дополнительным возмущающим фактором – изменением потребляемой мощности. Таким образом, при оценке времени включения двигателя привода питча, следует учитывать скорость ветра и мощность потребляемой электроэнергии.

Перспективы дальнейших исследований. Следующий этап исследования предполагает оценку экономического эффекта на основе полученных расчетных данных.

Библиографический список использованной литературы

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия: учебник. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. — Харьков: Изд-во Нац. аэрокосмического ун-та. «ХАИ», Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004. — 519 с.

2. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: учеб. для вузов / М.Г. Чиликин. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 576 с.
3. Буяльский В.И. К вопросу повышения эффективности управления ветроэнергетической установкой / В.И. Буяльский // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2008. — Вып. 88. — С. 152–156.
4. Буяльский В.И. К вопросу оценки параметра времени включения двигателя привода питча для ветротурбины USW56–100 / В.И. Буяльский // Вісник СевНТУ Сер. Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. — Севастополь, 2010. — Вип. 106. — С 114–119.
5. Буяльский В.И. Усовершенствование системы автоматического регулирования ветроэнергетической установкой USW56–100, применительно к локальной сети / В.И. Буяльский // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 7 – 12 сент. 2009 г. — Севастополь, 2009. — С. 252–254.

Поступила в редакцию 16.09.2010 г.

Буяльський В.І. Математична модель прогнозування кутової швидкості ротора генератора й кута атаки лопаті. Моделювання системи автоматичного регулювання з постійним запізнюванням та з урахуванням зміни навантаження

Розглянута математична модель прогнозування кутової швидкості ротора генератора і потрібного кута атаки лопаті. Приведена система лінійних диференціальних рівнянь для автоматичного регулювання з урахуванням впливу швидкості вітру, потужності споживчої електроенергії і часу запізнювання регулювання. Представлений графічний аналіз ефективності керування на основі результатів моделювання системи автоматичного регулювання.

Ключові слова: прогноз, система автоматичного регулювання, вітроенергетична установка, автоматичне регулювання, система, методика, інерція, модель, система лінійних диференціальних рівнянь.

Buyalskiy V.I. A mathematical model of forecasting the angular speed of the rotor of the generator and corner of attack of the blade. Modelling the system of automatic control with constant delay taking into account loading change

The mathematical model of forecasting of angular speed of a rotor of the generator and demanded corner of attack of the blade is considered. The system of the linear differential equations for automatic control taking into account influence of speed of a wind, capacity of the consumed electric power and delay time on regulation is resulted. The graphic analysis of a management efficiency on the basis of results of modelling of system of automatic control is presented.

Keywords: forecast, system automatic control, wind power plant, automatic control, system, method, inertia, model, system of linear differential equalizations.