

А. С. Яндульский, д. т. н., проф.; А. А. Марченко, к. т. н., доц.; В. С. Гулый

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОТУРБИНОЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

Приведена система линейных дифференциальных уравнений для моделирования автоматического регулирования угловой скорости ротора ветротурбины с учетом влияния скорости ветра, мощности нагрузки и времени запаздывания по регулированию. Разработана компьютерная модель системы. Выполнена оптимизация коэффициентов ПИД регулятора с использованием объектно ориентированной библиотеки нелинейных систем среды Matlab, которая позволяет найти параметры регулятора, соответствующих критерию оптимальности.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, математическая модель, оптимизация, моделирование, ветроэнергетическая установка.

Введение

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) являются альтернативными источниками энергии, а работа в направлении создания альтернативных источников энергии на фоне постоянного повышения цен на природное топливо является актуальной.

Целью статьи является разработка математической модели прогнозирования угловой скорости ротора генератора, угла атаки лопасти с учетом изменения мощности потребляемой электроэнергии и моделирования системы автоматического регулирования с постоянным запаздыванием, оптимизация параметров ПИД регулятора.

Изложение основного материала

Функциональная схема ветроэнергетической установки как объекта регулирования приведена на рис. 1., где приняты следующие обозначения: $V(t)$ – скорость ветра; $a(t)$ – угол поворота лопасти; относительно оси маха; $M_{KP}^L(t)$ – крутящий момент, создаваемый лопастью; $M_K^P(t)$ – суммарный крутящий момент, создаваемый ротором ВЭУ, $\omega_r(t)$ – угловая скорость вращения ротора электрогенератора; $I_n(t)$ – ток нагрузки электрогенератора.

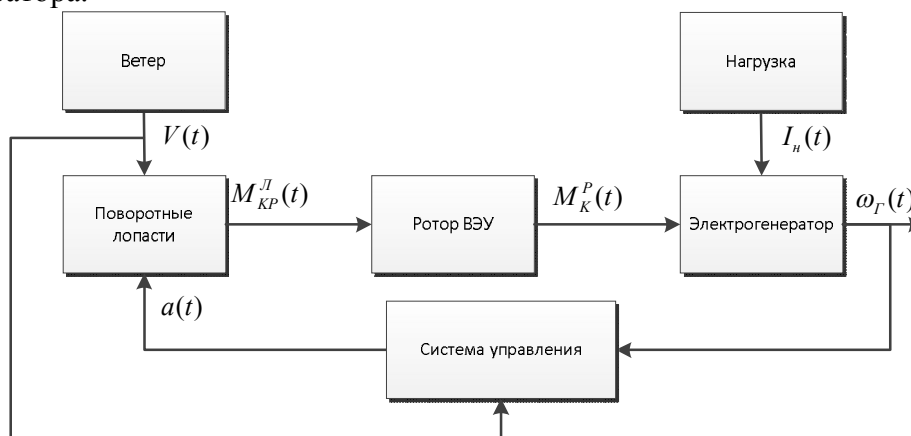


Рис. 1. Функциональная схема объекта регулирования

Общий вид дифференциального уравнения ветротурбины [1]:

$$J \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial t} = M_{кр} - M_c,$$

где J – приведенный момент инерции; $M_{кр}$ – крутящий момент; M_c – момент сопротивления. Суммарный крутящий момент равен:

$$M_{кр} = 0,04 \cdot \frac{V^2}{\alpha} \int_{r_0}^R r \partial r = 0,04 \cdot \frac{V^2}{\alpha} (R^2 - r_0^2) = 0,02 \frac{V^2}{\alpha} R^2.$$

Система дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для системы автоматического регулирования имеет вид [2]:

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

где $\Delta \Omega$ – прирост значения угловой скорости ротора генератора на промежутке времени прогнозирования мощности потребляемой электроэнергии; ΔV – прирост скорости ветра; $\Delta \alpha$ – прирост угла атаки лопасти; ΔP – прирост активной мощности; Ω_t – фактическое значение угловой скорости; Ω_n – номинальное значение угловой скорости генератора.

Математическая модель оценки времени включения двигателя привода угла pitch лопасти с учетом изменения скорости ветра и потребляемой мощности будет иметь следующий вид:

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

С учетом ПИД регулятора [3] система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для автоматического регулирования с запаздывающим аргументом можно записать как:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,00008 \cdot \Delta \Omega = 0,000001 \cdot \Delta V - 0,0000002 \cdot \Delta \alpha - 0,0000005 \cdot \Delta P; \\ \Delta \alpha_{t-T_{вкл}} = \left(K_{II} \Delta \Omega + K_I \int_t \Delta \Omega \partial t + K_D \frac{\partial}{\partial t} \Delta \Omega \right) J. \end{cases}$$

На рис. 2 изображена *Matlab* simulink-модель автоматического регулирования, реализованная на основе этой системы уравнений.

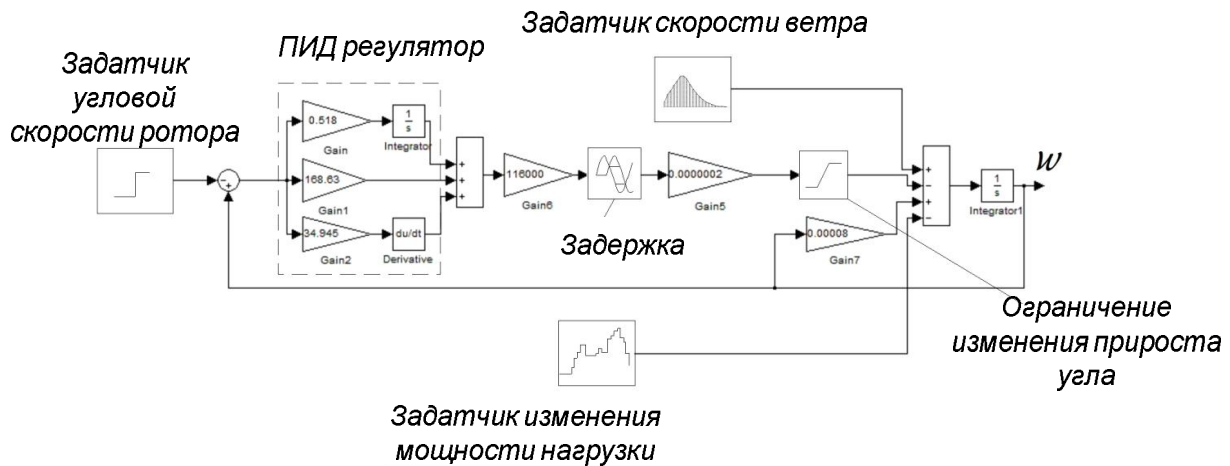


Рис. 2. Simulink-модель системы автоматического регулирования угловой скорости ротора генератора

Проведём оптимизацию параметров ПИД регулятора. Применим инструмент оптимизации NCD Output (Nonlinear Control Design) [4].

Исходя из начальных приближений, процесс поиска оптимальных параметров системного ПИД регулятора отображается графически путем построения. Первым выводят график, соответствующий начальным условиям оптимизации (рис. 3). Если в ходе вычислений получено такое значение переменной, которое полностью соответствует критерию оптимизации, то процесс расчета автоматически прекращается (рис. 3, линия 1) при $K_p = 168,63$, $K_i = 0,518$, $K_d = 34,945$ для данного случая возмущения.

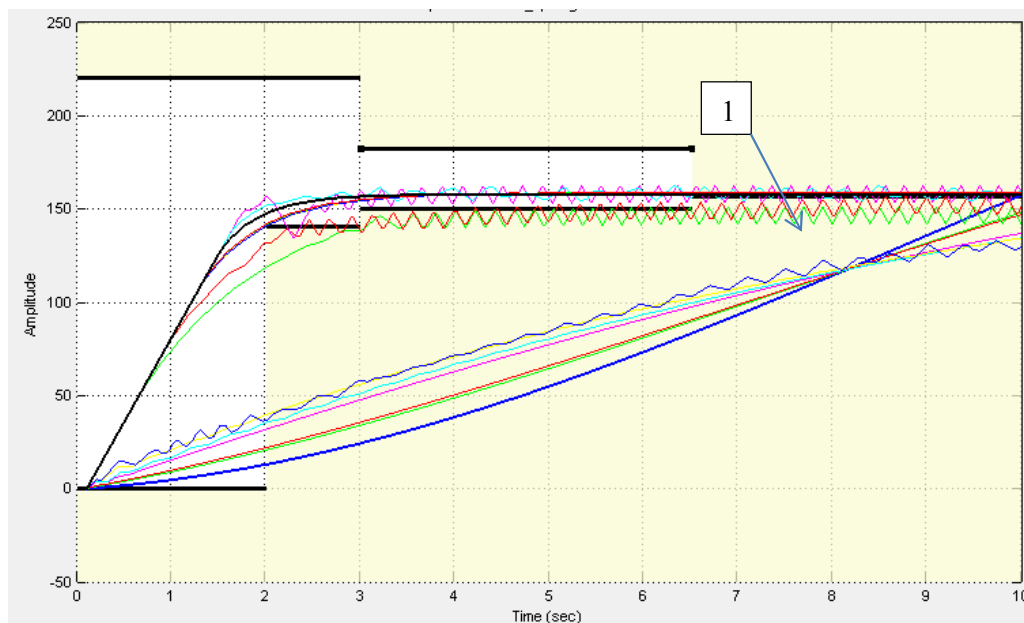


Рис. 3. График, соответствующий начальным условиям оптимизации

На рис. 4 представлен совмещённый график регулирования угловой скорости ротора генератора с запаздыванием $t_{зан} = 0,1$ с, $t_{зан} = 0,2$ с, $t_{зан} = 0,25$ с и $t_{зан} = 0,3$ с.

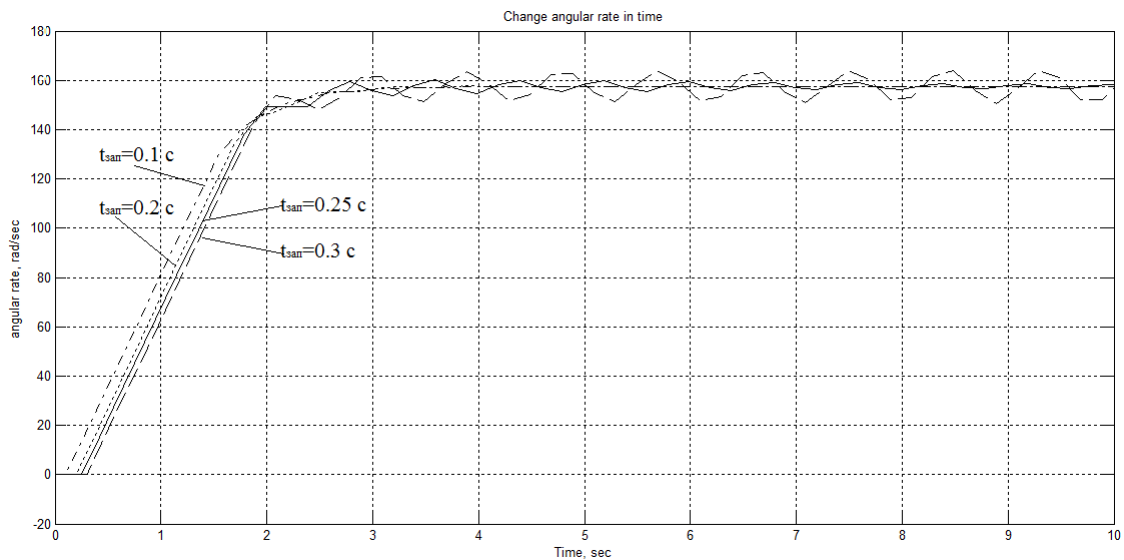


Рис. 4. График регулирования угловой скорости ротора генератора с запаздыванием

Выводы

Для эффективного управления ветротурбиной при изменении скорости ветра в сторону увеличения или уменьшения необходимо учитывать время включения двигателя привода питча. Значительное увеличение запаздывания приводит к большему перерегулированию и, как следствие, к колебаниям напряжения и мощности, генерирующей ВЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривцов В. С. Невичерпна енергія: підручник. Кн. 2. Вітроенергетика / Кривцов В. С., Олейников А. М., Яковлев А. І. – Харків: Вид-во Нац. аерокосмічного ун-ту. «ХАІ», Севастополь: Севастополь. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
2. 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. – 2010. – Вип. 106. – С. 114 – 119.
3. Резван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием / Резван В.; под. ред. В. А. Якубовича; с доп. А. П. Лихтарникова, В. А. Якубовича. – М.: Наука, 1983. – 256 с.
4. Веремей Е. И. Пособие " Nonlinear Control Design Blockset " [Электронный ресурс] / Е. И. Веремей, С. В. Погожев. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/nonlinecondes/book1/preface.php>.

Яндульский Александр Станиславович – д. т. н., профессор, кафедра автоматизации энергосистем, декан факультета электроэнерготехники и автоматики, тел.: (044) 236-41-11.

Марченко Анатолий Андреевич – к. т. н., доцент кафедры автоматизации энергосистем, тел.: (044) 454-93-08.

Гулый Владимир Сергеевич – магистрант кафедры автоматизации энергосистем.
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».