

УДК 621.658.012.531

В.И. Буяльский, преподаватель*Севастопольский филиал Саратовского государственного социально-экономического университета
ул. Вакуленчука 29, корп. 4, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: bv2347@yandex.ru***МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ДЛЯ ВЕТРОТУРБИНЫ USW56–100**

Произведено описание системы дифференциальных уравнений для автоматического регулирования с учетом влияния скорости ветра и времени запаздывания по регулированию. Представлен графический анализ эффективности управления на основе результатов моделирования, системы автоматического регулирования.

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

Простейшая гипотеза, принимаемая при математическом описании физических явлений, предполагает, что будущий ход процесса однозначно определяется его состоянием в настоящий момент времени. Задача о конечномерности таких состояний приводит к описанию динамики процесса с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений. Существует, однако, ряд физических процессов, в которых будущее зависит от состояний процесса на некотором интервале времени в прошлом. Системы обыкновенных дифференциальных уравнений для этих процессов уже не являются удовлетворительной математической моделью. Более адекватное математическое описание в этом случае дают дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. [1]

В работе [2] сформулированы недостатки существующих подходов управления, как нерешенной задачи по запаздыванию включения двигателя привода питча для разворота лопастей на необходимый угол атаки, что может вызвать отклонения угловой скорости ротора генератора за пределы номинального допустимого значения. Визуализация и анализ такого факта, могут быть получены с помощью модели системы автоматического регулирования с постоянным запаздыванием, разработанной в программном модуле «Simulink» системы «Matlab» на основе системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом.

Цель статьи – разработка модели системы автоматического регулирования на основе системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом.

Описание системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для системы автоматического регулирования. Общий вид дифференциального

уравнения ветротурбины: $J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = M_{кр} - M_c$ [3]. Дифференциальное уравнение зависимости угловой

скорости ветротурбины от угла поворота лопасти и от скорости ветра с учетом приведенного момента

инерции: $J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = 1,45 \frac{V^2}{\alpha} - M_c$, и для установившегося режима ($\Omega_n = 157 \text{ с}^{-1}$), $J \frac{\partial \Omega}{\partial t} = 1,45 \frac{V_0^2}{\alpha_0} - 2,7$ [4].

Дифференциальное уравнение является нелинейным, что существенно затрудняет его моделирование для анализа. В теории автоматического регулирования широко используется метод линеаризации статических характеристик элементов – искусственный прием, обеспечивающий применение хорошо разработанных в математике методов решения обычных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. В основе метода линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений элементов системы автоматического регулирования лежит положение о том, что все величины, характеризующие отклонения координат во время переходного процесса, достаточно малы и являются величинами первого порядка малости Δx_1 ; Δx_2 , и при разложении нелинейных функциональных зависимостей, входящих в левую и правую часть дифференциального уравнения, в ряд по степеням отклонений сохраняются только величины этого порядка. Отклонения координат от значений, соответствующих равновесному состоянию, характеризуют движение объекта (угловую скорость ротора генератора Ω) и являются ΔV ; $\Delta \alpha$. Поэтому текущие координаты объекта: $V = V_0 + \Delta V$;

$\alpha = \alpha_0 + \Delta \alpha$ или $M_{кр} = M_{кр,0} + \Delta M_{кр}$ [5]. Тогда, $M_{кр.}(\alpha; V) = M_{кр,0} + \frac{\partial M_{кр}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_{кр}}{\partial V} \Delta V$; $M_c = 2,7 = \text{const.}$ С

учетом этих зависимостей получим линеаризованное дифференциальное уравнение:

$$J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} = \frac{\partial M_{кр}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_{кр}}{\partial V} \Delta V - 2,7.$$

Перепишем дифференциальное уравнение системы автоматического регулирования в форме, при которой левая часть уравнения, содержащая выходную координату и ее производные, определяет собственные свойства системы, а правая часть, включающая соответствующие входные координаты возмущающих воздействий, характеризует их влияние на работу системы, тогда

$$J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} + \frac{\partial M_c}{\partial \Omega} \Delta \Omega - \frac{\partial M_{кр}}{\partial \Omega} \Delta \Omega = \frac{\partial M_{кр}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_{кр}}{\partial V} \Delta V - 2,7. \text{ Так как } M_c = 2,7 = \text{const, следовательно,}$$

$$J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - \frac{\partial M_{кр}}{\partial \Omega} \Delta \Omega = \frac{\partial M_{кр}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial M_{кр}}{\partial V} \Delta V - 2,7 \text{ или } J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} 0,02 \Omega' \Delta \Omega = 1,45 \frac{V_0^2}{\alpha_0'} \Delta \alpha + 1,45 \frac{V_0'^2}{\alpha_0} \Delta V - 2,7'.$$

После решения получим: $J \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,02 \Delta \Omega = -0,1 \Delta \alpha + 0,34 \Delta V$, и после соответствующих преобразований ($J = 126000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ [4]) получим линеаризованное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами:

$$\frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,0000002 \Delta \Omega = -0,0000007 \Delta \alpha + 0,000003 \Delta V. \quad (1)$$

Управление угловой скоростью ротора генератора производится положением угла атаки лопасти (α). Дифференциальное уравнение для положения лопасти имеет вид: $\frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n)$. Тогда система дифференциальных уравнений для автоматического регулирования имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,0000002 \Delta \Omega = -0,0000007 \Delta \alpha + 0,000003 \Delta V, \\ \frac{\partial \Delta \alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n). \end{cases} \quad (2)$$

Описание системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами с запаздывающим аргументом. В работе [4] изложены проблемы управления ветроустановкой, связанные с инерционностью системы, т.е. реакция на изменение угла атаки лопасти в зависимости от изменения скорости ветра не несет в себе единовременный характер, а определяется оценкой времени реакции на изменение поворота лопасти. Ключевым моментом оценки времени включения двигателя привода угла питча для разворота лопасти, является изменение скорости ветра в большую сторону, так как это приводит к появлению тормозного воздействия на возвращение угловой скорости ротора генератора к ее номинальному значению, и следовательно, без заблаговременной реакции, управление реализуется с запаздыванием, что вызовет «заброс» угловой скорости за пределы ее номинального значения, и соответственно скачок напряжения и генерацию некачественного тока. Формула определения оценки времени включения двигателя привода питча для прогнозируемой скорости ветра с учетом постоянной времени переходного процесса и инерционности системы имеет вид

$$T_{вкл.} = t_{i+1} + \left(\ln \left(1,13 - \frac{0,56 V_{t_{i+1}}}{\alpha_{t_i}} \right) 0,002 J - t_{пост.сп.} \right), \text{ где } t_{i+1} - \text{будущее время изменения скорости ветра;}$$

$V_{t_{i+1}}$ – значение изменения скорости ветра на шаге t_{i+1} ; α_{t_i} – текущее значение угла атаки лопасти; J — приведенный момент инерции; $t_{пост.сп.}$ – постоянная времени переходного процесса. Таким образом, элементом с запаздыванием в системе регулирования является изменение значения угла атаки лопасти для прогнозируемого изменения значения скорости ветра. Тогда $\alpha_{вх.}(t) = -\alpha_{вых.}(t - t_{зан.})$, где $\alpha_{вх.}(t)$ – входное значение угла атаки в систему поворота лопасти как реакция на изменение значения скорости ветра в момент времени (t); $\alpha_{вых.}(t - t_{зан.})$ – выходное значение угла атаки из системы поворота лопасти с некоторым запаздыванием, связанным с постоянной времени разворота лопасти и тормозным усилием, вызванным инерционностью системы, которое препятствует возвращению в номинальный режим угловой скорости ротора генератора. Тогда дифференциальное уравнение системы автоматического регулирования с запаздыванием запишется как $\alpha_{вых.}(t - t_{зан.}) = e^{-pt_{зан.}} \alpha_{вх.}(t)$, где p – оператор

дифференцирования запишется как $p = -\frac{1}{T}$, где T – постоянная времени ротора, характеризующая инерционность, или постоянная времени запаздывания, зависящая от инерционности системы, т.е. дифференциальное уравнение (1) можно переписать как $Tr + 1 = -0,0000007\Delta\alpha + 0,000003\Delta V$, где $Tr + 1$ – собственный оператор ветротурбины [5]. Следовательно, дифференциальное уравнение для угла атаки лопасти имеет вид: $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n)e^{-\frac{1}{T}t_{зан}}$. Отсюда следует, что при $t_{зан}=0$, $e=1$. Так как $t_{зан}=0$ при

$T_{вкл}=t_{i+1}$, следовательно, $t_{зан}=T_{вкл}-t_{i+1}$, тогда $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n)e^{-\frac{1}{T}(T_{вкл}-t_{i+1})}$. Таким образом систему

линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для автоматического регулирования с запаздыванием можно записать в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial\Delta\Omega}{\partial t} - 0,0000002\Delta\Omega = -0,0000007\Delta\alpha + 0,000003\Delta V, \\ \frac{\partial\Delta\alpha}{\partial t} = (\Omega_t - \Omega_n)e^{-\frac{1}{T}(T_{вкл}-t_{i+1})}. \end{cases} \quad (3)$$

Моделирование системы автоматического регулирования с постоянным запаздыванием.

При изменении $\Delta V > 0$, «возвращение» угловой скорости ротора генератора в номинальное значение потребует некоторое время из-за влияния тормозного усилия вызванного инерционностью системы, следовательно управление производится с некоторым запаздыванием ($t_{зан}$), при изменении $\Delta V < 0$, номинальное значение угловой скорости ротора генератора задержится на некоторое время из-за влияния движущего усилия вызванного инерционностью системы, следовательно $t_{зан}$ компенсируется постоянной времени разворота лопасти ($t_{пост.вр.}$) [4]. Так при $\Delta V = 2$ м/с, $t_{зан} = T_{инерц} + t_{пост.вр} = 10 + 8 = 18$ с, где $T_{инерц} = 10$ с – постоянная времени инерционности; $t_{пост.вр} = 8$ с – постоянная времени разворота лопасти на соответствующий угол; при $\Delta V = -2$ м/с, $t_{зан} = T_{инерц} - t_{пост.вр} = 10 - 8 = 2$ с, что не повлияет на эффективность управления [4]. Следовательно, для анализа эффективности оценки времени включения двигателя привода угла питча можно рассмотреть простейший случай изменения скорости ветра $\Delta V = 2$ м/с, где $t_{зан} = 18$ с – время постоянного запаздывания включения двигателя привода угла питча при изменении скорости ветра в большую сторону.

Ввиду большой инерционности системы, для поддержания постоянства угловой скорости ротора генератора системой автоматического регулирования оптимальным является использование автоматического ПИД-регулятора скорости. В общем виде уравнение ПИД-регулятора можно записать как $\Delta\alpha_{(t)} = K_P(\Omega_t - \Omega_n) + K_I \int_t (\Omega_t - \Omega_n) dt + K_D \frac{\partial}{\partial t}(\Omega_t - \Omega_n)$, где K_P – пропорциональная часть; K_I – интегральная часть; K_D – дифференциальная часть – модельные настройки ПИД-регулятора [1].

Следовательно, система дифференциальных уравнений системы автоматического регулирования имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial\Delta\Omega}{\partial t} - 0,0000002\Delta\Omega = -0,0000007\Delta\alpha + 0,000003\Delta V, \\ \Delta\alpha_{(t)} = K_P(\Omega_t - \Omega_n) + K_I \int_t (\Omega_t - \Omega_n) dt + K_D \frac{\partial}{\partial t}(\Omega_t - \Omega_n)e^{-\frac{1}{T}(T_{вкл}-t_{i+1})} \end{cases} \quad \text{или с учетом настроек}$$

K_P, K_I, K_D – полученных в результате моделирования:

$$\begin{cases} \frac{\partial\Delta\Omega}{\partial t} - 0,0000002\Delta\Omega = -0,0000007\Delta\alpha + 0,000003\Delta V, \\ \Delta\alpha_{(t)} = 4(\Omega_t - \Omega_n) + 0,12 \int_t (\Omega_t - \Omega_n) dt + 0,3 \frac{\partial}{\partial t}(\Omega_t - \Omega_n)e^{-\frac{1}{T}(T_{вкл}-t_{i+1})}. \end{cases} \quad (4)$$

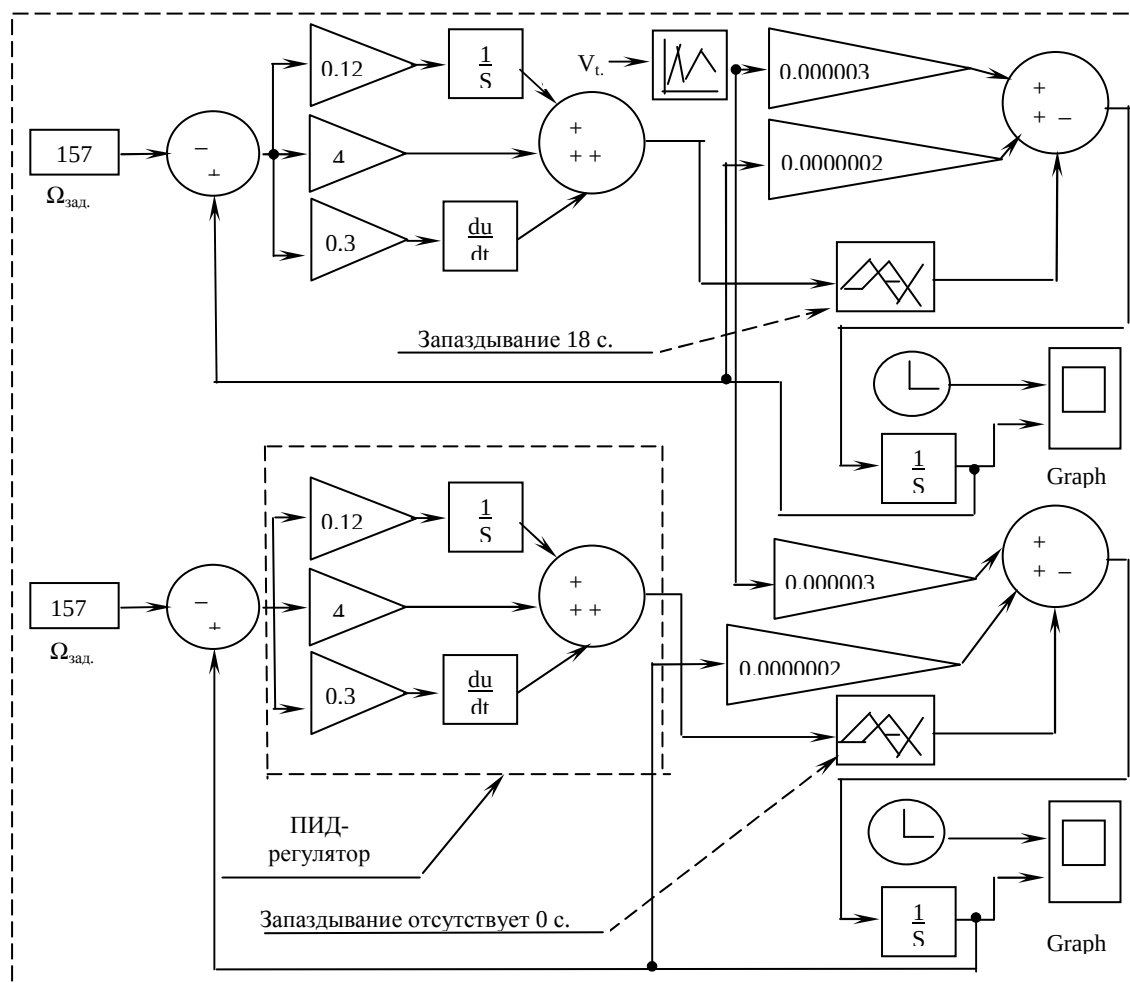


Рисунок 1 – Модель системы автоматического регулирования

На рисунке 1 изображена модель системы автоматического регулирования, реализованная в системе Simulink пакета Matlab на основании системы уравнений (4). На рисунке 2 представлен график по регулированию без запаздывания, на рисунке 3 – график по регулированию с постоянным запаздыванием ($t_{зан}=18$ с). Для определения запаздывания в модели использован блок Transport Delay, обеспечивающий задержку сигнала на заданное количество шагов модельного времени. Модельное время для 18сек определяется как: $\frac{1}{60c} 18c = 0,3$.

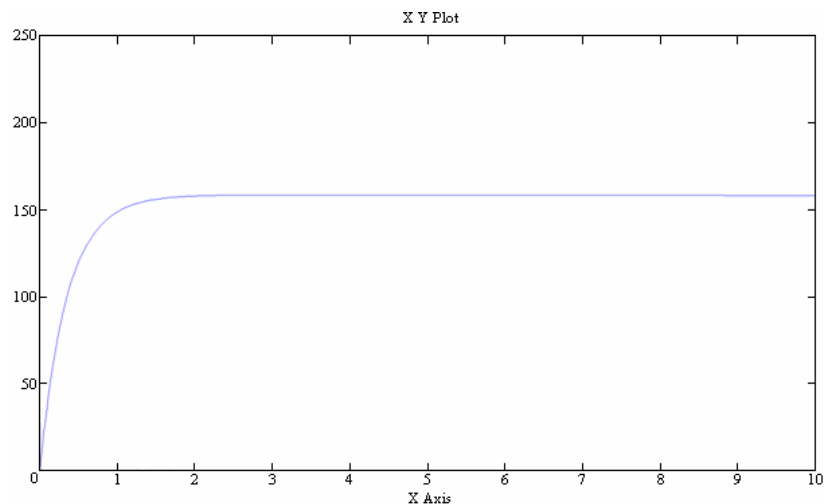


Рисунок 2 – График модели без запаздывания

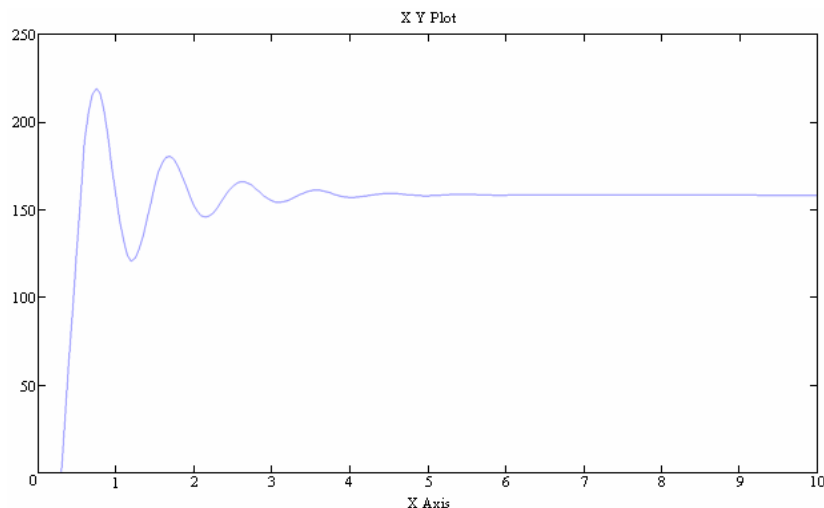


Рисунок 3 – График модели с запаздыванием

Вывод. Используя математическую модель оценки параметра времени включения двигателя привода питча и Simulink-модель системы автоматического регулирования, можно определять, какие значения отклонений будет принимать амплитуда, и как это повлияет на время перерегулирования, какое время запаздывания является опасным для системы, а какое нет. Так, например, по результатам моделирования следует, что кривая по регулированию без запаздывания имеет идеальный выход на номинальную угловую скорость и минимальное время переходного процесса, а кривая по регулированию с постоянным запаздыванием 18 с показывает заброс угловой скорости ротора генератора, и переходный процесс занимает больше времени, что порождает скачки напряжения, и следовательно, генерируется некачественный ток. В частности, для получения амплитуды с отклонением в 9% от номинального ее значения потребует времени на регулирование с запаздыванием в 3 раза больше, чем время на регулирование без запаздывания.

Перспективы дальнейших исследований. Следующий этап исследования предполагает описание дифференциальных уравнений и моделирование по регулированию угловой скоростью с запаздыванием как по изменению скорости ветра, так и за счет изменения мощности потребляемой электроэнергии.

Библиографический список

1. Резван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием / В. Резван; под. ред. В.А. Якубовича; с доп. А.П. Лихтарникова, В.А. Якубовича. — М.: Наука, 1983. — 256 с.
2. 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.
3. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика: учебник для вузов / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. — Харьков: Изд-во Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. — 519 с.
4. Буяльский В.И. Усовершенствование системы автоматического регулирования ветроэнергетической установкой USW56–100, применительно к локальной сети / В.И. Буяльский // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 21–25 сент. 2009 г. — Севастополь, 2009. — С. 111–115.
5. Крутов В.И. Основы теории автоматического регулирования / В.И. Крутов — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1984. — 348 с.

Поступила в редакцию 23.09.2009 г.