

Ляпунов Данил Юрьевич
Lyapunov Danil Yu.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
National Research Tomsk Polytechnic University
Доцент/Associate Professor
Кандидат технических наук
E-Mail: lyapunov@tpu.ru

Сарсикеев Ермек Жасланович
Sarsikeev Ermek Zh.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
National Research Tomsk Polytechnic University
Ассистент/Assistant
E-Mail: sarsikeev@tpu.ru

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Расчет параметров электропривода постоянного тока для моделирования механических характеристик ветротурбины

Dc drive parameters calculation for simulation of wind turbine mechanical
characteristics

Аннотация: В работе рассмотрена возможность разработки физической модели ветротурбины малой мощности. Рассчитаны параметры электропривода постоянного тока, реализующего механические характеристики ветротурбины. Результаты работы реализованы в программной среде Matlab Simulink.

The Abstract: In this paper the possibility of developing a physical model of small-scale wind turbine is considered. The parameters of DC electric drive which simulates the mechanical characteristics of the wind turbine are calculated. The results were obtained by software environment Matlab Simulink.

Ключевые слова: Ветротурбины, двигатели постоянного тока, моделирование малых ветротурбин.

Keywords: Wind turbine, DC motor, simulation of small-scale wind turbines.

В настоящее время одной из динамично развивающихся отраслей возобновляемой энергетики является ветроэнергетика, которая демонстрирует свое быстрое и устойчивое развитие на мировом уровне. По оценке WWEA [3], в 2011 году суммарная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) составила 237016 МВт. Наилучших результатов достигла так называемая большая (сетевая) ветроэнергетика, совместно работающая с электрической сетью. Высокому уровню развития ветроэнергетики способствовали различные программы, проводимые в странах-лидерах мировой ветроэнергетики (США, Китай, Германия, Испания и др.).

Исторически так сложилось, что в России возобновляемые источники энергии не получили должного уровня поддержки государства, из-за меняющихся приоритетов в энергетике. Особенность расположения потребителей электрической и тепловой энергии на территории Российской Федерации обусловило специфику развития ветроэнергетики. На сегодняшний день возможную конкурентоспособность на рынке могут продемонстрировать лишь малые ветроэнергетические установки (ВЭУ), для производства которых имеется относительно развитая база.

Правительство Российской Федерации с целью увеличения доли возобновляемых источников энергии в энергобалансе регионов разработало федеральные целевые программы до 2013 года, направленные на проведение научно-исследовательских работ в данной области и на стимулирование научно-педагогических кадров образовательных, научных и профильных учреждений.

Кафедрой электроснабжения промышленных предприятий Национального исследовательского Томского политехнического университета проведены научно-исследовательские работы по федеральным целевым программам на темы «Интеллектуальные автономные системы электроснабжения на базе гибридных ветро-дизельных установок», «Гибридные системы буферного накопления электроэнергии для автономных энергоустановок возобновляемой энергетики». В рамках выполнения перечисленных контрактов проведены исследования режимов работы ветро-дизельных комплексов на компьютерных и физических моделях.

Исследование ВЭС в лабораторных условиях является актуальной задачей для учебных и научных целей. Однако зачастую размещение в ограниченном пространстве подобных систем не представляется возможным, в особенности ветрогенераторов.

Одним из способов натурного моделирования механических характеристик ветротурбины является использование двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением в качестве приводного механизма синхронного генератора на постоянных магнитах (СГПМ). На рис. 1 представлена разрабатываемая физическая модель ветрогенератора.



Рис. 1. Физическая модель ветрогенератора

Ветротурбина малой мощности с горизонтальной осью вращения описывается аэродинамическими и механическими характеристиками, методы расчета которых подробно приведены в работе [1]. В качестве объекта моделирования в работе рассмотрена механическая ха-

характеристика ветротурбины АТИК мощностью 1,5 кВт при 7 м/с. Семейство характеристик данной ветротурбины изображено на рис. 2.

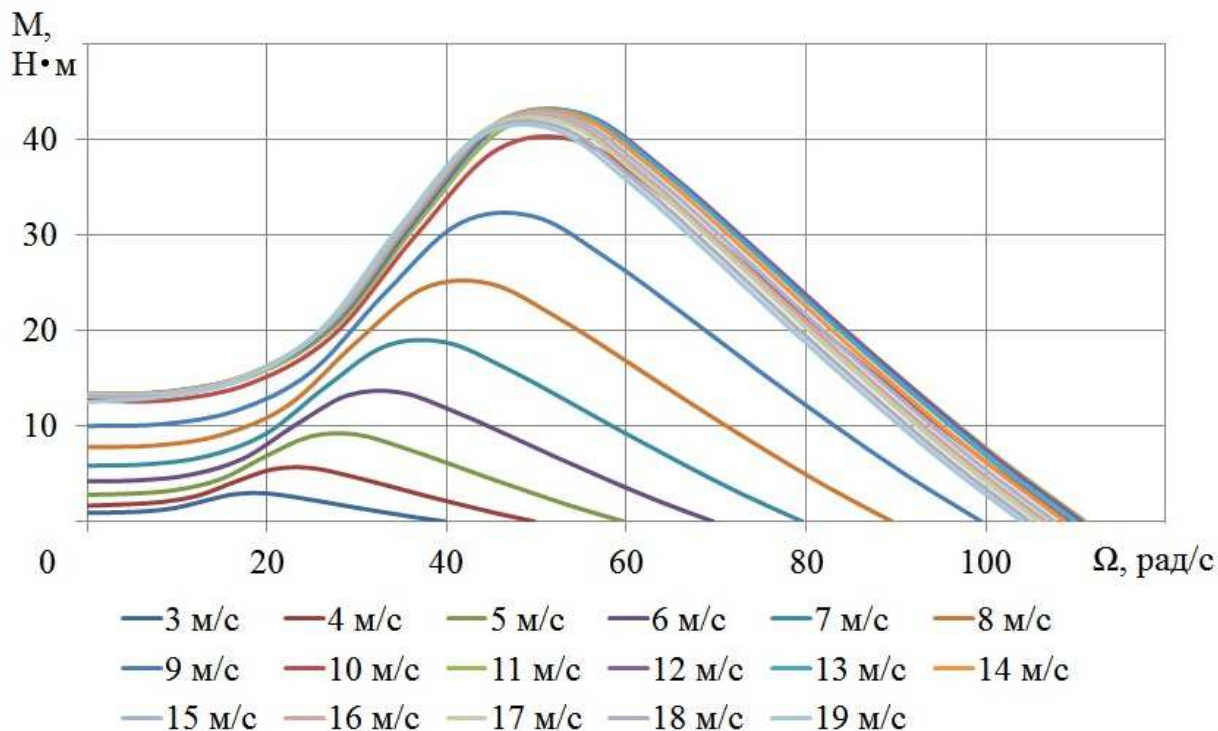


Рис. 2. Механические характеристики ветротурбины АТИК

Для настройки двухконтурной системы автоматического управления ДПТ, содержащей внутренний контур тока и внешний контур скорости, использовалась методика, приведенная в [2].

С целью исключения перерегулирования, контур тока настраиваем на линейный оптимум. Структурная схема контура тока представлена на рис. 3.

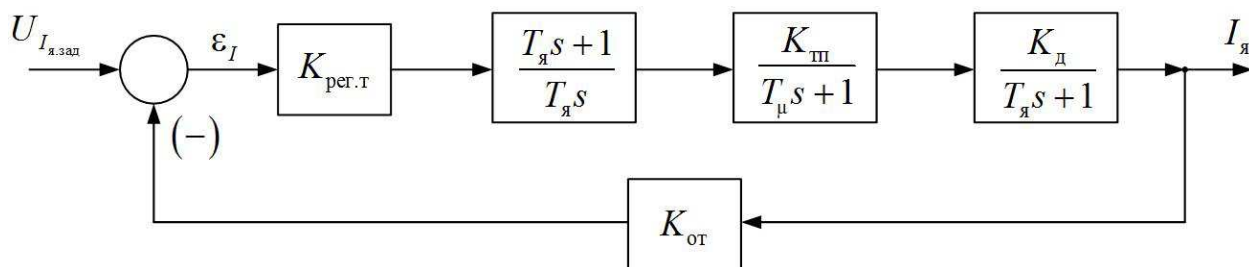


Рис. 3. Структурная схема контура тока

В проектируемой системе используется двигатель постоянного тока с независимым возбуждением типа 4ПНМ132 М04.

Параметры двигателя приведены ниже.

Номинальное напряжение $U_n = 220$ В.

Номинальный ток двигателя $I_n = 14,3$ А.

Сопротивление якорной цепи $R_{я} = 1,58$ Ом.

Индуктивность якорной цепи $L_{я} = 0,01$ Гн.

Электромагнитная постоянная времени $T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,01}{1,58} = 0,0063 \text{ с.}$

Номинальная частота вращения $\omega_{\text{н}} = 314,159 \text{ рад/с.}$

Коэффициент электромеханической связи определяется по выражению

$$c_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{220 - 14,3 \cdot 1,58}{314,159} = 0,628 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

Малая некомпенсируемая постоянная времени преобразователя напряжения равен

$$T_{\text{тп}} = T_{\mu} = 0,00167 \text{ с.}$$

Суммарный момент инерции электромеханического агрегата равен

$$J_{\Sigma} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Коэффициент обратной связи по току принимается равным

$$K_{\text{от}} = \frac{10}{3 \cdot I_{\text{н}}} = \frac{10}{3 \cdot 14,3} = 0,233.$$

Передаточная функция разомкнутого контура тока имеет вид

$$W_{\text{раз.т}}(s) = \frac{K_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}} \cdot s + 1} \cdot \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{я}} \cdot s + 1} \cdot K_{\text{от}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{д}} = \frac{1}{R_{\text{я}}}$ – коэффициент передачи якорной цепи двигателя.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура тока при настройке на линейный оптимум имеет вид

$$W_{\text{раз.т}}^{\text{ж}}(s) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot s (T_{\mu} \cdot s + 1)}. \quad (2)$$

Передаточная функция регулятора тока определяется как отношение желаемой передаточной функции (2) к передаточной функции разомкнутого контура тока (1)

$$\begin{aligned} W_{\text{рег.т}}(s) &= \frac{W_{\text{раз.т}}^{\text{ж}}(s)}{W_{\text{раз.т}}(s)} = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot s (T_{\mu} \cdot s + 1)} \cdot \frac{K_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}} \cdot s + 1} \cdot \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{я}} \cdot s + 1} \cdot K_{\text{от}} = \\ &= \frac{T_{\text{я}} \cdot s + 1}{4 \cdot T_{\mu} K_{\text{тп}} K_{\text{д}} K_{\text{от}} \cdot s} = \frac{T_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{4 \cdot T_{\mu} K_{\text{тп}} K_{\text{от}}} \cdot \frac{T_{\text{я}} \cdot s + 1}{T_{\text{я}} \cdot s} \end{aligned}$$

Учитывая, что $K_{\text{д}} = \frac{1}{R_{\text{я}}}$, передаточная функция регулятора тока принимает следующий вид

ций вид

$$W_{\text{рег.т}}(s) = K_{\text{рег.т}} \cdot \frac{T_y \cdot s + 1}{T_y \cdot s},$$

$$\text{где } K_{\text{рег.т}} = \frac{T_y \cdot R_y}{4 \cdot T_{\mu} K_{\text{тп}} K_{\text{от}}}.$$

Имитационная модель структурной схемы контура тока, созданная в среде Matlab Simulink, приведена на рис. 4.

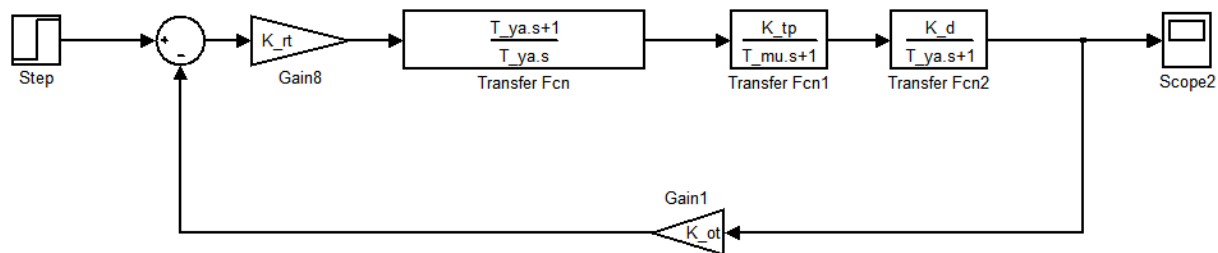


Рис. 4. Имитационная модель контура тока

График переходного процесса в контуре тока для ДПТ приведен на рис. 5. Из полученного графика видно, что время переходного процесса составило $t_{\text{пн}}=0,0145$ с при установившемся значении тока $I_{\text{уст}}=42,9$ А.

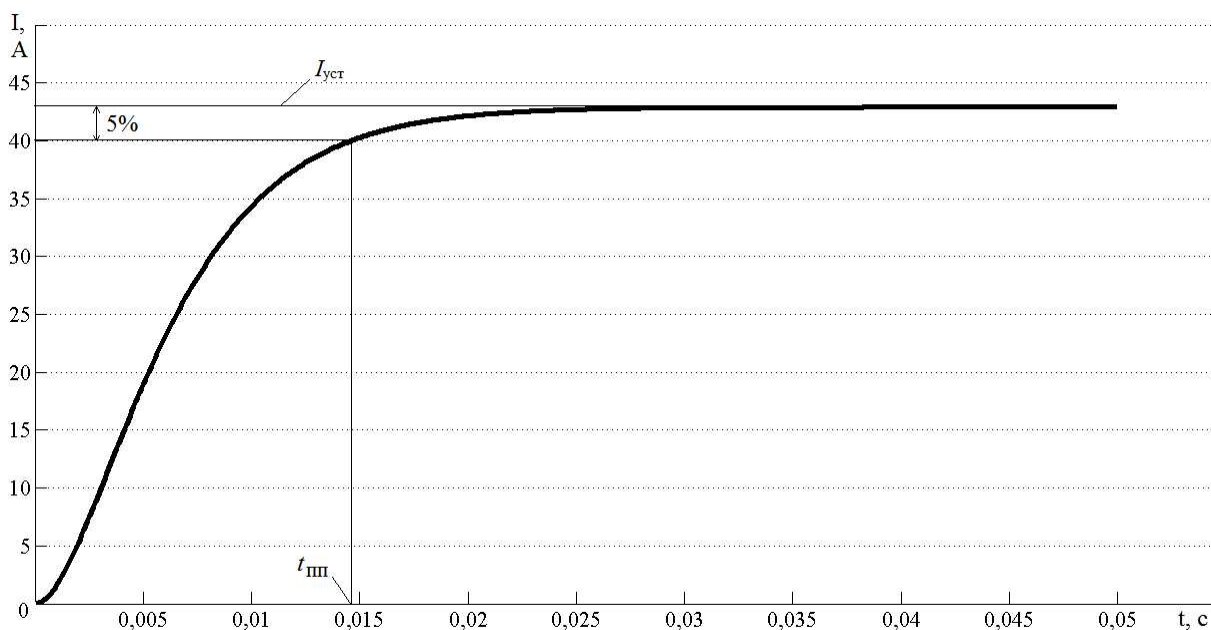


Рис. 5. График переходного процесса

Настройка контура скорости осуществляется также по линейному оптимуму во избежание перерегулирования. Структурная схема контура скорости представлена на рис. 6.

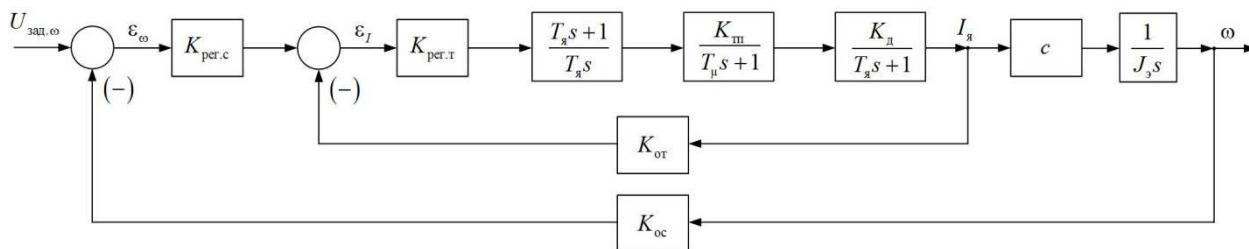


Рис. 6. Структурная схема контура скорости

Коэффициент обратной связи по скорости принимается равным

$$K_{oc} = \frac{10 \cdot 30}{1000 \cdot \pi} = 0,0955.$$

Передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{раз.с}(s) = \frac{1/K_{от}}{4 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1) + 1} \cdot c \cdot \frac{K_{oc}}{J_{я} \cdot s}, \quad (3)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости при настройке на линейный оптимум имеет вид

$$W_{раз.с}^{ж}(s) = \frac{1}{16 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (4 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1) + 1)}. \quad (4)$$

Передаточная функция регулятора скорости определяется как отношение желаемой передаточной функции (4) к передаточной функции разомкнутого контура скорости (3)

$$W_{пер.с}(s) = \frac{W_{раз.с}^{ж}(s)}{W_{раз.с}(s)} = \frac{1}{16 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (4 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1) + 1)} \cdot \frac{K_{oc}/K_{от}}{4 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1) + 1} \cdot \frac{c}{J_{я} \cdot s};$$

$$W_{пер.с}(s) = \frac{K_{от} \cdot J_{я}}{16 \cdot T_{\mu} \cdot c \cdot K_{oc}}$$

Имитационная модель структурной схемы контура скорости, созданная в среде Matlab Simulink, приведена на рис. 7. На вход системы подается скачкообразное воздействие 10 В, которое соответствует сигналу задания на номинальную скорость двигателя 1000 об/мин.

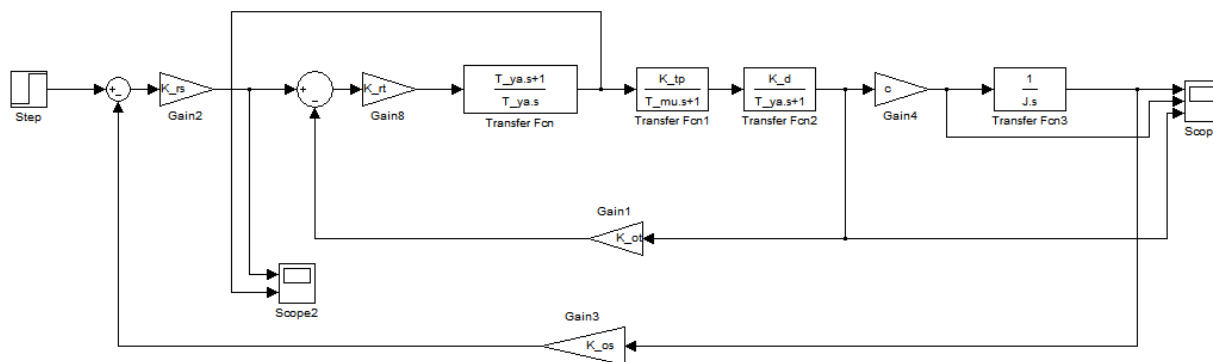


Рис. 7. Имитационная модель контура скорости

Графики переходных процессов в контуре скорости приведены на рис. 8, на которых изображены следующие параметры: установившееся значение угловой скорости $\Omega_{уст}=104,06$ рад/с, время переходного процесса $t_{пп}=0,0545$ с, максимальное значение момента $M_{макс}=318,65$ Н·м, максимальное значение тока $I_{макс}=507,4$ А.

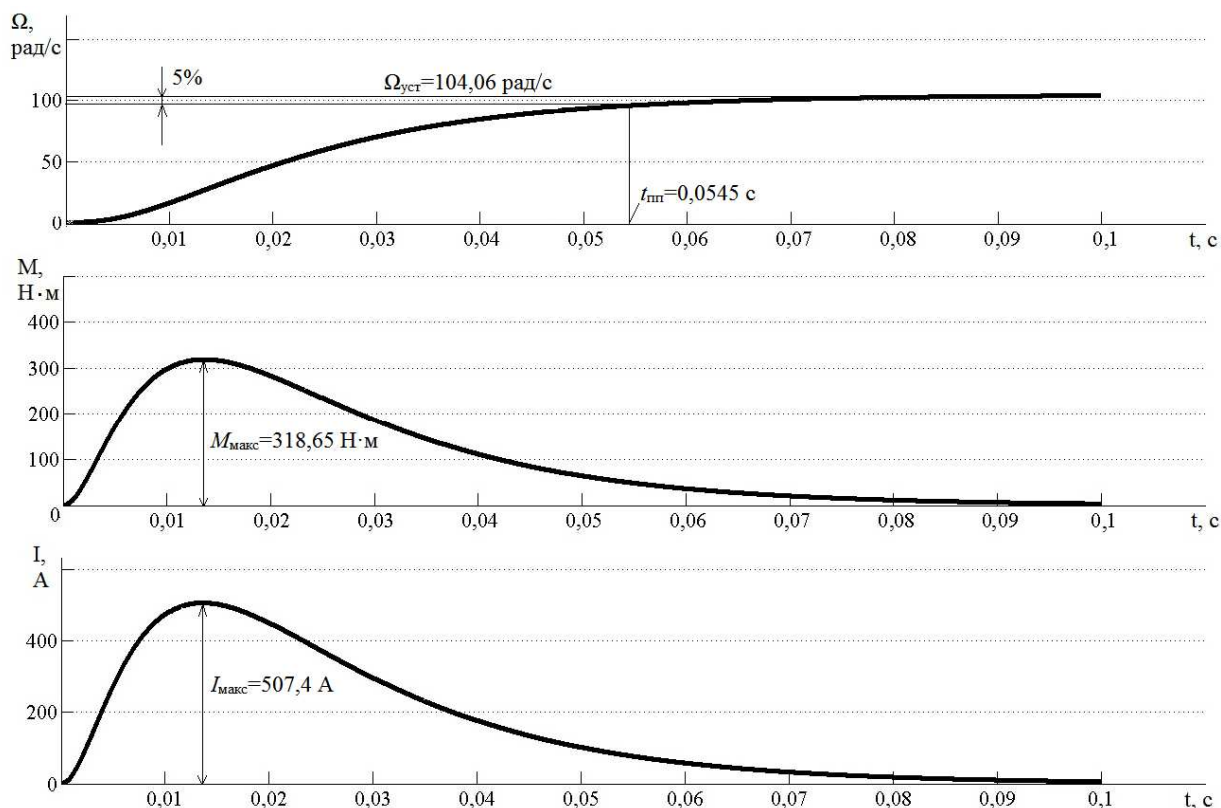


Рис. 8. Графики переходного процесса по скорости, моменту и току

После настройки контура тока и скорости на линейный оптимум, который обеспечивает нулевую ошибку по возмущению и отсутствие перерегулирования, в систему вводится блок зависимого токоограничения, который содержит таблично введенную механическую характеристику ветротурбины (таблица 1).

Таблица 1

Механическая характеристика при 7 м/с ветротурбины АТИК

Ω , рад/ с	0	6,6 3	13,2 7	19, 9	26,5 3	33,1 7	39,8	46,4 3	53,0 7	59,7 0	66,3 3	72,9 7	79, 6
M, Н·м	5,8 5	5,9 9	6,83	9,1 9	14,0 8	18,3 6	18,7 8	16,1 3	12,8 0	9,32	5,99	2,83	0

Структурная схема системы, моделирующей механическую характеристику ветротурбины, представлена на рис. 9.

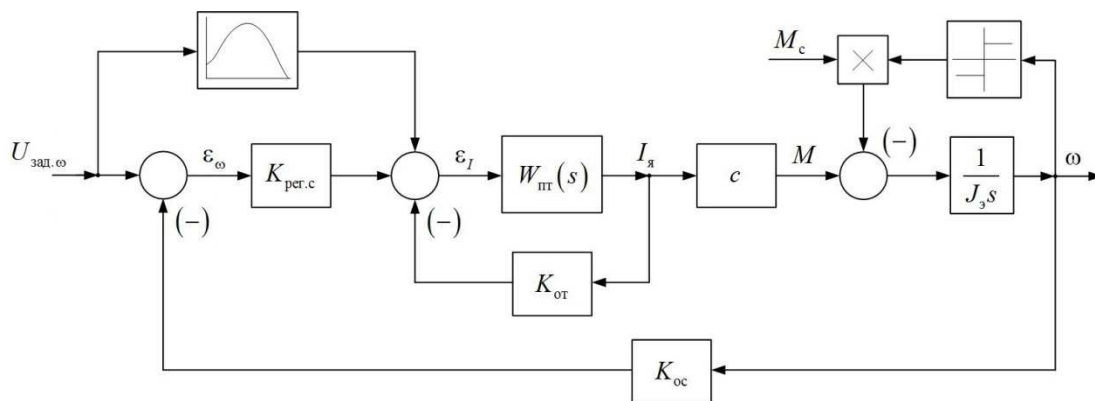


Рис. 9. Обобщенная структурная схема системы

Здесь $W_{пт}(s) = \frac{K_{пт} \cdot K_{тп} \cdot K_{д}}{T_{я}s \cdot (T_{\mu}s + 1)}$ – передаточная функция прямой ветви замкнутого контура тока, которая введена с целью упростить структурную схему.

Полная модель управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения, имитирующего механические характеристики ветротурбины, представлена на рис. 10.

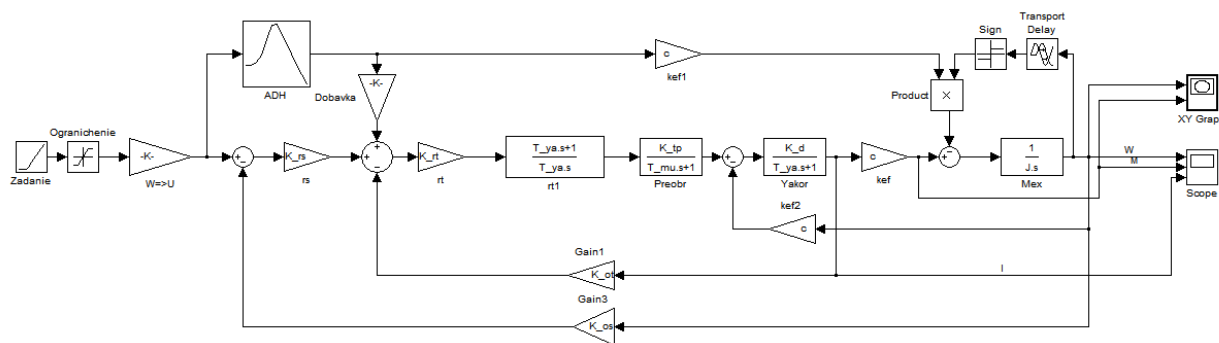


Рис. 10. Имитационная модель ветротурбины

Блок зависимого токоограничения «ADH» содержит механическую характеристику турбины при определенной скорости ветра.

Сигнал задания на угловую скорость моделируется источником «Ramp», который позволяет формировать величину по линейному закону. Выбор угла наклона определяется по максимальному значению угловой скорости и длительности переходного процесса $t_{пп} = 3 \cdot \tau_{мех.турб}$. Максимально допустимый из условий динамики тангенс угла наклона прямой определяется по выражению

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Omega_{max}}{3 \cdot \tau_{мех.турб}}$$

Для снятия механической характеристики ветротурбины на вал обязательно должна подаваться нагрузка, формируемая также блоком зависимого токоограничения «ADH». Физически нагрузку формирует синхронный генератор.

Для сравнения исходной и полученной в результате моделирования характеристик изображены на рис. 11 и оценена погрешность на рабочем участке характеристики, которая составляет не более 3%.

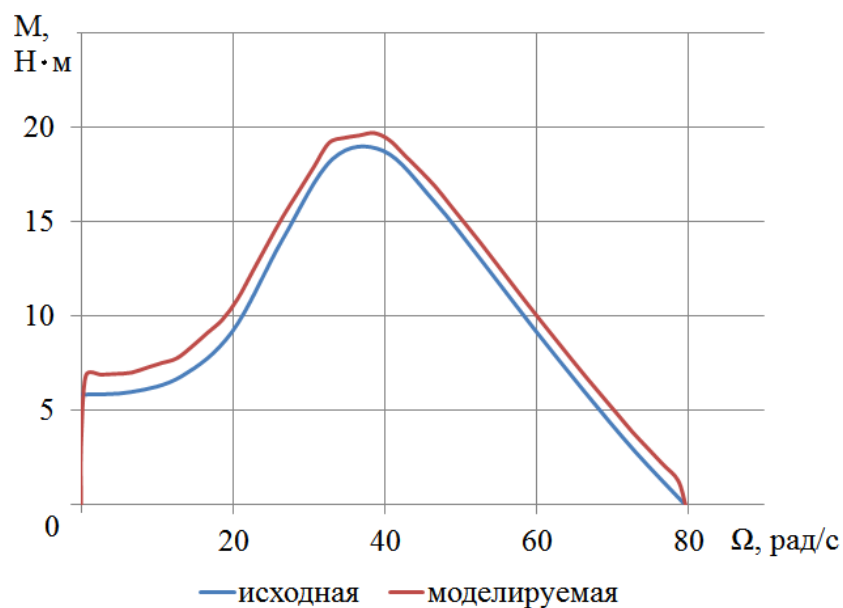


Рис. 11. Результат моделирования

Таким образом, в настоящей работе доказана возможность разработки физической модели ветротурбины на базе двигателя постоянного тока, моделирующего механические характеристики как в статических, так и в динамических режимах работы, определены параметры электропривода постоянного тока, необходимые для создания натурной модели, которая позволит исследовать ветроэнергетические установки в лабораторных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обухов С.Г., Сарсикеев Е.Ж. Математическая модель ветротурбины малой мощности в MATLAB SIMULINK // Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал. – 2012. – № 2. – С. 42–48.

2. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

3. <http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2011.pdf>.

Рецензент: Ушаков Василий Яковлевич, профессор, доктор технических наук.