

Департамент образования и науки города Севастополя
Государственное бюджетное образовательное учреждение
«Центр дополнительного образования
«Малая академия наук»

Направление: Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным,
устойчивым и современным источникам энергии для всех.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ**

Работу выполнила:

Армароли Ангелина Робертовна,
учащаяся творческого объединения
прикладной математики
ГБОУ «ЦДО «Малая академия наук»,
ученица 10-Б класса, школа 19.

Научные руководители:

Ляшко Елена Тимофеевна,
завуч ГБОУ «ЦДО «Малая академия
наук», естественные науки;
Скорик Иван Викторович,
Канов Лев Николаевич,
педагоги дополнительного образова-
ния, руководители творческого объеди-
нения робототехники
и прикладной математики
ГБОУ «ЦДО «Малая академия наук»,
к.т.н., доц. СевГУ

Севастополь
2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ	8
РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЕТРОТУРБИНЫ.	10
РАЗДЕЛ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ВЭУ К СКОРОСТИ ВЕТРА И СОПРОТИВЛЕНИЮ НАГРУЗКИ.	13
РАЗДЕЛ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТЕЙ РЕШЕНИЙ НА ПЛОСКОСТИ АРГУМЕНТОВ	16
РАЗДЕЛ 5. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ РЕЖИМА ВЭУ.	21
РАЗДЕЛ 6. УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ РАБОТЫ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	25
РАЗДЕЛ 7. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА.	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	41
ПРИЛОЖЕНИЯ.	42

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ**

Армарали Анжелика Робертовна,
ГБОУ ЦДО «Малая академия наук»,

10-Б класс, школа № 19, XXXXXXXXXXXX@NNNNNN.ru.

Научные руководители: Ляшко Елена Тимофеевна, завуч ГБОУ «ЦДО «Малая академия наук», естественные науки; Скорик Иван Викторович, Канов Лев Николаевич, педагоги ДО творческого объединения «Прикладная математика» ГБОУ ЦДО «Малая академия наук», к.т.н., доц. СевГУ

Проект Армарали А.Р. «Моделирование аномальных режимов ветроэлектрических установок с использованием функций чувствительности» посвящен актуальной задаче повышения надежности работы ветроэлектрических установок при изменении скорости ветра и нагрузки.

Стабильная работа ветроэлектрических установок часто нарушается при изменении скорости ветра или при изменении нагрузки. При плавном изменении скорости ветра или электрического сопротивления нагрузки на ветрогенератор скорость вращения ветроколеса может внезапно резко увеличиваться или уменьшаться. Это сопровождается ударными моментами на ветроколесо, что приводит к нарушению его работы. Необходимо, чтобы скорость вращения изменялась плавно, без резких скачков. Существующие способы обеспечения безотказной работы ветроэлектрических установок часто не позволяют добиться устойчивой скорости вращения ветроколеса, особенно при непрерывном изменении скорости ветра и нагрузки в динамическом режиме.

Выявление причин появления этой проблемы основано на математической теории чувствительности решений уравнений по отношению к коэффициентам этих уравнений.

Автором предложена методика выявления причины нестабильности скорости вращения ветроколеса на основе построения функций чувствительности скорости вращения генератора к изменению сопротивления нагрузки и скорости ветра. Методика предполагает формирование величин коэффициентов чувствительности решения уравнения генератора при изменении сопротивления и скорости вращения. Армарали А.Р. разработала формулы зависимости скорости вращения генератора от сопротивления нагрузки и скорости ветра и способ получения функций чувствительности. Применение метода, реализованного в среде MathCad, показало перспективность предложенной методики для решения задачи повышения надежности работы ветроэлектрической установки.

Практическая значимость работы заключается в реальных практических рекомендациях модернизации существующих способов повышения надежности управления ветроэлектрическими установками.

ВВЕДЕНИЕ

Применение нетрадиционных источников электроэнергии в настоящее время является актуальной задачей. В связи с ухудшающейся экологической обстановкой ветроэнергетика является приоритетным направлением в комплексе развития нетрадиционных источников электроэнергии. Это особенно актуально для потребителей удаленных районов, где есть затруднения со стационарным электроснабжением, и в качестве альтернативных источников электрической энергии выступают автономные ветроэлектрические установки (ВЭУ) небольшой мощности.

Основной особенностью автономных ВЭУ является необходимость работы в условиях изменения скорости ветра и нагрузки электрического генератора. Изменение скорости ветра приводит к изменению скорости вращения генератора. Изменение нагрузки генератора приводит к изменению момента сопротивления генератора и также к изменению скорости его вращения. Автономные ВЭУ небольшой мощности обычно не имеют редукторов и механических систем регулирования скорости вращения. Опыт эксплуатации таких ВЭУ [1, 4] показывает, что зачастую их работа неустойчива: при плавных изменениях скорости ветра или нагрузки генератора скорость вращения меняется резко, скачком, что приводит к ударным усилиям и нежелательно.

Целью работы является повышение надежности работы автономной ветроэлектрической установки (ВЭУ) небольшой мощности путем определения областей устойчивости ее режима при изменении скорости ветра и нагрузки электрического генератора. Для достижения этой цели поставлены **задачи**:

- математическое описание электрического генератора;
- построение математической модели ветроколеса;
- формирование основного уравнения ВЭУ;
- выявление особенностей режима ВЭУ при изменении скорости ветра и нагрузки генератора с применением функций чувствительности.

Объектом исследования является автономная ветроэлектрическая установка небольшой мощности, предназначенная для получения электрической

энергии. **Предметом** исследования является основное уравнение режима подобной ветроэлектрической установки.

Для решения поставленных задач применены **методы** математического моделирования; метод графического решения нелинейного алгебраического уравнения; математическая теория устойчивости динамических систем. В целом работа имеет теоретический характер; ее результаты должны быть использованы при проектировании систем управления режимом автономной ВЭУ небольшой мощности.

Научная новизна:

- получила дальнейшее развитие математическая аппроксимация характеристики момента ветроколеса, которая более точно, чем существующие отражает опытные данные [1];

- сформировано и графически решено основное уравнение скорости ВЭУ в условиях изменяющейся скорости ветра и нагрузки генератора;

- в трехмерном пространстве впервые построена поверхность зависимости скорости ВЭУ от скорости ветра и нагрузки генератора и объяснены особенности динамического поведения ВЭУ;

- впервые определены области устойчивости скорости ВЭУ в пространстве параметров ее режима.

Практическая ценность полученных теоретических результатов состоит в использовании их для построения электронной системы управления нагрузкой электрического генератора с целью предотвращения выхода его из области устойчивой работы в условиях изменяющейся скорости ветра, а также работе в режиме максимальной мощности. Использование результатов работы позволит избежать ударных изменений скорости ВЭУ и улучшить надежность ее работы.

Объем пояснительной записки 37 печатных страниц, количество иллюстраций 19, список использованных источников 6, приложения 2.

Теоретические сведения

Основные понятия

Постоянные перемещения воздуха объясняются неравномерным нагревом Солнцем земной поверхности. Эти перемещения обуславливают ветер. Как всякое движущееся тело, ветер обладает кинетической энергией, которая может быть преобразована в механическую и электрическую энергии с помощью ветродвигателей. Ветроустановка состоит из ветроагрегата, электрического генератора, аккумуляторов и потребителей. Основной частью ветроустановки является ветроколесо. Посредством его кинетическая энергия ветра преобразуется в механическую энергию. Ветродвигатели могут иметь вертикальную или горизонтальную оси вращения. Электрические ветроустановки разделяются на установки постоянного и переменного тока. Ветроэлектрические установки снабжаются специальными системами автоматического управления, обеспечивающими работу в зависимости от изменения скорости ветра и нагрузки потребителей.

Актуальной является стабилизация работы ветроустановок при колебаниях скорости ветра и сопротивления нагрузки. Наиболее эффективным средством анализа устойчивости работы ветроустановок является математический аппарат теории функций чувствительности для исследования зависимости свойств ветроустановки от изменения их параметров.

Хронология, известные применения

Первые опыты создания ветроэлектрических агрегатов относятся к началу прошлого века. В США была образована крупная фирма по производству ветровых насосных и электрогенерирующих установок «Джекобс винд электрик». В ней применено трехлопастное ветроколесо и регулятор угла установки лопастей. В СССР разработкой и исследованием ветроэлектроустановок занимался Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ). Труды русского ученого Н.Е.Жуковского составляют основу современной теории ветроэлектроустановок.

В середине прошлого века в СССР была построена многоагрегатная ветро-дизельная электрическая станция из 12 ветроагрегатов с генераторами постоянного тока мощностью по 40 кВт. Однако строительство многоагрегатных ветроэлектрических станций не получило широкого применения в связи с широкомасштабными планами электрификации народного хозяйства тепловыми и гидроэлектрическими станциями.

В настоящее время в связи с ухудшающейся экологической обстановкой ветроэнергетика является одной из наиболее быстроразвивающихся отраслей энергетики. Сегодня ветроэлектростанция на равных конкурирует с тепловыми и атомными электростанциями и использует электрические генераторы мощностью до двух мегаватт. На сегодняшний день в основном решены принципиальные вопросы преобразования ветровой энергии в электрическую. Но в связи с ускоряющимся развитием электронной цифровой техники все более актуальной становится задача повышения качества вырабатываемой ветроэлектростанциями электроэнергии, автоматизация и оптимизация режимов работы.

Этапы решения задачи проекта

1. Построение математической модели всего комплекса ветроэлектростанции с учетом ветротурбины, электрического генератора, системы управления и потребляемой нагрузки.

2. Выбор желаемых режимов работы ветроэлектростанции в условиях непрерывно изменяющейся ветровой обстановки на всей территории расположения поля ветротурбин.

3. Расчет оптимального управления ветроустановками для достижения заданного уровня выработки электроэнергии в текущее время при изменении скорости ветра и нагрузки на основе теории функций чувствительности.

4. Конструирование блок-схемы системы оптимального управления ветроэлектростанцией на основе полученного алгоритма решения.

5. Теоретический анализ возможности применения технологий искусственного интеллекта для построения систем управления.

РАЗДЕЛ 1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Применение нетрадиционных источников электроэнергии в настоящее время является актуальной задачей. В частности, ветроэлектрическая установка преобразует энергию ветра в электрическую. Автономные ветроэлектрические установки (ВЭУ) могут производить электроэнергию для бытовых и промышленных нужд и представляют альтернативу традиционному электроснабжению. Основной особенностью ВЭУ является необходимость работы в условиях изменения скорости ветра и нагрузки электрического генератора. Изменение скорости ветра приводит к изменению скорости вращения генератора, что в свою очередь, приводит к изменению величины выходного напряжения. Изменение нагрузки генератора приводит к изменению момента сопротивления генератора и снова к изменению скорости его вращения. Опыт показывает, что при плавном изменении скорости ветра или нагрузки генератора скорость его вращения может изменяться резко, скачком, что приводит к большим усилиям, ударам. На практике потому необходимо предусматривать меры по стабилизации скорости вращения генератора и стабилизации его выходного напряжения при изменении нагрузки и скорости ветра. Рассмотрим принцип действия ВЭУ и ее работу в условиях изменяющейся нагрузки и скорости ветра с позиций подхода теории чувствительности.

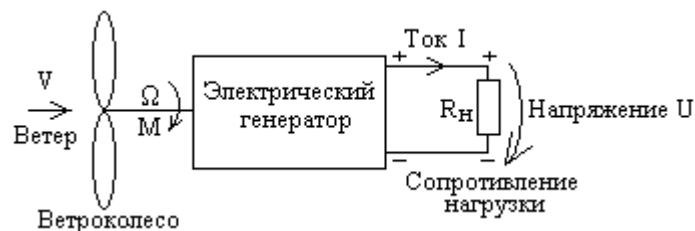


Рис.1.1. Блок – схема ВЭУ

Блок – схема ВЭУ изображена на рис.1.1. Ведущим элементом ВЭУ является ветроколесо, которое воспринимает кинетическую энергию ветра и

приводит во вращение электрический генератор. Обозначим скорость ветра V , а угловую скорость вращения ветроколеса и генератора обозначим Ω . На выводах вращающегося генератора возникает напряжение U , а в подключенном к нему сопротивлении нагрузки R_H возникает ток I , благодаря чему в нагрузку передается мощность $P = UI$.

Из электротехники [2] известно, что электродвижущая сила E , возникающая в генераторе постоянного напряжения, пропорциональна угловой скорости его вращения $E = C\Omega$. При возникновении электрического тока на внутреннем сопротивлении генератора R_{BH} появляется падение напряжения $U_{BH} = IR_{BH}$. Напряжение на нагрузке $U = IR_H$ равно разности между электродвижущей силой E и внутренним падением напряжения: $U = E - U_{BH}$ или

$$C\Omega = IR_{BH} + IR_H. \quad (1.1)$$

Возникновение тока в нагрузке сопровождается появлением электромагнитного момента сопротивления генератора, пропорционального току $M_\Gamma = CI$. Выражая ток из уравнения (1.1) $I = \frac{C\Omega}{R + R_H}$ и подставляя в последнее равенство, получаем

$$M_\Gamma = \frac{C^2\Omega}{R + R_H}. \quad (1.2)$$

Кроме электромагнитного момента тормозящее действие оказывает момент трения M_{TP} , пропорциональный скорости вращения

$$M_{TP} = k_{TP}\Omega. \quad (1.3)$$

Два этих тормозящих момента преодолеваются вращающим моментом ветроколеса $M_{BK} = M_\Gamma + M_{TP}$. После подстановки из уравнений (1.2), (1.3) получаем основное уравнение ВЭУ

$$M_{BK} = \left(\frac{C^2}{R + R_H} + k_{TP} \right) \Omega. \quad (1.4)$$

РАЗДЕЛ 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЕТРОТУРБИНЫ

Наибольший интерес в основном уравнении ВЭУ представляет вращающий момент ветроколеса, его зависимость от скорости ветра и его скорости вращения. Очевидно, вращающий момент растет с ростом скорости ветра. Однако с ростом скорости ветра растет и скорость вращения ветроколеса, а зависимость вращающего момента от скорости вращения ветроколеса имеет сложный характер. В самом деле, при неподвижном колесе и любой скорости ветра возникает начальный положительный вращающий момент холостого хода $M_{ХХ}$ тем больший, чем больше скорость ветра. С другой стороны, при слишком большой скорости вращения колеса оно будет тормозиться ветровым потоком, т.е. момент на валу ветроколеса будет отрицательный. Таким образом, существует определенная скорость вращения ветроколеса $\Omega_{КР}$, при которой вращающий момент равен нулю. Поэтому вращающий момент ветроколеса имеет вид положительной функции в зависимости от скорости вращения. Эта функция начинается с точки $M_{ХХ}$ при $\Omega = 0$ и заканчивается в точке $\Omega_{КР}$ на оси абсцисс и имеет на этом интервале более – менее выраженный максимум, рис.2.1.

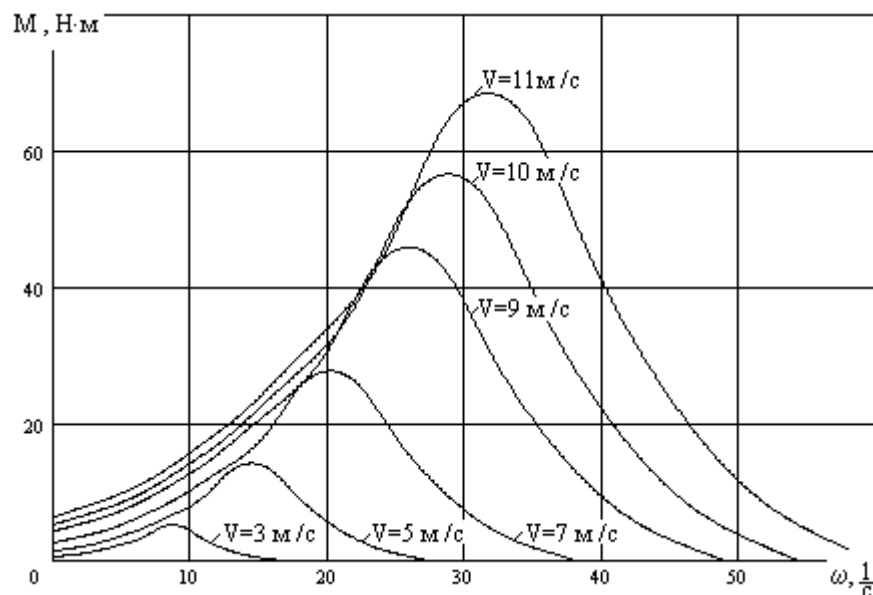


Рис.2.1. Вращающий момент ветроколеса

Обобщенное математическое описание этой зависимости связано с коэффициентом быстроходности z , который учитывает размеры ветроколеса и представляет отношение линейной скорости концов его лопастей к скорости ветра. Линейная скорость на внешней окружности ветроколеса определяется произведением $V_{BK} = R_{BK}\Omega$, где $R_{BK} = \frac{D}{2}$ – радиус ветроколеса. Тогда коэффициент быстроходности имеет вид $z = \frac{V_{BK}}{V} = R_{BK} \frac{\Omega}{V}$. Согласно многочисленным исследованиям (см., например в [2]) обобщенная зависимость удельного вращающего момента от коэффициента z имеет вид $M_{уд.БК} = f(z)$, изображенный на рис.2.2, сплошная линия. Максимальное значение удельного момента возникает при коэффициенте $z_0 = \frac{4\pi}{n}$, где n – число лопастей ветроколеса. Для того, чтобы перейти к моменту конкретного ветроколеса необходимо учесть его диаметр D и скорость ветра [2]:

$$M_{BK} = M_{уд.БК}(z) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16}, \quad (2.1)$$

где $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха.



Рис.2.2. Удельный вращающий момент

С учетом равенства (1.3) основное уравнение моментов (1.4) принимает вид:

$$M_{уд.БК}(z) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16} = \left(\frac{C^2}{R + R_H} + k_{TP} \right) \Omega. \quad (2.2)$$

Уравнение (2.2) характеризует равновесие моментов и определяет режим работы ВЭУ. По заданным значениям скорости ветра и сопротивлению нагрузки из этого уравнения можно найти скорость вращения генератора, а затем по выражению (1.1) – ток и напряжение нагрузки.

Для дальнейшего анализа необходима аналитическая аппроксимация характеристики удельного момента ветроколеса, рис.2.2. Для аппроксимации выпуклых вверх функций наиболее подходит показательная функция с отрицательным показателем, асимметрично приподнятая вверх с левой стороны от максимума. С учетом этого соображения аппроксимация была выполнена в среде *MathCad*; аппроксимирующая функция имеет вид

$$M_{уд.БК} = k_1 e^{-k_2(z-z_0)^2} + k_3 e^{-k_4 z} + k_5 \sin z - k_6 z^5, \quad (2.3)$$

где первое слагаемое определяет главный характер выпуклой вверх функции, смещенной вправо на величину z_0 ; второе слагаемое обеспечивает асимметрию этой функции относительно z_0 ; последние два слагаемые создают необходимую кривизну графика вблизи точек $z = 0$ и $z = z_{MAX}$. В процесс аппроксимации были получены следующие значения коэффициентов: $k_1 = 0,09$; $k_2 = 0,35$; $k_3 = 0,006$; $k_4 = 0,03$; $k_5 = 0,009$; $k_6 = 3 \cdot 10^{-7}$. Максимальное значение z составляет $z_{MAX} = 8,5$; максимальное значение удельного момента составляет $0,087$ при $z_0 = 4,5$. Аппроксимированная характеристика, построенная по выражению (2.3) с найденными коэффициентами аппроксимации, изображена на рис.2.1 штриховой линией. Как следует из рис.2.2, аппроксимация в достаточной степени соответствует исходной теоретической кривой, особенно с учетом того, что сама исходная кривая $M_{уд.БК} = f(z)$ обычно представляется в усредненном виде [2].

С учетом аппроксимации (2.3) уравнение режима ВЭУ (2.2) становится сложным нелинейным алгебраическим уравнением, непосредственное аналитическое решение которого невозможно.

РАЗДЕЛ 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ВЭУ К СКОРОСТИ ВЕТРА И СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

Для решения нелинейных алгебраических уравнений существует несколько численных методов, таких как метод простой итерации, метод Ньютона и др. [3]. Применение этих методов к уравнению (2.2) затруднено тем, что итерации не всегда сходятся; их сходимость зависит от начального приближения Ω_0 к решению, которое неизвестно. Попытки решения в среде *MathCad* показали, что на плоскости аргументов R_H, V есть точки, дающие единственное решение уравнения (2.2), а есть точки, дающие два или даже три решения. Точки с единственным решением дают или малые значения скорости вращения или большие, а точки с несколькими решениями дают различные значения скорости. Для определения структуры решения применена теория функций чувствительности [3].

Сделаем количественную оценку зависимости скорости генератора от сопротивления нагрузки и скорости ветра с помощью функций чувствительности. Определим чувствительность решения уравнения (2.2) к изменению сопротивления нагрузки $S_{R_H}^{\Omega}$. Функция уравнения (6) $f(\Omega, R_H, V)$ имеет вид:

$$f(\Omega, R_H, V) = \left(\frac{C^2}{R + R_H} + k_{TP} \right) \Omega - M_{уд.БК}(z) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16}.$$

Выполняя дифференцирование по R_H , получаем

$$S_{R_H}^{\Omega} = \frac{\partial \Omega}{\partial R_H} = \frac{C^2 \Omega}{(R + R_H)^2 \left(k_{TP} + \frac{C^2}{R + R_H} - \frac{D^3 \rho \pi V R_{БК}}{16} \frac{\partial M_{уд.БК}(z)}{\partial z} \right)}. \quad (8)$$

Аналогично определяем функцию чувствительности скорости генератора по скорости ветра

$$S_V^\Omega = \frac{\partial \Omega}{\partial V} = \frac{-\frac{\Omega D^4 \rho \pi}{32} \frac{\partial M_{уд.БК}(z)}{\partial z} + \frac{D^3 \rho \pi V}{8} M_{уд.БК}(z)}{k_{TP} + \frac{C^2}{R + R_H} - \frac{D^4 \rho \pi V}{32} \frac{\partial M_{уд.БК}(z)}{\partial z}}. \quad (3.2)$$

В этих формулах

$$\frac{\partial M_{уд.БК}(z)}{\partial z} = -2k_1 k_2 (z - z_0) e^{-k_2(z-z_0)^2} - k_3 k_4 e^{-k_4 z} + k_5 \cos z - 5k_6 z^4. \quad (3.3)$$

Подставляя в выражения (3.1) – (3.3) решения Ω для каждого конкретных значений R_H и V на плоскости аргументов получаем коэффициенты чувствительности решения по R_H и V при этих значениях.

На рис.3.1 показаны значения коэффициента чувствительности $S_{R_H}^\Omega$ в виде поверхности в трехмерном пространстве, построенной по выражениям (3.1), (3.3): на рис.3.1,а – для единственных решений в области больших значений аргументов; на рис.3.1,б – в области нескольких решений; на рис.3.1,в – для единственных решений в области малых значений аргументов. Аналогично на рис.3.2 показано изображение поверхности, изображающей коэффициент чувствительности S_V^Ω по уравнениям (3.2), (3.3).

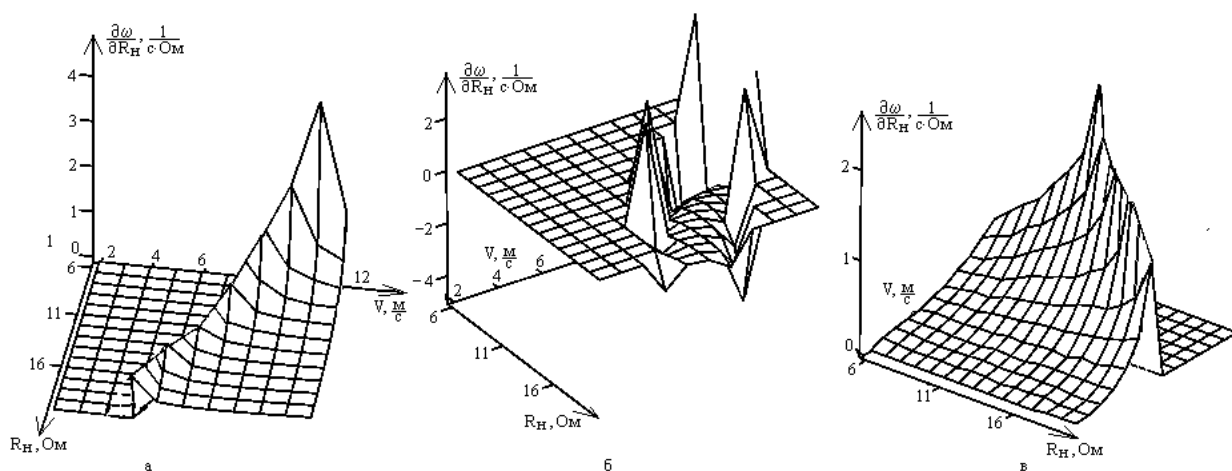


Рис.3.1. Коэффициент чувствительности решения по сопротивлению нагрузки

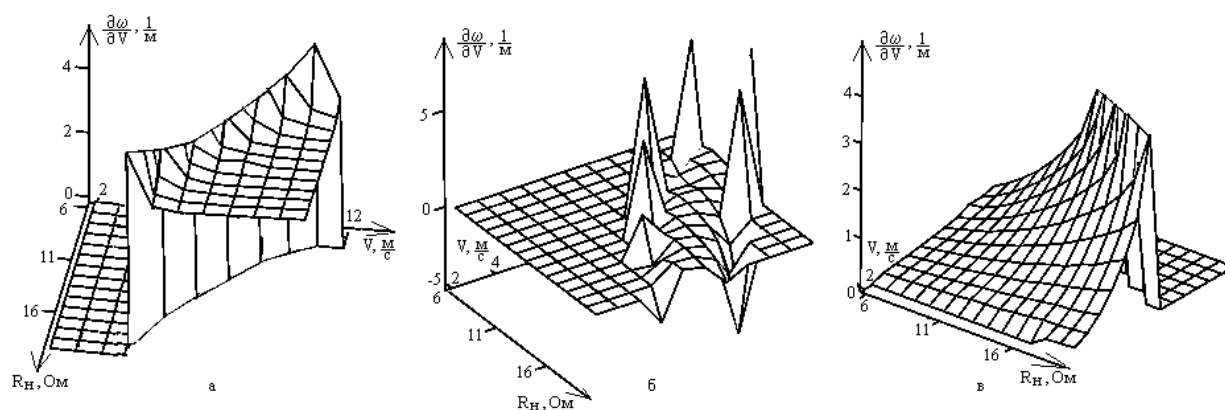


Рис.3.2. Коэффициент чувствительности решения по скорости ветра

Из рисунков 3.1, 3.2 следует, что в области, соответствующей малым скоростям генератора, коэффициенты чувствительности $S_{R_H}^{\Omega}$ и S_V^{Ω} положительны и невелики. Это говорит о том, что при небольшом увеличении сопротивления нагрузки и скорости ветра скорость генератора также немного нарастает. Значения коэффициентов чувствительности увеличиваются по мере приближения к границе области.

Аналогична зависимость коэффициентов чувствительности от R_H и V в области больших значений аргументов: коэффициенты положительны и велики вблизи границы области, рисунки 3.1 и 3.2,а. По мере удаления от границы коэффициенты уменьшаются. Это говорит о небольшом возрастании скорости генератора при небольших увеличениях R_H и V , однако чувствительность решения по скорости ветра здесь выше, чем в предыдущей области.

Коэффициент $S_{R_H}^{\omega}$ в средней области отрицателен, что говорит о небольшом снижении скорости генератора с ростом сопротивления. Коэффициент S_V^{ω} в этой области невелик и меняет знак, что говорит о небольших нарастаниях или убываниях скорости генератора при нарастании скорости ветра. Кроме того, при разных значениях скорости, соответствующих нескольким точкам решения в этой области, коэффициенты чувствительности резко изменяются, рисунки 3.1 и 3.2,б.

РАЗДЕЛ 4
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТЕЙ РЕШЕНИЙ
НА ПЛОСКОСТИ АРГУМЕНТОВ

Для определения точек границы областей решений уравнения (6) найдем такие точки на плоскости аргументов R_H и V , в которых величины коэффициентов чувствительности очень велики, теоретически равны бесконечности. Для этого совместно решим уравнение (2.2) и уравнение, полученное приравниванием знаменателя функций чувствительности к нулю:

$$\left. \begin{aligned} M_{уд.БК}(z) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16} &= \left(\frac{C^2}{R + R_H} + k_{TP} \right) \Omega; \\ \frac{C^2}{R + R_H} + k_{TP} - \frac{\partial M_{уд.БК}(z)}{\partial z} \frac{D^4 \rho \pi V}{32} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

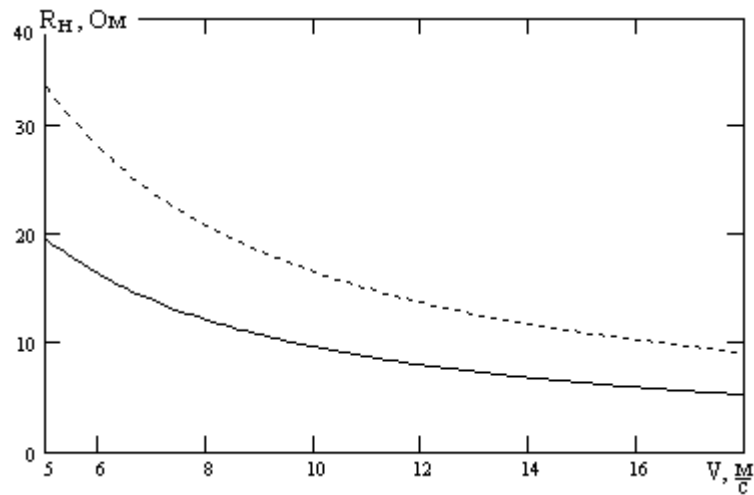
Расчеты показали, что эти точки на плоскости R_H и V образуют две линии, координаты которых приведены в таблице 4.1. В этой же таблице помещены соответствующие значения решения, т.е. скорости вращения ветроколеса.

Таблица 4.1

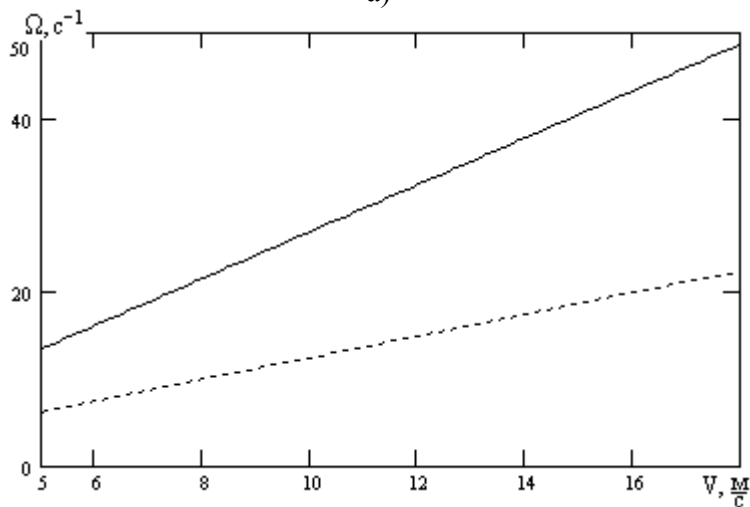
**Параметры уравнения ВЭУ с бесконечно большими значениями
коэффициентов чувствительности решения**

V , м/с	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Ω , 1/с	8,10	8,74	11,23	13,73	16,22	18,72	21,22	23,71	26,21	28,70	31,20
R_H , Ом	33,04	23,84	18,44	15,03	12,76	10,94	9,62	8,59	7,75	7,05	6,47
Ω , 1/с	13,5	18,91	24,32	29,72	35,13	40,53	45,93	51,34	56,72	62,15	67,55
R_H , Ом	19,6	13,9	10,75	8,75	7,37	6,36	5,58	4,97	4,48	4,07	3,73

На рис.4.1,а изображены графики этих линий на плоскости параметров ВЭУ: сопротивления нагрузки R_H и скорости ветра V ; на рис.4.1,б соответствующие графики зависимости решения Ω от скорости ветра.



а)



б)

Рис.4.1. Особые линии режимов ВЭУ:

- а) линии на плоскости параметров скорости ветра и сопротивления нагрузки;
 б) соответствующие значения решения (скорости вращения)

На рис.4.1,а вся область ниже пунктирной линии соответствует единственным малым значениям скорости вращения, вся область выше сплошной линии соответствует единственным большим значениям скорости. Эти области перекрываются. Средняя область соответствует трем возможным значениям скорости: двум указанным и одному среднему между ними значению.

Все описанные возможные значения решения уравнения (4.1) для скоростей ветра в диапазоне от 5 до 18 м/с и сопротивлений нагрузки – от 6 до 30 Ом наглядно изобразим в трехмерном пространстве, как функцию двух переменных: $\Omega = f(V, R_n)$, рис.4.2. График построен по результатам расчета корней уравнения (2.2), приведенным в таблицах Приложения А и Б. Из рисунка следует, что решения уравнения (2.2) образуют сложную складчатую

поверхность, имеющую несколько областей: нижнюю область 1, соответствующую малым сопротивлениям и скоростям ветра (скорость генератора невелика); среднюю область 2 с обратной зависимостью решения от сопротивления (с ростом сопротивления скорость генератора падает) и высокую область 3, соответствующую большим значениям скорости ветра и сопротивления нагрузки. В этой области скорость генератора велика, и он выдает большую мощность в нагрузку. При взгляде сверху эти области перекрываются, что и отражает неоднозначность решения уравнения (2.2), рис.4.1,а. Проекциями складки на плоскость V, R_H являются сплошная и пунктирная линии. Пунктирная линия отделяет области 1 и 2; сплошная линия – области 2 и 3.

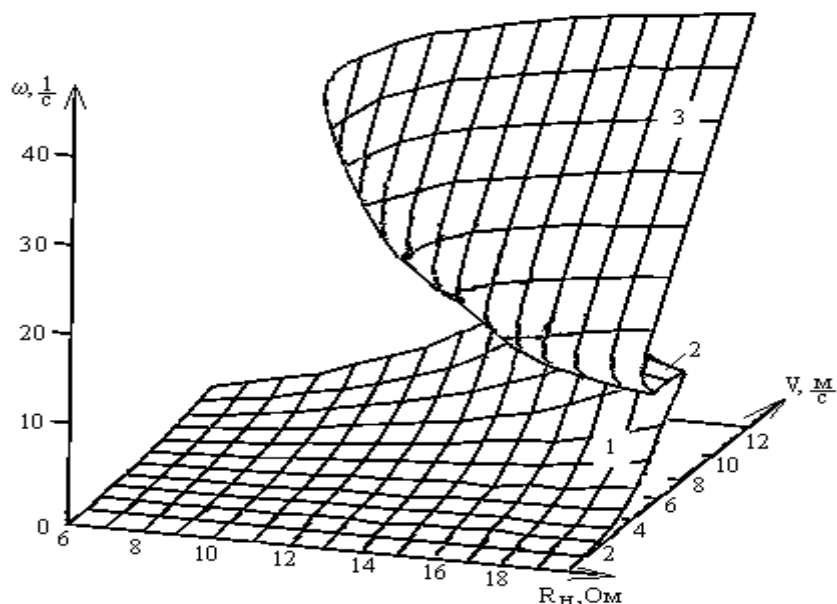


Рис.4.2. Поверхность решения уравнения ВЭУ

Согласно решению уравнений (4.1) наибольшие значения коэффициентов чувствительности возникают на границах областей. Это свидетельствует о сильной зависимости решения от изменения сопротивления нагрузки и скорости ветра, так как в граничных точках два решения сливаются в одно, которое затем исчезает.

Такая высокая чувствительность решения в граничных точках и приводит к скачкообразным изменениям скорости генератора при небольших от-

клонениях R_H и V , что соответствует переходу точки решения с одной области поверхности решения на другую, рис.4.3.

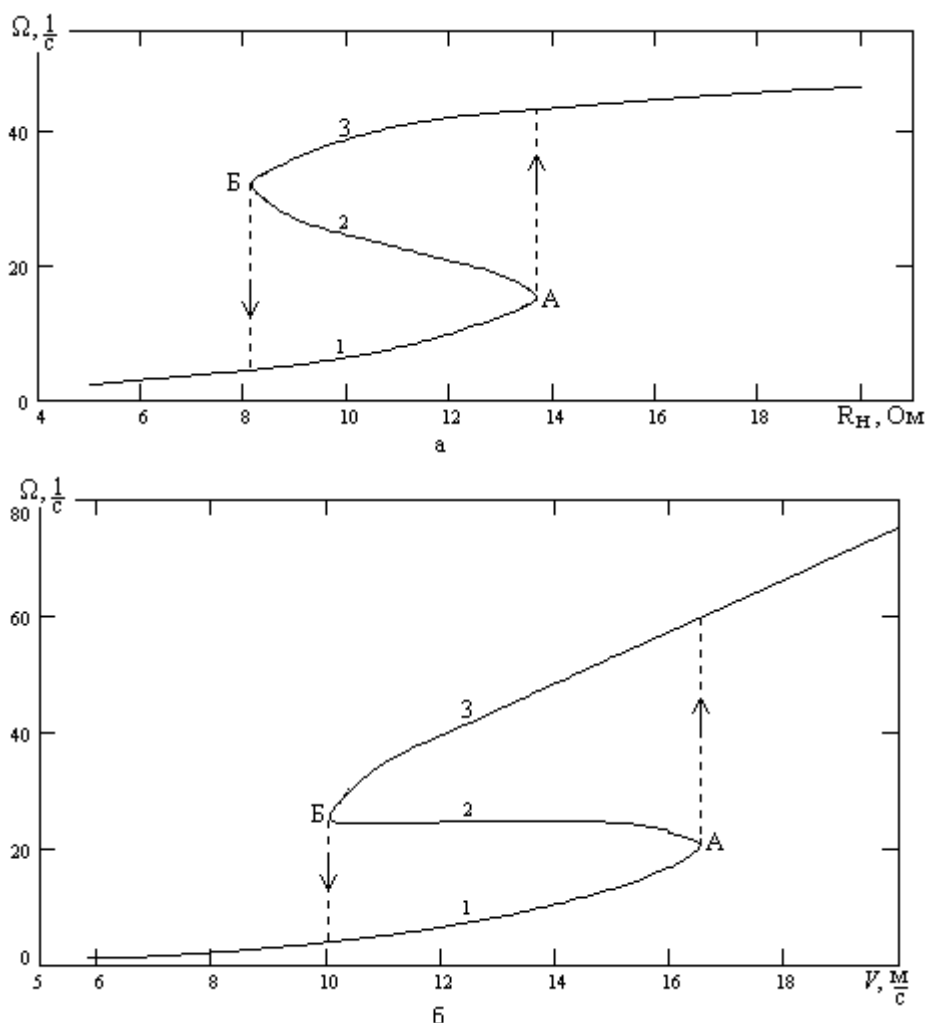


Рис.4.3. Сечения поверхности решения:
 а) сечение плоскостью Ω , R_H при $V = 12$ м/с;
 б) сечение плоскостью Ω , V при $R_H = 10$ Ом

На рис.4.3 показано сечение поверхности решений уравнения (2.2) плоскостью, параллельной координатной плоскости $(\Omega, 0, R_H)$ и соответствующей скорости ветра 12 м/с. Линии 1, 2 и 3 соответствуют сечениям областей 1, 2 и 3 поверхности решения. Скачкообразный переход скорости вверх происходит из точки A на линии сечения поверхности решения.

Пусть, например, при скорости ветра 12 м/с и сопротивлении нагрузки 7 Ом скорость генератора невелика и равна $3,6 \text{ с}^{-1}$. Точка решения находится

на поверхности в области 1, рис. 4.3,а. Если сопротивление плавно увеличивать, то точка решения будет двигаться вправо по линии, рис.4.3,а, и скорость вращения будет плавно расти. При значении сопротивления нагрузки 14 Ом точка решения скачком перейдет от величины $14,34 \text{ с}^{-1}$ до значения $43,47 \text{ с}^{-1}$ в области 3. Этот скачок скорости будет сопровождаться ударным моментом на ВЭУ при неизменной скорости ветра 12 м/с. Аналогичные скачки скорости ветроколеса возникают и при плавном изменении скорости ветра и неизменном сопротивлении нагрузки, рис.4.3,б.

Подобные скачки скорости и ударные моменты отрицательно действуют на ВЭУ. Отметим, что точки решения ни при каких изменениях сопротивления нагрузки или скорости ветра не попадают на область 2 поверхности решения (рис.4.2) внутреннюю поверхность складки. Точки решения на интервале *A – B* на рис.4.3 не реализуются.

РАЗДЕЛ 5

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ РЕЖИМА ВЭУ

Для наглядности выполним графическое представление неоднозначности решения уравнения ВЭУ. Правая часть уравнения (2.2) представляет график момента сопротивления генератора в зависимости от угловой скорости вращения. Это прямая линия, проходящая через начало координат, и ее наклон зависит от сопротивления нагрузки: чем больше сопротивление, тем меньше наклон.

Левая часть уравнения (2.2) представляет зависимость вращающего момента ветроколеса от скорости вращения; она зависит от скорости ветра. Семейство таких зависимостей, построенных по уравнению (2.1), показано на рис.2.1 для нескольких значений скорости ветра (при построении принят диаметр ветроколеса $D = 3$ м).

Как видно из рисунка с ростом скорости ветра максимум кривой момента смещается вверх и вправо. Очевидно, решение уравнения (2.2) определяется точками пересечения графиков его левой и правой частей, построенных на одном чертеже в неизменном масштабе.

На рис.5.1 изображены некоторые характерные случаи, возникающие при графическом решении уравнения (2.2) при разных сопротивлениях нагрузки и скоростях ветра. При построении характеристики генератора приняты следующие типичные значения параметров генератора постоянного напряжения небольшой мощности [2]: $C = 4,39$; $R = 0,2$ Ом; $k_{mp} = 0,01$. Для определенности на рис.5.1 изображена одна характеристика ветроколеса, соответствующая скорости ветра $V = 12$ м/с и несколько характеристик момента

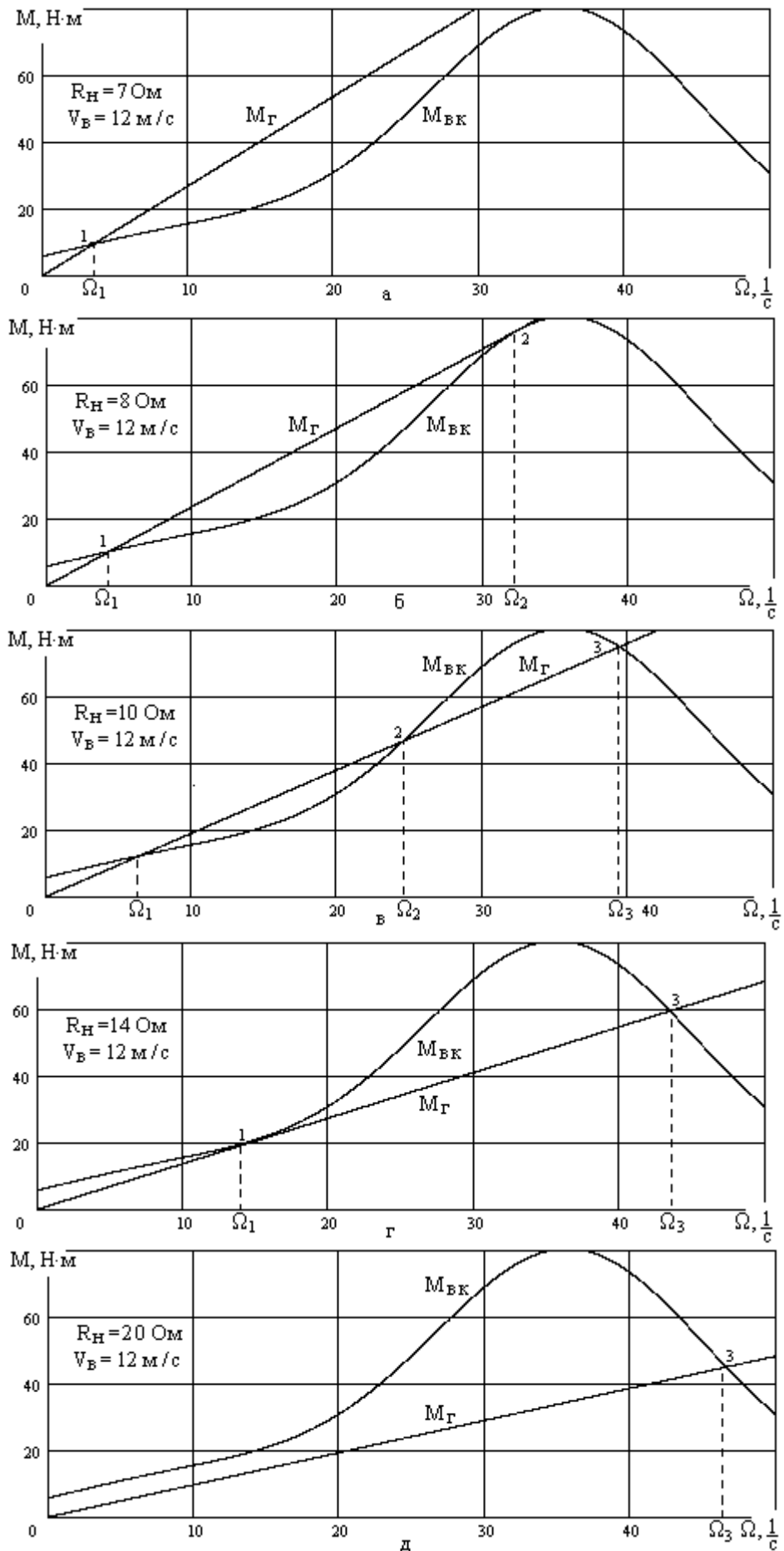


Рис.5.1. Графическое решение основного уравнения ВЭУ

сопротивления для некоторых значений нагрузки генератора R_H . Из рисунка следует, что решение уравнения (2.2) может иметь одно, два или три решения.

При небольшом сопротивлении нагрузки $R_H = 7 \text{ Ом}$ (рис.5.1,а) имеется всего одно решение уравнения (2.2), соответствующее значению скорости $\Omega_1 = 3,6 \text{ с}^{-1}$. Это малая скорость, при которой генератор выдает небольшой ток

$$I_1 = \frac{C\Omega_1}{R + R_H} = \frac{4,39 \cdot 3,6}{0,2 + 7} = 2,195 \text{ А} \text{ и напряжение } U_1 = I_1 R_H = 2,195 \cdot 7 = 15,36 \text{ В.}$$

При сопротивлении нагрузки 8 Ом (рис.5.1,б) появляется еще одно решение, соответствующее большой скорости $\Omega_2 = 32,46 \text{ с}^{-1}$ и дающее ток генератора 17,38 А и напряжение 139 В. С увеличением сопротивления нагрузки до 10 Ом (рис.5.1,в) появляется третье решение, соответствующее скорости $\Omega_3 = 39,44 \text{ с}^{-1}$ с током генератора 16,97 А и напряжением 169,7 В. При увеличении сопротивления до 14 Ом (рис.5.1,г) вновь остается два решения, соответствующие минимальной и максимальной скоростям $\Omega_1 = 14,74 \text{ с}^{-1}$ и $\Omega_3 = 43,47 \text{ с}^{-1}$, а с дальнейшим ростом сопротивления (рис.5.1,д) остается одно решение $\Omega_3 = 46,59 \text{ с}^{-1}$ с током 10,125 А и напряжением 202,5 В. Очевидно, при дальнейшем увеличении сопротивления будет оставаться одно решение, соответствующее большой скорости генератора.

Аналогичные ситуации могут возникать и при изменении скорости ветра при неизменном сопротивлении нагрузки. К таким же случаям приводит и решение при одновременном изменении скорости ветра и сопротивления нагрузки.

Все описанные возможные значения решения уравнения (2.2) для скоростей ветра в диапазоне от 2 до 18 м/с и сопротивлений нагрузки – от 6 до 25 Ом наглядно изображаются в трехмерном пространстве, как функция двух переменных $\Omega = f(V, R_H)$, рис.4.2, в виде сложной складчатой поверхности. имеющей несколько областей: нижнюю область 1, соответствующую малым сопротивлениям и скоростям ветра (скорость генератора невелика); среднюю

область 2 с обратной зависимостью решения от сопротивления (с ростом сопротивления скорость генератора падает) и высокую область 3, соответствующую большим значениям скорости ветра и сопротивления нагрузки. В этой области скорость генератора велика, и он выдает большую мощность в нагрузку. При взгляде сверху эти области перекрываются, что отражает неоднозначность решения уравнения (2.2), рис.4.3.

РАЗДЕЛ 6

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Проведенный анализ показал, что при изменении скорости ветра и нагрузки на электрический генератор скорость вращения ветротурбины может изменяться резко, скачком. При увеличении скорости ветра или сопротивления нагрузки скорость вращения резко увеличивается, а при снижении скорости ветра и нагрузки – резко снижается. Это сопровождается нежелательными ударными воздействиями на ветротурбину и отрицательно влияет на её техническое состояние.

Для расчета подобных явлений применим уравнение второго закона Ньютона для вращательного движения в виде [8]

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{TP}\Omega + M_{ЭМ} = M_{БК}, \quad (6.1)$$

где Ω – угловая скорость вращения ветротурбины и соединенного с ней генератора; J – момент инерции ветротурбины и связанного с ней генератора; k_{TP} – коэффициент трения вращающихся элементов ветротурбины и генератора; $M_{ЭМ} = CI = C \frac{C\Omega}{R + R_H}$ – момент сопротивления генератора; C – коэффициент пропорциональности; I – ток генератора, идущий в нагрузку; R, R_H – внутреннее сопротивление генератора и сопротивление нагрузки; $M_{БК} = M_{БК}(\Omega, V)$ – вращающий момент ветротурбины. Первое слагаемое представляет динамический момент, который тратится на изменение скорости вращения ветротурбины (угловое ускорение). Уравнение (6.1) отличается от статического уравнения равновесия моментов только наличием динамического момента $J \frac{d\Omega}{dt}$.

Уравнение (6.1) является нелинейным уравнением и не поддается непосредственному решению. Поэтому решение его выполняем в среде *MathCad* при определенных ранее параметрах: $k_{TP} = 0,01$; $R = 0,2$ Ом; $C = 4,39$;

$D = 3\text{ м}; J = 5,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. На рис.6.1 показаны графики изменения параметров режима ветроэлектрической установки при плавном увеличении сопротивления нагрузки при неизменной скорости ветра $V = 12\text{ м/с}$.

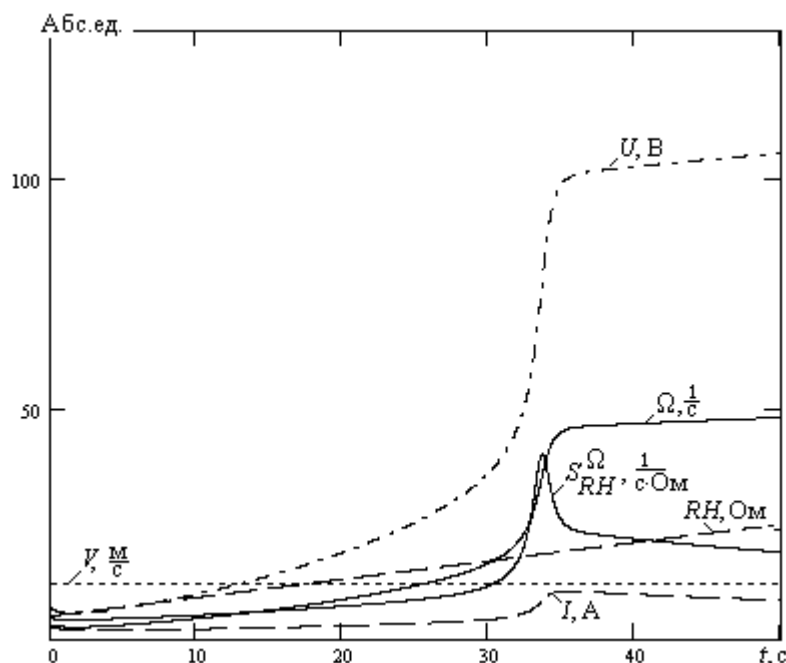


Рис.6.1. Резкое увеличение скорости вращения при плавном нарастании сопротивления нагрузки

Рис.6.1 показывает, что плавное нарастание скорости вращения Ω , происходящее при увеличении сопротивления нагрузки R_H , при достижении R_H значения 14 Ом сменяется резким увеличением скорости вращения от значения 10 с^{-1} до величины 47 с^{-1} , а также напряжения и тока генератора. Функция чувствительности скорости Ω по сопротивлению нагрузки, также приведенная на рис.6.1, имеет в этот момент резкий импульс.

На рис.6.2 показаны графики изменения параметров режима ветроэлектрической установки при плавном увеличении скорости ветра и неизменном сопротивлении нагрузки $R_H = 10\text{ Ом}$ в соответствии с рис.8,б. Рис.6.2 показывает, что плавное нарастание скорости вращения Ω , происходящее при увеличении скорости ветра V , при достижении $V = 22 \text{ м/с}$ сменяется резким увеличением скорости вращения от величины $\Omega = 25 \text{ с}^{-1}$ до величины $\Omega = 76 \text{ с}^{-1}$, а также увеличением тока и напряжения генератора. Функция чувстви-

тельности скорости Ω по скорости ветра, также приведенная на рис.6.2, имеет в этот момент резкий максимум.

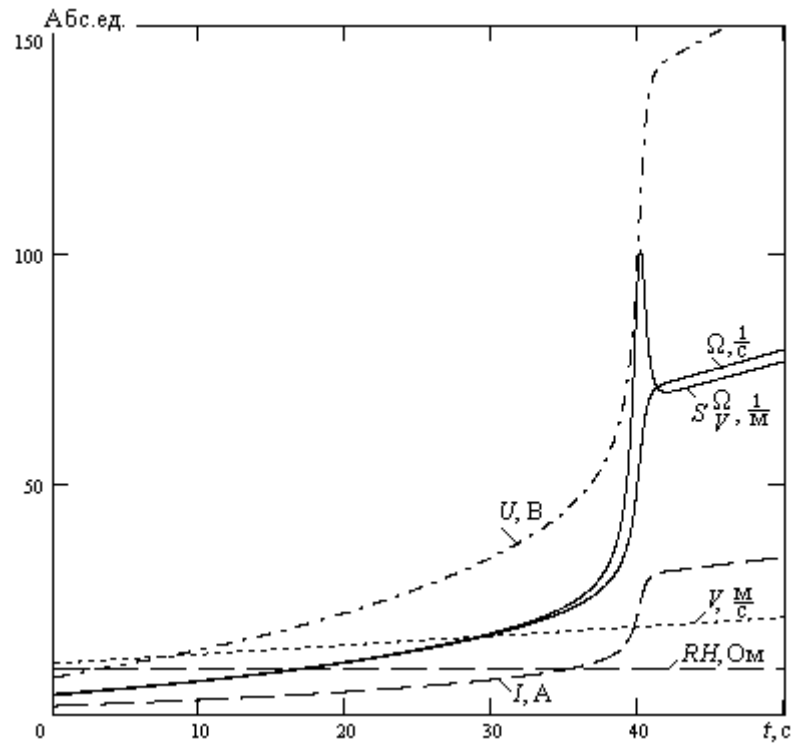


Рис.6.2. Резкий скачок скорости вращения при плавном увеличении скорости ветра

На рис.6.3 показаны графики изменения параметров режима ветроэлектростанции при плавном снижении сопротивления нагрузки и при неизменной скорости ветра $V = 12 м/с$.

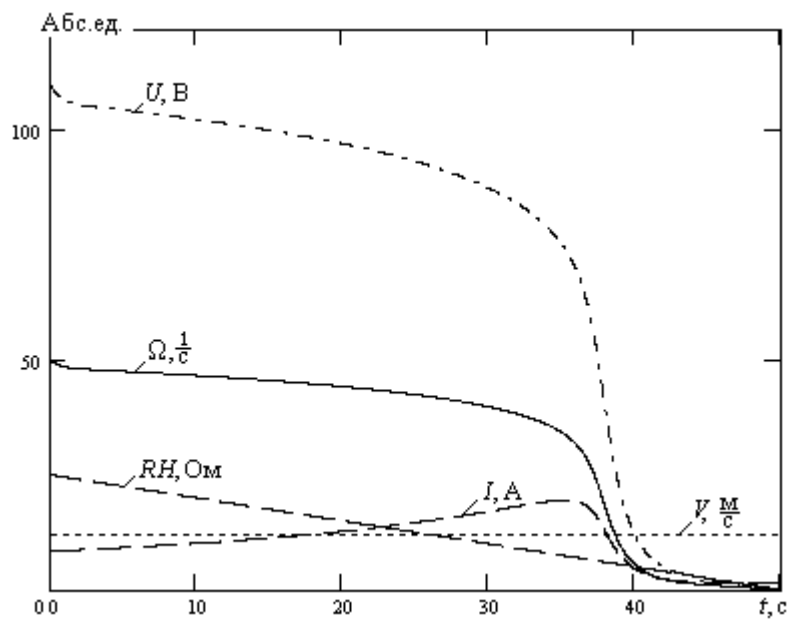


Рис.6.3. Резкое снижение скорости вращения при плавном уменьшении сопротивления нагрузки

Рис.6.3 показывает, что плавное снижение скорости вращения Ω , происходящее при уменьшении сопротивления нагрузки R_H , при достижении значения $R_H(t) = 8 \text{ Ом}$ сменяется резким торможением ветроэлектрической установки от скорости $\Omega = 40 \text{ с}^{-1}$ до скорости $\Omega = 3 \text{ с}^{-1}$.

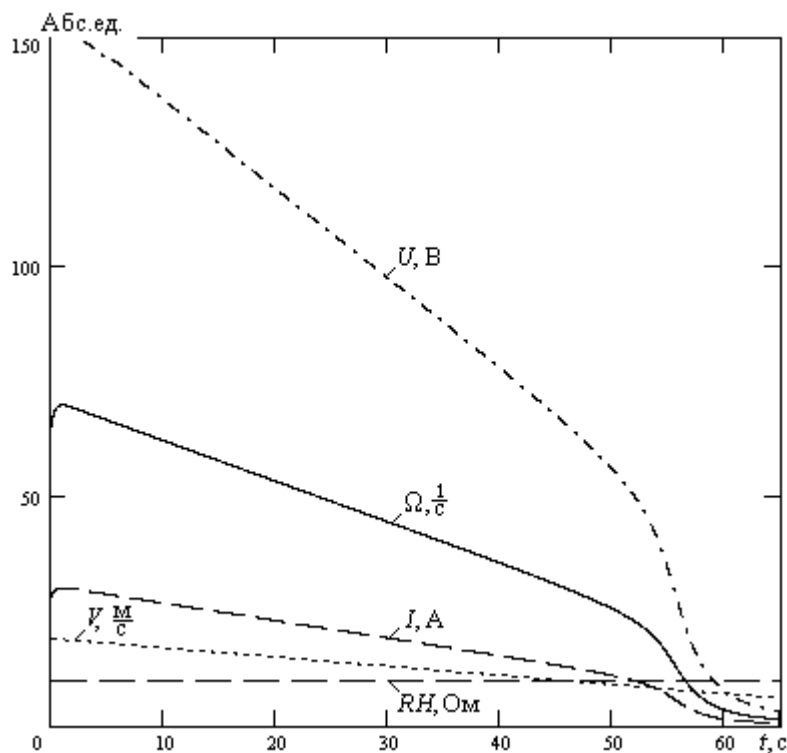


Рис.6.4. Резкое снижение скорости вращения ветротурбины при плавном уменьшении скорости ветра

На рис.6.4 показаны графики изменения параметров режима работы ветроустановки при плавном снижении скорости ветра при неизменном сопротивлении нагрузки $R_H(t) = 10 \text{ Ом}$. Рис.6.4 показывает, что плавное снижение скорости вращения Ω , происходящее при плавном снижении скорости ветра, при достижении $V = 7 \text{ м/с}$ сменяется торможением от значения скорости $\Omega = 25 \text{ с}^{-1}$ до скорости $\Omega = 3 \text{ с}^{-1}$.

Подобные скачки скорости и ударные моменты на ветротурбину отрицательно действуют на все оборудование ветроэлектрической установки. Поэтому актуальной становится задача такого регулирования режима работы, при котором осуществляется стабилизация скорости вращения ветротурбины на желаемом уровне.

Действенным средством регулирования является изменение вращающего момента M при изменении угла α установки лопастей ветротурбины. Таким образом, вращающий момент является функцией трех переменных: скорости вращения, скорости ветра и угла установки лопастей ветротурбины. На рис.6.5 изображены графики этой функции при различных сочетаниях этих параметров. Из графиков следует, что зависимость момента от угла установки α имеет характерный максимум, величина которого тем больше, чем больше скорость ветра. Для целей стабилизации скорости вращения ветротурбины на уровне $10...30 \text{ с}^{-1}$ наиболее подходящим является диапазон изменения угла установки в пределах $30...50$ градусов при скорости ветра $10...50 \text{ м/с}$.

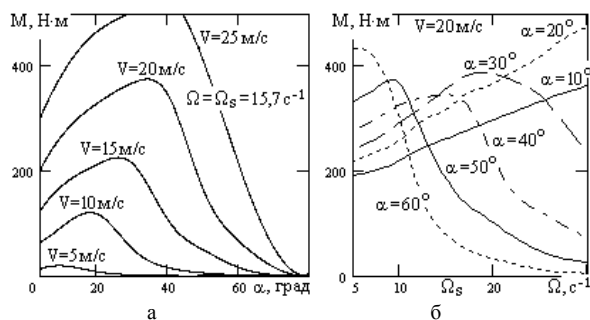


Рис. 6.5. Момент ветротурбины:
 а) неизменная скорость вращения; б) неизменная скорость ветра

Для целей исследования трехмерная функция удельного момента аппроксимирована по двум переменным: коэффициент быстроходности

$z = R_{BK} \frac{\Omega}{V}$ и угол установки лопастей α [2] $M_0 = M_0(z, \alpha)$. С учетом z получаем трехмерную функцию $M_0(\Omega, V, \alpha)$, по которой получаем фактический момент

$$M_{BK}(\Omega, V, \alpha) = M_0(\Omega, V, \alpha) \cdot \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16}.$$

Аппроксимация выполнена в среде *MathCad* на основе *spline* – функций.

Необходимое изменение угла установки лопастей осуществляется электрическим серводвигателем, установленным в основании лопастей. Серводвигатель, вращаясь, через редуктор поворачивает лопасти на необходимый угол. Скорость вращения серводвигателя зависит от подводимого к нему

напряжения: чем больше это напряжение, тем быстрее вращается серводвигатель, и тем быстрее устанавливается нужная величина угла лопасти. Следовательно, чем больше разность между желаемой Ω_0 и фактической Ω скоростью вращения ветротурбины, тем больше должно быть напряжение на серводвигателе. Исходя из этого, построим уравнение вращения серводвигателя в следующем виде:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot u_{CD} = k_\alpha (\Omega - \Omega_0), \quad (6.2)$$

где k_α – коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента передачи редуктора и от желаемой скорости регулировки угла установки α . В уравнении (6.2) левая часть представляет скорость регулирования этого угла. Если фактическая скорость Ω вращения ветротурбины меньше желаемого уровня Ω_0 , напряжение u_{CD} отрицательно, и серводвигатель вращается в сторону уменьшения угла установки с целью повышения вращающего момента M_{BK} , и наоборот, рис.6.5. Таким образом, уравнения (6.3), (6.4) описывают изменения режима работы ветроэлектростанции при стабилизации скорости вращения ветротурбины и генератора при колебаниях сопротивления нагрузки и скорости ветра для предотвращения резких скачков изменения скорости вращения.

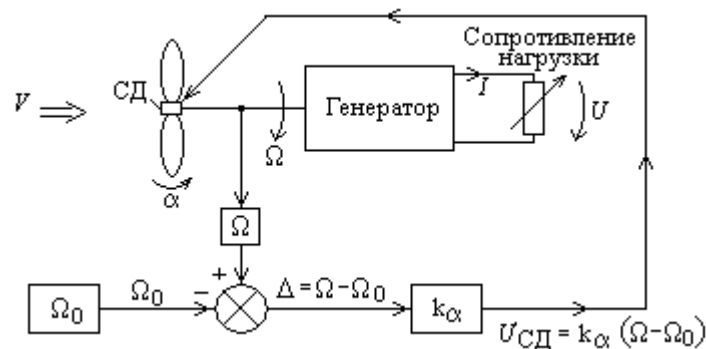


Рис.6.6. Блок-схема устройства стабилизации скорости

Блок – схема предлагаемого устройства управления скоростью вращения показана на рис.6.6. Блок Ω является датчиком скорости вращения: на его выходе возникает напряжение, численно равное значению скорости Ω .

Блок Ω_0 – это задатчик скорости, вырабатывающий напряжение, равное желаемой скорости Ω_0 . В узле сравнения эти напряжения сравниваются, и разность $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_0$ подается на усилитель, который умножает эту разность на коэффициент k_α . Сформированное таким образом напряжение подается на исполнительный серводвигатель, который по мере вращения устанавливает лопасти под таким углом, чтобы изменение момента привело к уменьшению разности $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_0$. Когда скорость вращения ветротурбины совпадет с желаемой, разность $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_0$ становится равной нулю, напряжение на серводвигателе также становится нулевым, он перестает вращаться, и лопасти оказываются повернуты на нужный стабилизирующий угол. При непрерывном изменении скорости вращения ветротурбины в условиях непрерывно изменяющихся скорости ветра и нагрузки серводвигатель также вращается непрерывно в ту или другую сторону, стремясь обеспечить нужный угол установки, при котором $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_0 = 0$.

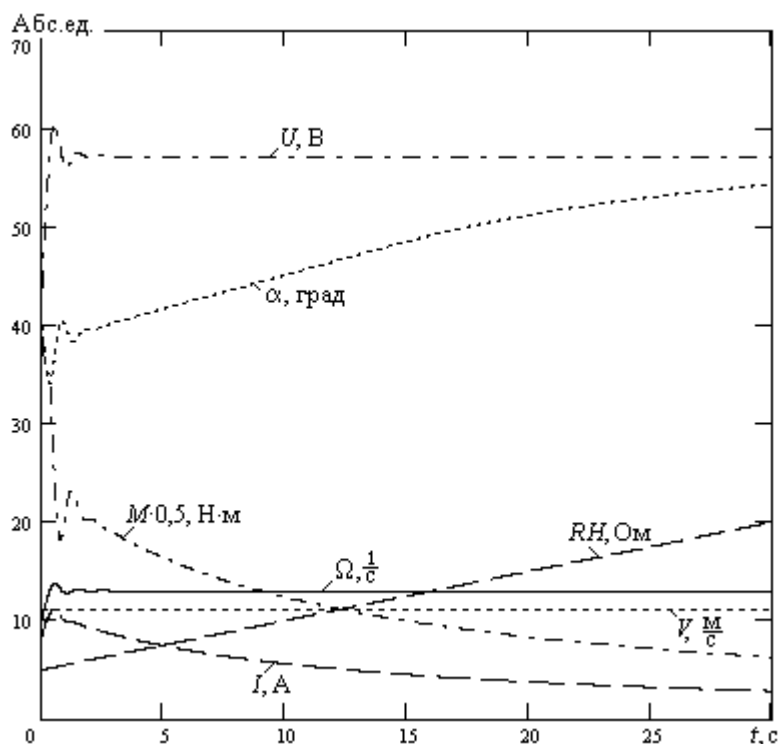


Рис.6.7. Работа ветроэлектростанции при увеличении сопротивления нагрузки

На рис.6.7 – 6.10 показана работа ветроэлектростанции при линейном и колебательном изменении скорости ветра и сопротивления нагрузки. Рисунок

ки показывают, что при всех колебаниях скорости ветра и нагрузки осуществляется приемлемая стабилизация скорости вращения на заданном уровне, и скачков скорости не происходит. Угол установки при этом изменяется в широких пределах под действием серводвигателя.

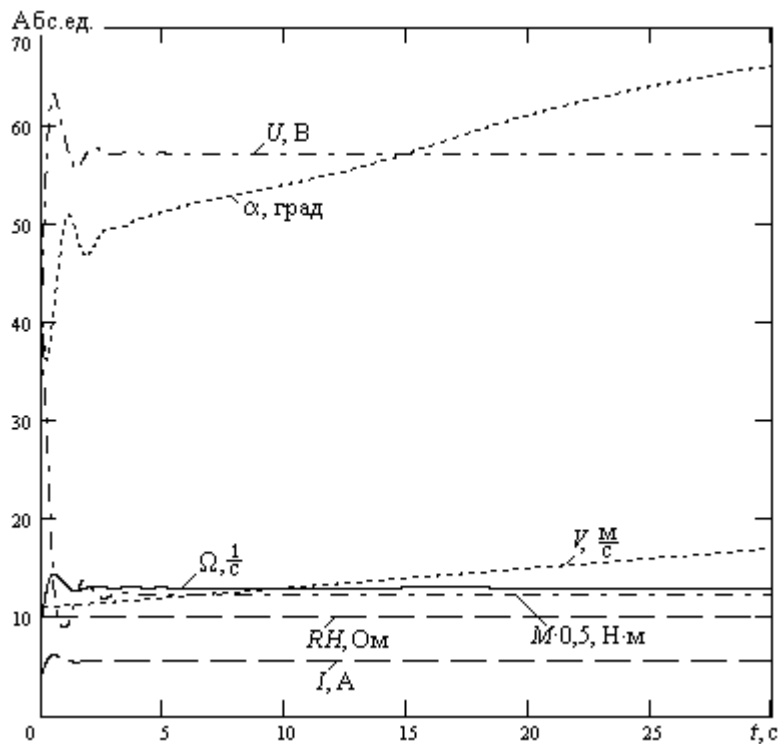


Рис.6.8. Работа ветроэлектростанции при увеличении скорости ветра

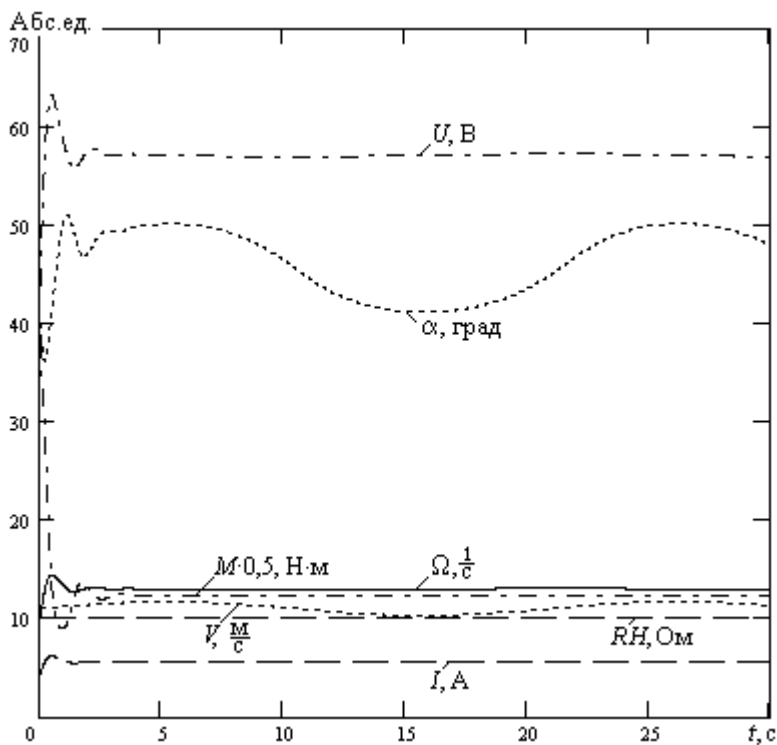


Рис.6.9. Работа ветроэлектростанции при изменяющейся скорости ветра

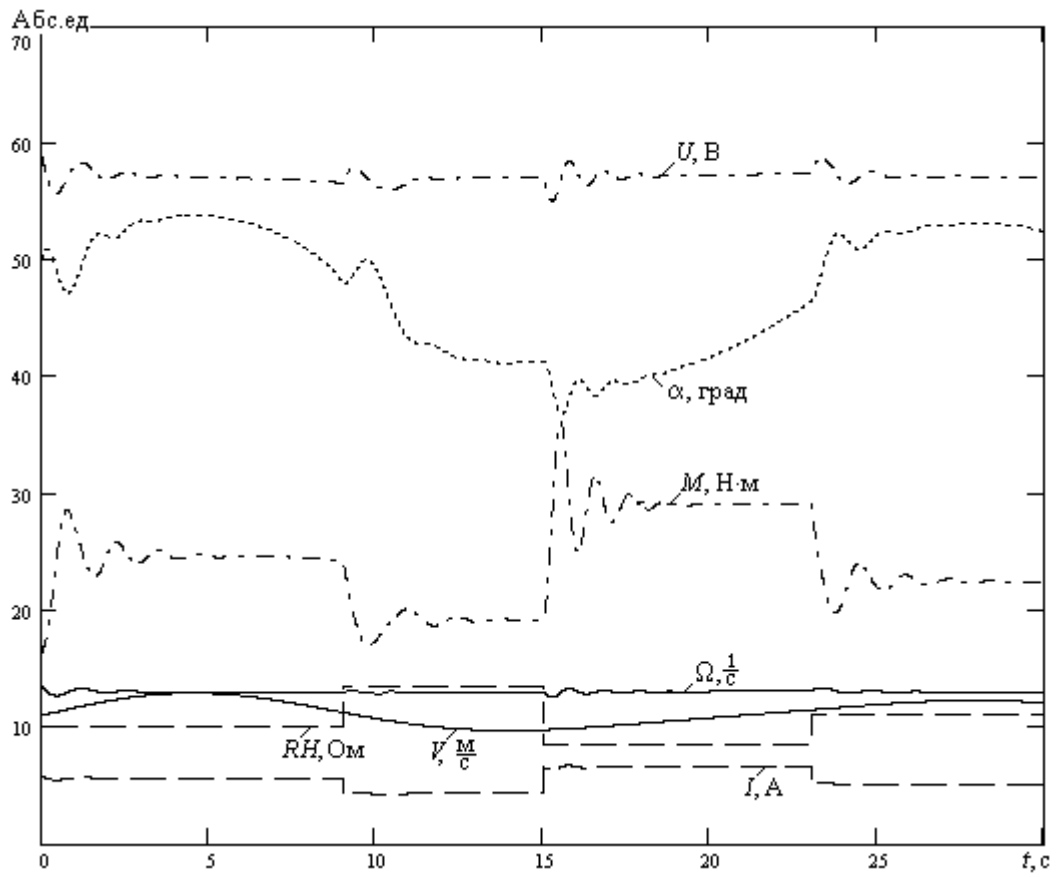


Рис.6.10. Работа ветроэлектростанции при одновременном изменении скорости ветра и сопротивления нагрузки

РАЗДЕЛ 7

Повышение качества управления ветроэлектростанцией на основе прогнозирования скорости ветра

7.1. Введение

Основу управления ветроэлектростанцией составляет принцип измерения скорости ветра по одному из двух вариантов. В первом осуществляется сравнение скорости вращения ветротурбины с заданным значением, При этом изменение угла установки лопастей выполняется пропорционально измеренному текущему рассогласованию скоростей вращения. В соответствии со вторым вариантом управление углом установки лопастей выполняется на основе непосредственного измерения скорости ветра при помощи анемометра.

Недостатком таких подходов к управлению ветроэлектрической установкой является запаздывание или преждевременный разворот лопастей на необходимый угол при изменении внешних условий. Это обусловлено такими причинами, как:

- установка лопастей на необходимый угол производится после измерения скорости вращения ветротурбины;
- наличие длительного переходного процесса разворота лопастей на необходимый угол;
- большая инерция вращения ветротурбины;
- изменение мощности потребляемой электроэнергии, вырабатываемой ветроэлектрической установкой.

Эти недостатки управления приводят к таким нежелательным последствиям, как недостаточная стабильность вырабатываемой электроэнергии, возникающие динамические удары на ветротурбину, снижение надежности управления электрооборудованием из-за частого включения – выключения.

Усовершенствование системы управления предлагается за счет упреждения измерения скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии. Это позволяет моделировать изменение скорости вращения ветротурбины на некотором будущем отрезке времени и своевременно подготавливать систему к внешним возмущающим воздействиям. Предлагается управлять ветротурбиной не на основе только скорости вращения ветротурбины, но и на основе математического моделирования скорости вращения и угла установки лопастей в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребителей электроэнергии. Прогнозирование скорости ветра будет выполняться на основе данных вблизи ветроэлектрической установки на небольших интервалах времени. Это даст возможности отслеживать быстрые изменения атмосферных и электроэнергетических процессов и осуществлять оперативное управление ветроэлектрической установкой.

Предлагаемый алгоритм состоит из таких шагов:

- сбор в течение небольшого промежутка времени информации о характеристиках ветра;
- краткосрочное прогнозирование значения скорости ветра на следующий интервал на основе замеренных данных за предыдущий период;
- моделирование скорости вращения на основе спрогнозированного значения скорости ветра и сравнение с заданным значением скорости вращения;
- моделирование требуемого значения угла установки лопастей на основе прогнозируемого уровня скорости ветра.

7. 2. Математическая модель скорости ветра

Математическую модель скорости ветра предлагается получить на основании формулы Тэйлора [7.1]. Эта формула представляет полином $P(t)$ от времени, значение которого в данной точке $t = a$ равно значению скорости ветра $V(t)$ в этой точке, и значения его производных также равны значениям

производных от скорости ветра. Этот многочлен близок к функции скорости ветра $P(t) \approx V(t)$ и имеет вид

$$P(t) = V(a) + \frac{t-a}{1!} \cdot \frac{dV}{dt} \Big|_{t=a} + \frac{(t-a)^2}{2!} \cdot \frac{d^2V}{dt^2} \Big|_{t=a} + \frac{(t-a)^3}{3!} \cdot \frac{d^3V}{dt^3} \Big|_{t=a} + \dots + R(t). \quad (7.1)$$

В этой формуле $R(t)$ является остаточным членом, и если он мал, то полином $P(t)$ дает приближенное представление функции $V(t)$ скорости ветра. Остаточный член имеет вид

$$R(t) = \frac{(t-a)^{n+1}}{(n+1)!} Q(t) = \frac{(t-a)^{n+1}}{(n+1)!} \cdot \frac{d^{n+1}V(t)}{dt^{n+1}} \Big|_{t=a} \cdot [a - \theta \cdot (t-a)],$$

где число θ находится в диапазоне от нуля до единицы. Так как при увеличении n знаменатель $R(t)$ увеличивается, то при этом остаточный член сильно уменьшается.

Для математической модели скорости ветра как сравнительно быстроменяющейся функции прогнозирующее значение $V(t)$ находим вблизи последней измеренной точки скорости ветра $V(a)$, т.е. $h = t - a$ мало. Поэтому в первом приближении формулы (7.1) слагаемые второго и выше порядков не будем учитывать:

$$P(t) \approx V(a) + \frac{t-a}{1!} \cdot \frac{dV}{dt} \Big|_{t=a}.$$

Таким образом, главную роль в прогнозе скорости ветра играет её производная по времени в последней точке a измеренной скорости ветра:

$$\frac{dV}{dt} \Big|_{t=a} = ? \text{ Выполним оценку этой производной.}$$

Производная функции – это предел отношения приращения функции ΔV к приращению аргумента $\Delta t = h$ при малом Δt :

$$\frac{dV}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t}; \quad \Delta V = V(t + \Delta t) - V(t).$$

Аппроксимация производной с помощью отношения конечных разностей имеет вид

$$\frac{dV}{dt} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

В зависимости от способа вычисления конечных разностей есть такие формулы для расчета производной в одной и той же точке:

– с помощью левых разностей

$$\Delta V_1 = V(t_1) - V(t_0); \Delta t = h; \frac{dV}{dt} \approx \frac{V(t_1) - V(t_0)}{h};$$

– с помощью правых разностей

$$\Delta V_1 = V(t_2) - V(t_1); \Delta t = h; \frac{dV}{dt} \approx \frac{V(t_2) - V(t_1)}{h};$$

– с помощью центральных разностей

$$\Delta V_1 = V(t_2) - V(t_0); \Delta t = 2h; \frac{dV}{dt} \approx \frac{V(t_2) - V(t_0)}{2h}.$$

Для большей точности подсчета производной $\left. \frac{dV}{dt} \right|_{t=a}$ будем применять

интерполяционный полином Лагранжа для четырех узлов [7.3]

$$\left. \frac{dV}{dt} \right|_{t=a} \approx \frac{1}{6h} (-11 \cdot V(t_0) + 18 \cdot V(t_1) - 9 \cdot V(t_2) + 2 \cdot V(t_3)).$$

Таким образом, по значениям скорости ветра в четырех последних точках измерения получаем оценку производной этой скорости, которая и представляет приращение этой скорости на следующем шаге h по времени

$$V(t) \approx V(t=a) + (t-a) \left. \frac{dV}{dt} \right|_{t=a}. \quad (7.2)$$

7.3. Система управления стабилизацией скорости вращения ветроэлектрической установки с использованием прогноза скорости ветра

Блок – схема системы изображена на рис.7.1. Анемометр A каждую секунду измеряет скорость ветра и непрерывно заносит эти значения в стэк. На выходе арифметического устройства $AУ$ на основании этих данных каждую секунду выполняются расчет производной скорости ветра. Далее по формуле (7.2) подсчитывается прогнозируемое значение скорости ветра в следующий

момент времени и подается на блок управления углом установки лопастей k_α . Этот блок начинает заранее поворачивать лопасти с учетом прогноза скорости ветра, что позволяет снизить влияние инерционности ветротурбины и механизма установки лопастей и повысить стабильность скорости вращения ветротурбины.

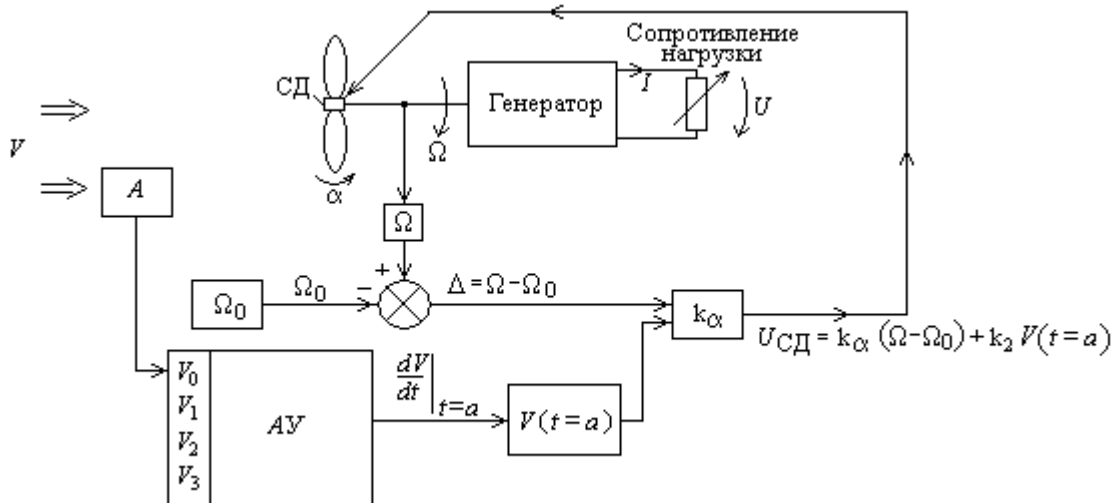


Рис.7.1. Блок – схема системы управления с прогнозом скорости ветра

На рис.7.2 показаны результаты моделирования в среде *MathCad* работы ветроэлектрической установки. Уравнение (13) теперь имеет вид

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot [\arctg k_1(\Omega - \Omega_0) + k_2 \cdot V(t + h)].$$

Большое второе слагаемое увеличивает скорость изменения угла установки лопастей и, следовательно, значение этого угла, что, согласно механической характеристике ветротурбины снижает вращающий момент и скорость её вращения. При отрицательном прогнозе изменения скорости ветра второе слагаемое уменьшает скорость изменения угла установки лопастей и, следовательно, значение угла, что увеличивает вращающий момент и поддерживает скорость вращения ветротурбины на заданном уровне.

При неизменной скорости ветра производная $\left. \frac{dV}{dt} \right|_{t=a} = 0$, и система только поддерживает скорость вращения ветротурбины вследствие изменения нагрузки генератора. Таким образом, система управления ветроэлектри-

ческой установкой работает по двум каналам: компенсирует изменение скорости ветра и стабилизирует скорость вращения ветротурбины при изменении нагрузки на электрический генератор.

На рис.7.2 показаны графики работы системы стабилизации скорости с прогнозом скорости ветра. Графики показывают, что система позволяет стабилизировать скорость вращения ветротурбины и выходное напряжение ветроэлектростанции.

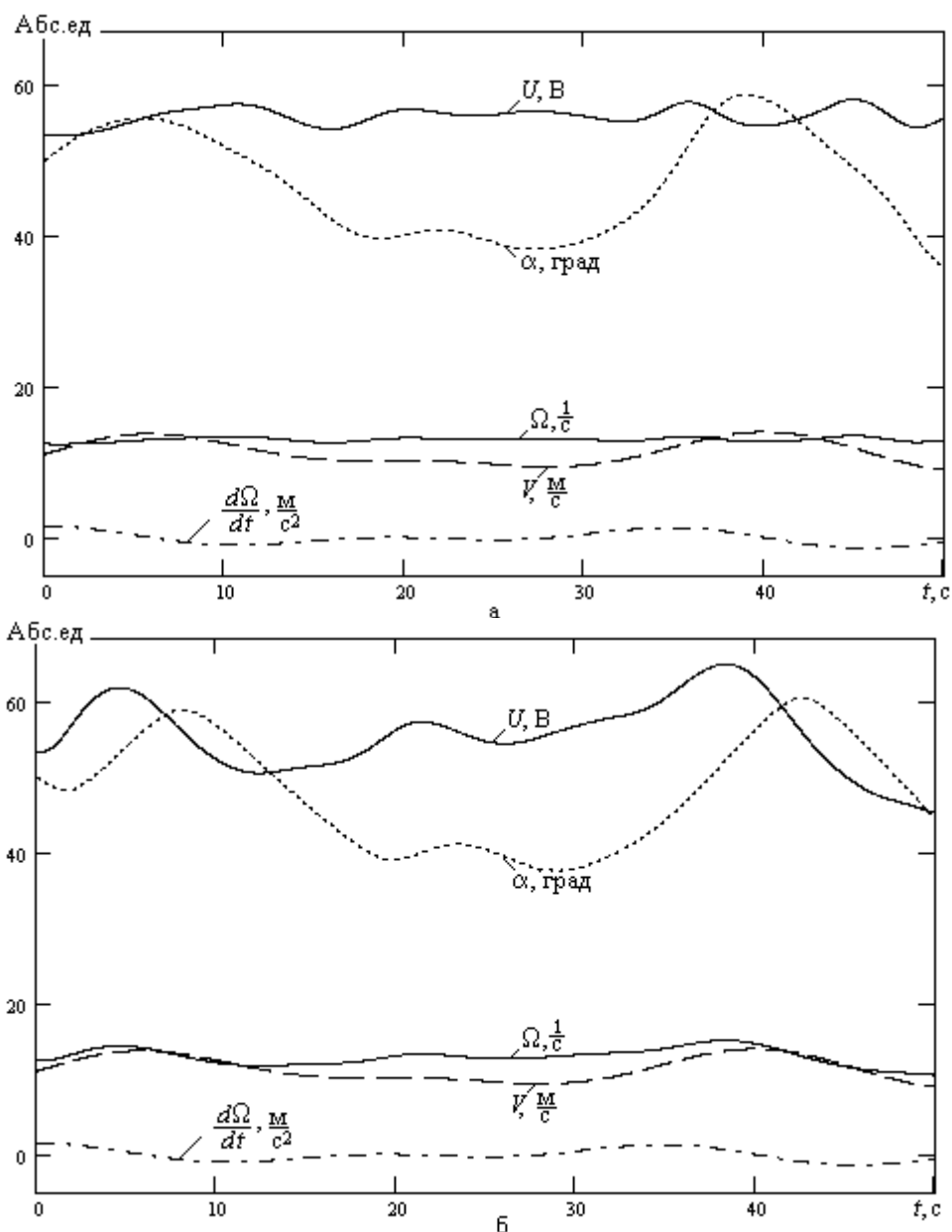


Рис.7.2. Работа системы стабилизации на основе прогноза скорости ветра:
 а) прогноз скорости ветра включен; б) прогноз выключен

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скорость Ω установившегося режима ВЭУ является неоднозначной функцией двух переменных: скорости ветра V и сопротивления нагрузки генератора R_H . Значения этой скорости образуют сложную складчатую поверхность решений в трехмерном пространстве.

На поверхности решений существуют области 1 и 3 устойчивых скоростей и область 2 неустойчивых скоростей: внутренняя часть складки поверхности решения соответствует неустойчивой области 2, а верхняя и нижняя наружные части – устойчивым областям 3 и 1.

Чувствительность скорости установившегося режима ВЭУ по переменным R_H и V в областях устойчивых решений 1 и 3 положительна и невелика. По мере приближения решения к границам областей устойчивости чувствительность существенно возрастает.

При плавном изменении скорости ветра V и сопротивления нагрузки генератора R_H могут происходить резкие скачки скорости вращения ВЭУ, когда точка решения переходит из одной устойчивой области решения в другую.

Для предотвращения этих скачков и для устойчивой работы ветроэлектростанции при различных скоростях ветра и нагрузках генератора предложена система управления, которая обеспечивает положение рабочей точки на желаемой устойчивой области 3 поверхности скоростей. Построение физической модели такой системы является перспективным направлением дальнейших исследований в этой области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика [Текст] / В.С.Кривцов, А.М.Олейников, А.И.Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун–т (ХАИ); Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун–т, 2004. – 519 с.
2. Лукутин Б.В. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций [Текст] / Б.В.Лукутин, Е.Б.Шандарова, А.И.Муравлев // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 2008. – № 6. – С. 63 – 66.
3. Олейников А.М. Моделирование динамики режима автономной ВЭУ малой мощности [Текст] / А.М.Олейников, Ю.В.Матвеев, Л.Н.Канов, Е.И.Зарицкая // Праці ІЕД НАНУ: Збірник наук. праць. – Вип. 24. – Київ, 2009. – С. 11 – 18.
4. Общая электротехника [Текст] / Под ред. В.С.Пантюшина. – М.: Высш. шк., 1970. – 568 с.
5. Мэтьюз Д.Г. Численные методы. Использование MatLab [Текст] / Д.Г.Мэтьюз, К.Д.Финк. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
6. Соколович Ю.А. Богданова А.С. Физика: Учебно – практический справочник. – Харьков: Веста, 2011. – 384 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А.1

Значения Ω решения основного уравнения в области 1

$V, \text{м/с}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_n, \text{Ом}$											
6		0,35	0,51	0,60	0,68	0,98	1,13	1,54	1,81	2,3	2,71
7		0,30	0,55	0,65	0,93	1,07	1,37	1,79	2,07	2,84	3,60
8		0,25	0,51	0,74	0,97	1,33	1,69	2,12	2,71	3,33	4,47
9		0,31	0,52	0,73	1,04	1,38	1,77	2,35	3,16	4,33	5,25
10		0,37	0,58	0,77	1,23	1,76	2,34	2,93	3,98	4,99	6,73
11		0,29	0,70	0,86	1,30	2,01	2,66	3,65	4,75	6,05	8,04
12		0,53	0,83	1,18	1,64	2,20	2,97	4,08	5,48	7,27	9,36
13		0,52	0,78	1,09	1,61	2,56	3,32	4,66	6,43	8,53	11,58
14		0,27	0,82	1,09	1,90	2,81	3,70	5,13	7,37	10,44	
15		0,59	1,0	1,51	2,08	2,96	4,46	6,16	8,74		
16		0,58	1,0	1,56	1,89	3,34	4,96	6,82	10,04		
17		0,84	1,10	1,61	2,54	3,56	5,10	8,12			
18	0,37	0,49	0,85	1,64	2,37	4,20	5,98	9,74			
19	0,39	0,56	0,83	1,67	2,98	4,32	6,89				
20	0,47	0,56	1,09	1,95	3,26	5,29	8,10				

Таблица А.2

Значения Ω решения основного уравнения в области 2

$V, \text{м/с}$	4	5	6	7	8	9	11	12
$R_n, \text{Ом}$								
8								32,46
9							27,30	27,04
10						24,88	24,44	24,60
11					22,64	22,26	22,29	22,60
12				21,82	20,45	20,52	20,67	20,71
13				18,76	18,97	19,23	19,01	18,64
14			19,34	17,63	17,80	17,84	17,60	14,74
15			16,45	16,53	16,65	16,39	13,70	
16		16,42	15,48	15,45	15,57	14,78		
17		14,60	14,45	14,64	14,45	12,50		
18		13,78	13,96	14,01	13,01			
19		12,94	13,22	13,25	11,07			
20	12,67	12,50	12,59	12,12				

Таблица А.3

Значения Ω решения основного уравнения в области 3

$V, \text{м/с}$	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_n, \text{Ом}$								
8							31,92	37,48
9						29,53	34,71	39,44
11					26,22	31,58	36,10	40,95
12					27,96	32,90	37,50	41,68
13				24,14	29,38	33,87	38,13	42,70
14				25,56	30,0	34,54	38,93	43,47
15			21,54	26,25	30,60	35,18	39,54	44,25
16			22,23	26,90	31,23	35,69	40,13	44,77
17		17,86	22,82	27,56	31,88	36,27	40,98	45,30
18		18,64	23,32	27,71	32,38	36,76	41,06	45,57
19		19,26	23,81	28,12	32,79	36,98	41,67	46,17
20	14,57	19,60	24,16	28,51	32,93	37,48	42,02	46,59

Приложение Б

Таблица Б.1

Значения Ω нижней границы области устойчивости решения

$V, \text{м/с}$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_n, \text{Ом}$										
6							18,89	19,44	20,23	21,17
7						16,33	16,59	17,93	18,94	20,0
8					14,32	15,04	16,0	17,0	17,84	18,93
9				12,82	13,71	14,08	15,14	16,15	17,10	18,02
10				11,82	12,63	13,66	14,57	15,52	16,38	17,21
11			10,57	11,12	12,0	13,13	14,0	14,96	15,73	16,63
12			10,0	10,70	11,54	12,60	13,55	14,30	15,22	16,0
13			9,50	10,32	11,36	12,22	13,14	14,0	14,74	15,52
14		8,32	9,05	10,0	11,07	11,98	12,90	13,65	14,38	15,0
15		7,87	8,64	9,63	10,70	11,60	12,40	13,14	13,67	14,32
16		7,46	8,52	9,40	10,40	11,24	12,13	12,83	13,35	13,90
17		7,45	8,22	9,15	10,18	10,95	11,64	12,35	12,92	13,32
18	6,63	7,05	8,20	9,05	10,0	10,83	11,45	12,05	12,52	12,82
19	6,30	7,03	7,98	8,89	9,73	10,46	11,18	11,60	12,07	12,38
20	5,74	6,87	7,93	8,72	9,50	10,27	10,84	11,35	11,54	11,51

Значения Ω верхней границы области устойчивости решения

$V, \text{м/с}$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_n, \text{Ом}$										
6							21,18	24,62	28,02	31,18
7						19,03	22,66	25,86	28,82	32,0
8					16,63	20,24	23,43	26,45	29,34	32,41
9				13,72	17,44	20,63	23,70	26,75	29,82	32,80
10				14,67	17,95	21,04	24,09	27,09	30,09	33,20
11			11,93	15,16	18,25	21,48	24,32	27,40	30,47	33,43
12			12,05	15,55	18,70	21,72	24,62	27,63	30,65	33,52
13			12,55	15,86	18,70	21,76	24,73	27,87	30,70	33,90
14		9,60	12,83	15,86	18,90	21,85	24,85	27,86	30,86	33,82
15		10,0	13,08	16,15	19,23	22,19	25,15	28,17	31,04	34,08
16		10,0	13,19	16,13	19,23	22,18	25,15	28,28	31,24	34,20
17		10,21	13,31	16,24	19,24	22,24	25,38	28,28	31,19	34,26
18	6,63	10,28	13,60	16,51	19,34	22,43	25,28	28,40	31,24	34,24
19	7,28	10,53	13,43	16,51	19,43	22,41	25,44	28,35	31,42	34,44
20	7,51	10,65	13,47	16,52	19,50	22,45	25,45	28,42	31,38	34,62