

На правах рукописи

Ван Бинь

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
АВТОНОМНОГО ВЕТРОАГРЕГАТА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2002

Работа выполнена на кафедре “Системы автоматического управления”
Санкт-Петербургского государственного технического университета

Научный руководитель – Кандидат технических наук, доцент
А.Н. Кривцов

Официальные оппоненты – Доктор технических наук, профессор
Б.В. Сидельников
Кандидат технических наук, доцент
В.Н. Филатов

Ведущая организация – Акционерное общество «Электросила»

Защита диссертации состоится « » _____ 2002г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д212.229.20 при Санкт-Петербургском
государственном техническом университете
по адресу: Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд.
151.

Почтовый адрес: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
СПбГТУ.

Автореферат разослан ____ февраля 2002г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.20

/А.Д.Курмашев/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время одним из перспективных направлений развития современной энергетики является использование природных возобновляемых энергоресурсов. Создание автономных энергосистем на базе возобновляемых источников энергии позволяет снизить имеющийся в мире дефицит энергии без ввода новых мощных электро- и теплостанций, прокладки линий электропередачи и теплотрасс, оздоровить экологическую обстановку в районах производства энергии. Для умеренных и северных климатических зон России и Китая с замерзающими водоемами и резким снижением солнечной активности в зимний период из возобновляемых источников энергии наиболее перспективно использование энергии ветра.

Расширение областей применения автономных ветроэнергетических установок (ВЭУ) возможно за счет повышения их эффективности и снижения себестоимости вырабатываемой электроэнергии. Поэтому проблема оптимизации автономных ВЭУ относится к числу важнейших направлений малой энергетики. Для решения этой проблемы необходимо создать высокоэкономичный генераторный комплекс (ГК) для автономных ВЭУ.

В автономных ветроагрегатах (ВА) возможно использование нескольких типов генераторов: синхронных, асинхронных, постоянного тока и др. Обычно большее распространение имеют синхронные генераторы (СГ). Асинхронные генераторы (АГ) применяются реже из-за сложности возбуждения и регулировки выходных параметров. В последние годы широко применяются АГ по схеме машины двойного питания (МДП), получившие в ряде научных публикаций наименование асинхронных синхронизированных генераторов (АСГ). Эти генераторы вместе с системой регулирования обеспечивают высокую стабилизацию частоты и амплитуды выходного напряжения при широком диапазоне изменения частоты вращения ветродвигателя (ВД) и мощности нагрузки.

Но практическое использование АСГ в ветроагрегатах наталкивается при их эксплуатации в районах с суровым климатом на их существенный недостаток – передача энергии на ротор АСГ осуществляется через контактные кольца. Опыт эксплуатации ветроагрегатов с АСГ в районах Красноярского края и Калмыкии показал, что в зимний период наблюдались частые отказы генераторов, связанные с обмерзанием контактных колец.

В работах некоторых авторов предлагается использовать АСГ с бесконтактным возбудителем, что позволяет устранить контактные кольца. В качестве возбудителя предложено использовать высокочастотные многополюсные обращенные синхронные машины либо индукторные машины. Но опубликованных работ, посвященных расчету параметров и исследованию режимов работы системы электрооборудования ВЭУ с использованием бесконтактного асинхронного синхронизированного генератора (БАСГ), нами обнаружено не было.

Нами предложен вариант БАСГ, обладающий высокими энергетическими показателями, полной бесконтактностью и инвариантностью выходной частоты генератора при изменении частоты вращения ветродвигателя в широких пределах. Обоснованию применения этой системы электрооборудования и исследованию режимов ее работы посвящена данная работа.

Цель работы.

Разработка системы электрооборудования для автономного ветроагрегата на базе бесконтактного асинхронного синхронизированного генератора и исследование режимов работы предложенной системы для разработки регуляторов, обеспечивающих стабилизацию выходного напряжения.

Задачи исследования.

1. Разработка методики выбора ветроагрегата по мощности для различных условий эксплуатации и различных значений мощности

потребителя с использованием вероятностных моделей распределения скорости ветра.

2.Обоснование целесообразности применения предложенного технического решения системы электрооборудования ВЭУ в сравнении с традиционными вариантами.

3.Разработка статической модели комплекса "ветродвигатель–БАСГ–система стабилизации напряжения" и создание методики расчета статических характеристик этого комплекса.

4.Разработка полной динамической модели комплекса "ветродвигатель–БАСГ–система стабилизации напряжения" и создание методики расчета динамических режимов этого комплекса.

5.Разработка регулятора на базе полной динамической модели комплекса, обеспечивающего требуемые динамические показатели качества выходного напряжения ВЭУ.

Методы исследования.

Для разработки методики выбора автономного ветроагрегата использованы методы теории вероятности. Для исследования статических режимов работы ВЭУ с БАСГ использованы методы математического моделирования обобщенной электрической машины. Для исследования динамических режимов работы системы использованы методы компьютерного моделирования с применением пакета MATLAB. Достоверность аналитических исследований также проверялась путем компьютерного моделирования.

Научная новизна работы.

Разработана методика выбора ветроагрегата по мощности для различных условий эксплуатации и различных значений мощности потребителя с использованием вероятностных моделей распределения скорости ветра.

Разработана статическая модель комплекса "ветродвигатель–БАСГ–система стабилизации напряжения" и создана методика расчета статических характеристик этого комплекса.

Разработана динамическая модель комплекса "ветродвигатель–БАСГ–система стабилизации напряжения" и создана методика расчета динамических режимов этого комплекса.

Разработана методика синтеза регуляторов, обеспечивающих требуемые динамические показатели системы.

Практическая ценность работы.

Разработана новая система электрооборудования автономного ветроагрегата, повысившая экономическую эффективность ветроагрегата за счет повышения к.п.д. электрической части.

Уточнена методика расчета вырабатываемой энергии ветроагрегатом и разработана методика выбора ветроагрегата.

Разработаны методики и программы расчета, позволяющие исследовать статические и динамические режимы работы автономной ВЭУ с новой системой электрооборудования и определить параметры регулятора для стабилизации выходного напряжения.

Апробация работы.

Основные научные и практические результаты работы докладывались на межвузовских научных конференциях СПбГТУ «Неделя науки - 99», «Неделя науки - 2000», «Неделя науки - 2001» и на научном семинаре кафедры "Системы автоматического управления" СПбГТУ.

Объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 67 наименований и трех приложений.

Работы содержит 149 страниц, включая 49 рисунков и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы цели диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе производится обзор развития ветроэнергетики в мире. Показано, что ветроэнергетика стремительно развивается. В ряде стран (США, Германия, Дания, Индия и др.) намечено довести выработку электроэнергии ветроагрегатом до 20% от национального производства к 2020г.

Показано, что разработка автономных ВЭУ является весьма актуальной для решения проблемы электроснабжения отдаленных и изолированных районов России и Китая, у которых нет централизованного электроснабжения.

Для автономных ВЭУ важная проблема заключается в создании высокоэкономичных генераторных комплексов, преобразующих энергию ветродвигателя в электрическую. Это связано с решением технической задачи обеспечения постоянных значений амплитуды и частоты генерируемого напряжения при переменных, в общем случае, скорости вращения ветродвигателя, а также величине и характере нагрузки.

Для создания генераторного комплекса в диссертационной работе был предложен модифицированный вариант бесконтактного асинхронного синхронизированного генератора. Он обеспечивает постоянство частоты на выходе генератора без использования регулятора частоты. Этот вариант будет подробно исследован в работе.

Сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава состоит из двух частей. Первая часть посвящена расчету статических характеристик ветродвигателя.

Ветродвигатель является сложным нелинейным звеном с несколькими собственными регуляторами. К ним могут относиться регулятор стабилизации мощности, центробежный и аэродинамический регулятор

скорости вращения ВД. Рассмотрены принципы построения механического регулятора ВД, обеспечивающего статическую устойчивость и необходимые пусковые свойства.

Основой расчета механических характеристик являются экспериментальные аэродинамические характеристики, полученные продувкой модели ВК в аэродинамической трубе. Методика основана на известных уравнениях академика Н.Е. Жуковского и проф. Г.Х. Сабинина. Но результаты расчета представлены в форме, неудобной для использования в полной модели ветроагрегата. Нами преобразованы расчетные выражения, что позволило получить расчетные характеристики в виде зависимости скорости вращения ВД от момента для разных скоростей ветра (рис.1). Т.е. характеристики ВА построены в координатах, являющихся традиционными для систем электропривода. Расчетные характеристики напоминают характеристики АД, но отличаются относительно малым пусковым моментом.

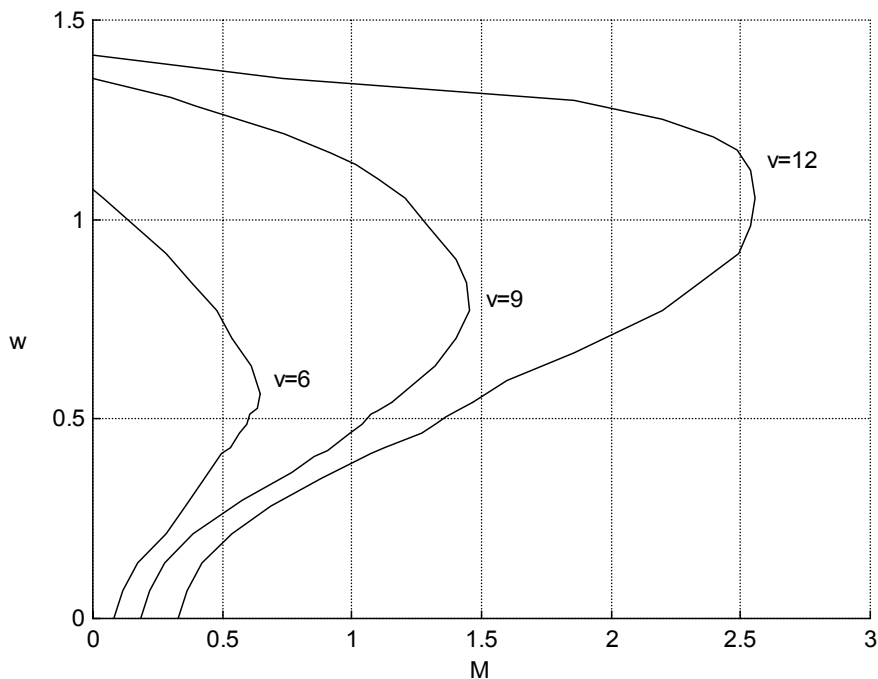


Рис.1. Механические характеристики ВЭУ-15 при $v=6, 9, 12$ м/с.

Вторая часть главы посвящена разработке методики выбора автономного ветроагрегата для разных потребителей.

При выборе ветроагрегата любым потребителям необходимо определить требуемую мощность ветроустановки. Этот параметр зависит от многих факторов: среднегодовой скорости ветра, степени закрытости местности, мощности потребителя и системы электрооборудования ВА.

Обычно расчет среднегодовой мощности, вырабатываемой ВА, ведется по формуле:

$$P_{\text{ср}} = \begin{cases} 0 & v < v_0 \\ k \cdot v^2 (v - v_0) & v_0 < v < v_p \\ P_p & v > v_p \end{cases} \quad (1)$$

где: v_0 – минимальная скорость ветра для работы ВА; v_p – расчетная скорость ветра; P_p – расчетная мощность ВА.

Зная среднюю скорость ветра по сезонам, рассчитывается средняя выработка энергии в каждом сезоне и определяется среднегодовая мощность, по которой выбирается ветроагрегат. Но в данной методике имеются существенные погрешности. Если просчитать выработку энергии с учетом вероятностного закона распределения скорости ветра, то результаты расчета могут отличаться от результатов по приближенной методике на 15-20%.

Поэтому нами разработана методика расчета выработки энергии на базе вероятностного распределения скорости ветра по закону Вейбулла.

$$f(v) = \alpha \lambda v^{\alpha-1} e^{-\lambda v^\alpha} \quad (2)$$

Средняя вырабатываемая мощность ветроагрегатом определяется как:

$$P_{\text{ср}} = \int_{v_0}^{v_p} k v^2 (v - v_0) \cdot f(v) dv + P_p \cdot \int_{v_p}^{\infty} f(v) dv \quad (3)$$

Предложенная методика позволяет более строго рассчитать среднюю мощность ВА для данных условий эксплуатации. Используя полученные формулы, можно рассчитать среднюю вырабатываемую мощность для разных ветроагрегатов, и для ряда значений среднегодовой скорости ветра. Тогда при заданных исходных данных средней мощности нагрузки $P_{\text{нср}}$, средней скорости ветра $v_{\text{ср}}$, и коэффициента преобразования энергии в системе

электрооборудования $K_{\text{д}}$ можно рассчитать требуемую расчетную мощность ветроагрегата и выбрать его из существующих типов агрегатов.

В третьей главе рассмотрены вопросы выбора варианта электрооборудования для автономных ВА и разработки методики расчета статических характеристик систем.

Проведено сравнение различных систем электрооборудования для автономных ветроагрегатов. Рассмотрены схемы с применением СГ, АГ, АСГ и др. Установлено, что целесообразно использовать бесконтактный асинхронный синхронизированный генератор для работы ВА в районах с суровым климатом. Схема БАСГ представлена на рис.2.

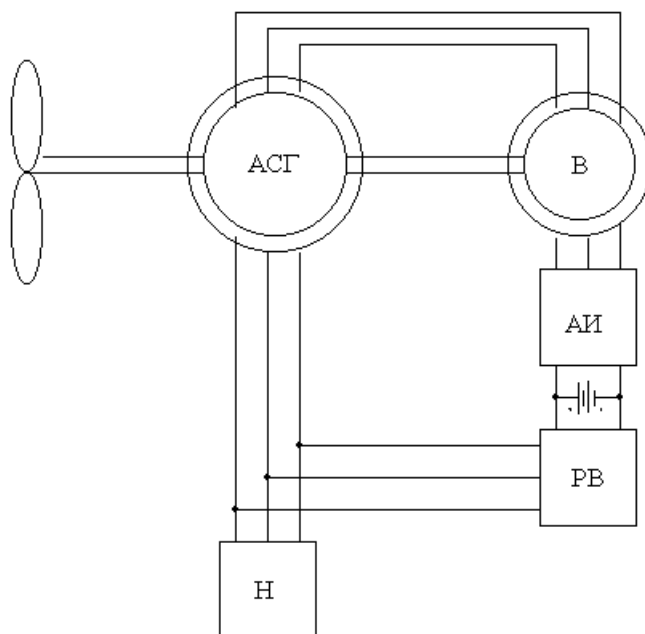


Рис.2 Схема бесконтактного синхронизированного генератора.

На рисунке приняты обозначения: В – возбuditель; АИ – автономный инвертор; РВ – регулируемый выпрямитель; Н – нагрузка.

В качестве основной машины используется асинхронная машина с фазным ротором, а в качестве возбuditеля используется такая же асинхронная машина с фазным ротором с меньшей мощностью и той же полюсностью. Роторы основной машины и возбuditеля жестко соединены валом и имеют прямую электрическую связь с устранением контактных колец обеих машин.

Из принципа синхронности вращения полей ротора и статора в установившемся режиме можно получить следующие соотношения:

$$\text{для АСГ: } \frac{f_1}{p_1} = \frac{f_2}{p_1} + \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\text{для возбуждателя: } \frac{f_b}{p_2} = \frac{f_2}{p_2} + \frac{\omega}{2\pi}$$

где: f_1 – частота выходного напряжения; f_2 – частота напряжения ротора генератора; f_b – частота напряжения возбуждения; ω – скорость вращения ротора генератора (рад/с); p_1 и p_2 – соответствующие числа пар полюсов АСГ и возбуждателя.

Тогда получим закон регулирования f_b для обеспечения постоянства выходной частоты f_1 .

$$f_b = f_1 - \frac{\omega}{2\pi}(p_1 - p_2) \quad (4)$$

В предложенном нами варианте БАСГ в качестве возбуждателя используется маломощная машина при равенстве чисел пар полюсов генератора и возбуждателя. Из уравнений (4) следует, что предлагаемая система обеспечивает неизменность выходной частоты f_1 при любом изменении скорости вращения ветродвигателя, т.е. обеспечена полная инвариантность выходной частоты от скорости ветра.

Для получения постоянного напряжения на выходе нужно регулировать амплитуду напряжения возбуждения. Для расчета закона регулирования напряжения были составлены уравнения асинхронной машины в установившемся режиме.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= j\omega_1 L_{\sigma 1} I_1 + j\omega_1 L_m I_1 + j\omega_1 L_m I_2 + r_1 I_1 \\ U_2 &= j(\omega_1 - \omega) L_{\sigma 2} I_2 + j(\omega_1 - \omega) L_m I_2 + j(\omega_1 - \omega) L_m I_1 + r_2 I_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где: U_1, U_2 – векторы напряжения статора и ротора; I_1, I_2 – векторы тока статора и ротора; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; L_m – взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора. ω_1 – частота вращения поля статора.

Используя обозначение скольжения $s=(\omega_1 - \omega)/\omega_1$, получим уравнение, связывающее параметров U_1, U_2, I_1 и s :

$$U_1 = \frac{U_2}{s} \frac{j\omega_1 L_m}{j\omega_1(L_{\sigma 2} + L_m) + r_2/s} + I_1[r_1 + j\omega_1 L_{\sigma 1} + \frac{j\omega_1 L_m(j\omega_1 L_{\sigma 2} + r_2/s)}{j\omega_1(L_{\sigma 2} + L_m) + r_2/s}] \quad (6)$$

Аналогично производим расчеты для возбудителя. После расчета получим выражение для напряжения возбуждения U_B :

$$U_B = \frac{r_{1B} + j(X_{1B} + X_{mB})}{jX_{mB}} \left(\frac{U_{2B}}{s} - jX_{2B}I_{2B} - jX_{mB}I_{2B} - \frac{r_{2B}I_{2B}}{s} \right) + jX_{mB}I_{2B} \quad (7)$$

На рис.3. представлены статические зависимости напряжения возбуждения от скорости вращения генератора для различных токов нагрузки.

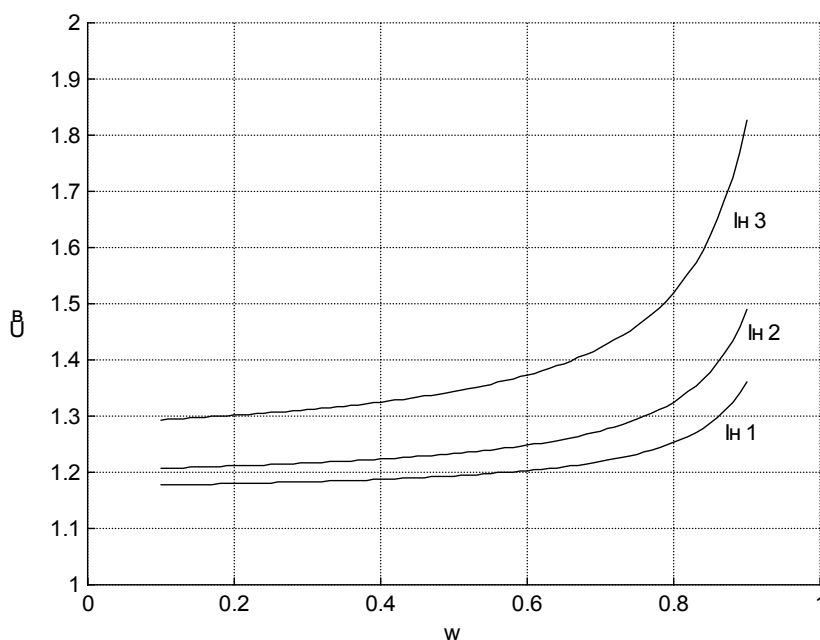


Рис.3. Закон регулирования напряжения возбуждения при различных токах нагрузки.

Взаимосвязь этих параметров представляет собой семейство существенно нелинейных характеристик, что доказывает необходимость применения адаптивного регулятора при изменении режимов работы ВА.

Данное семейство характеристик получено для линейной модели системы. Но и генератор, и возбудитель описывается существенно нелинейными уравнениями. Была разработана модель системы с учетом

нелинейности генератора и возбудителя. В результате расчета по этой модели получены характеристики, показанные на рис.4.

Из рисунка видно, что отклонение результатов при учете насыщения и без учета насыщения больше 30%. Поэтому для расчета статического коэффициента усиления регулятора напряжения необходимо использовать закон регулирования напряжения возбуждения, рассчитанный на базе нелинейной модели системы.

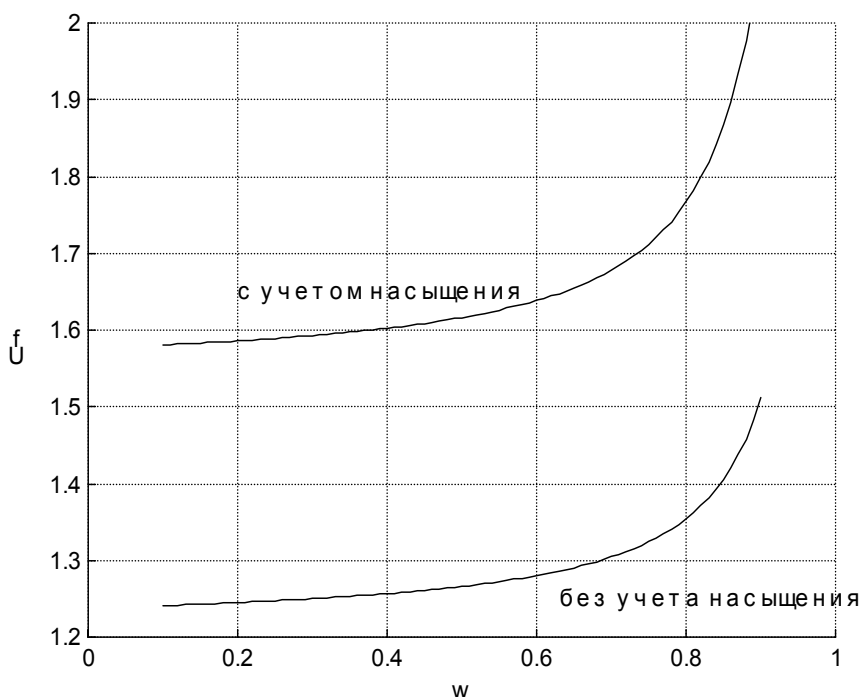


Рис.4. Сравнение напряжения возбуждения при учете насыщения и без учета насыщения.

На основании анализа статических режимов работы доказана необходимость учета основных нелинейностей типа явления насыщения в стали при расчете параметров регулятора, обеспечивающего стабилизацию выходного напряжения в статическом режиме.

Четвертая глава посвящена разработке полной динамической модели ветроагрегата и разработке регулятора для стабилизации выходного напряжения.

В соответствии с требованием ГОСТ 13109-97, любой автономный генератор должен отвечать определенным требованиям как по статическими,

так по динамическими показателями выходного напряжения. Выходное напряжение ВА меняется в широких пределах при изменении нагрузки и изменении скорости ветра. Следовательно, необходимо построить регулятор для системы ветродвигатель-генератор, обеспечивающий требуемую стабильность выходного напряжения. При синтезе этого регулятора необходимо учитывать полную динамическую модель системы.

Была разработана динамическая модель ВД, которая описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений.

$$\left. \begin{aligned} J_B \frac{d\omega}{dt} &= M_B - M_G \\ J_L \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= M_a + M_{цб} - M_{пр} - M_{тр} \\ M_B &= \pi\rho R^3 \frac{v^2}{2} \overline{M_B}(Z, \varphi) \\ M_a &= \pi\rho R^3 \frac{v^2}{2} \overline{M_a}(Z, \varphi) \\ M_{цб} &= J_L \omega^2 \frac{\sin 2(\varphi - \varphi_0)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где: ω – частота вращения ветродвигателя; φ – угол установки лопасти ветроколеса; M_B – движущий момент ВД; M_G – момент сопротивления, создаваемый генератором; J_B – момент инерции ВД; J_L – момент инерции лопасти; $M_{цб}$ – момент центробежных сил грузов; M_a – аэродинамический момент; $M_{пр}$ – момент, создаваемый пружинами; $M_{тр}$ – момент трения; R – радиус ветроколеса; v – скорость ветра; Z – число модулей.

Уравнения для M_B , M_a и $M_{цб}$ являются существенно нелинейными, к тому же некоторые из них задаются в виде экспериментальных графиков. Поэтому решение уравнений может быть получено только методом численного интегрирования.

Используя метод малых колебаний, получим уравнения линейного приближения в вариациях соответствующих координат:

$$\left. \begin{aligned} J_B \Delta\omega' + m_1 \Delta\omega + m_2 \Delta\varphi &= m_3 \Delta v - \Delta M_G \\ J_L \Delta\varphi'' + n_1 \Delta\varphi + n_2 \Delta\omega &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где: m_1, m_2, m_3, n_1, n_2 – соответствующие коэффициенты уравнений.

После решения системы дифференциальных уравнений был рассчитан переходный процесс изменения частоты вращения ВД, вызванный изменением скорости ветра (рис.5).

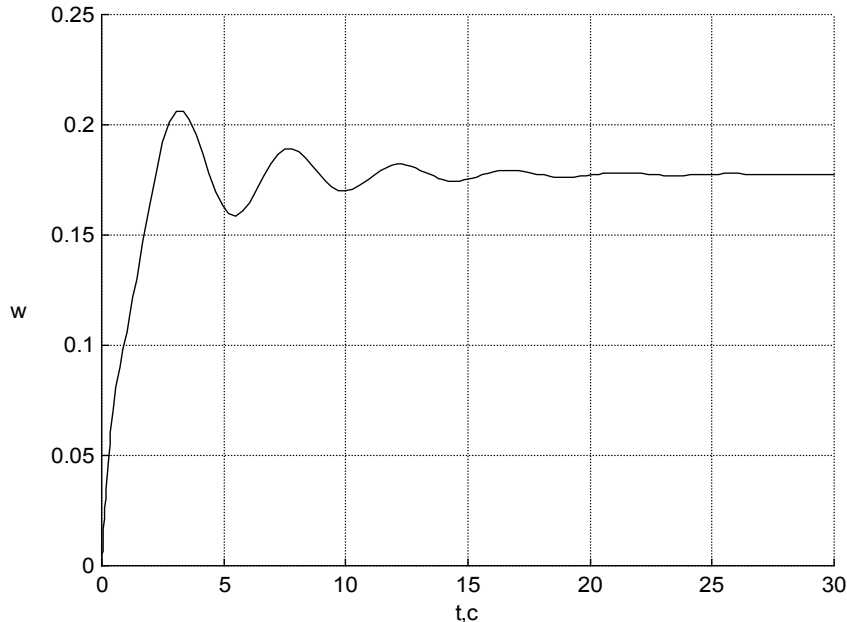


Рис.5. Переходный процесс приращению частоты вращения ВД.

Из рисунка видно, что ветродвигатель обладает существенной инерционностью, и его эквивалентная механическая постоянная времени измеряется секундами. В то же время электрические постоянные времени генератора измеряются сотыми и даже тысячными долями секунды. Поэтому можно утверждать, что в течение переходного процесса в генераторе при изменении задающего сигнала, определяющего уровень выходного напряжения, либо тока нагрузки частота вращения ротора генератора почти не изменится. Это означает, что при разработке регулятора напряжения достаточно рассмотреть модель генераторного комплекса, полагая режим работы ВД установившимся и работающим с постоянной частотой вращения при данной скорости ветра.

Динамическая модель генератора может быть написана следующими дифференциальными уравнениями в проекциях на оси ортогональной системы координат x, y , вращающейся с частотой тока статора ω_1 :

$$\left. \begin{aligned} -U_{1x} &= R_1 I_{1x} + \frac{d\psi_{1x}}{dt} - \omega_1 \psi_{1y} \\ -U_{1y} &= R_1 I_{1y} + \frac{d\psi_{1y}}{dt} + \omega_1 \psi_{1x} \\ U_{2x} &= R_2 I_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - \omega_2 \psi_{2y} \\ U_{2y} &= R_2 I_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + \omega_2 \psi_{2x} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где: $U_{1x}, U_{1y}, U_{2x}, U_{2y}$ – проекции векторных напряжений статора и ротора АСГ на соответствующие оси координат; $I_{1x}, I_{1y}, I_{2x}, I_{2y}$ – проекции векторных токов статора и ротора; $\psi_{1x}, \psi_{1y}, \psi_{2x}, \psi_{2y}$ – проекции векторных потокосцеплений статора и ротора; ω_2 – частота тока ротора; ω – скорость вращения ротора.

Существуют разные подходы при разработке регулятора. Так как в модели генератора имеется параметр ω_2 , зависящий от скорости вращения ветродвигателя, изменяющейся в широких пределах, то коэффициенты передачи генератора и возбuditеля меняются при изменении скорости ветра и нагрузки. Это требует изменять параметры регулятора для различных частот вращения ветродвигателя, т.е. регулятор должен обладать свойством параметрической адаптации.

Поэтому мы предлагаем осуществить параметрическую адаптацию с нелинейным программируемым регулятором, который реализуется в виде цифрового регулятора. Параметры регулятора меняются при изменении скорости ветра и величины нагрузки.

Основными допущениями при синтезе регулятора являются предположения о постоянстве параметров электрической машины. Модель системы линеаризуется, что позволяет для линейной модели выбрать структуру регулятора с помощью стандартных методов синтеза линейных систем. Используя метод логарифмических характеристик, была синтезирована структура регулятора:

$$W_p(p) = k_p \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$$

При известной структуре регулятора на базе полной модели системы генераторного комплекса были выполнены расчеты динамических провалов выходного напряжения при приеме нагрузки. Для каждого значения скорости вращения ветродвигателя найдены оптимальные значения параметров регулятора, обеспечивающие минимум динамического провала выходного напряжения. Эта программа была разработана в среде MATLAB и позволила настроить параметры регулятора для обеспечения требуемых качественных показателей выходного напряжения при приеме нагрузки для различных скоростей ветра. Зависимости параметров регулятора от скорости вращения генератора занесены в табличной форме в память управляющего микроконтроллера. Это позволяет избежать синтеза параметров регулятора в реальном масштабе времени, что потребовало бы применения дорогостоящих быстродействующих контроллеров.

Численные значения параметров регулятора в функции от скольжения генератора приведены в табл.1.

Таблица 1

s	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
k_p	8	7,5	5	3,6	3	2,8	2,6	2,5	2,5
T_2 , с	18	15	10	8	5	4.5	4.2	4	4

На рис.6 представлен переходный процесс выходного напряжения при приеме 100% нагрузки. Расчет показал, что при ступенчатом приеме нагрузки динамический провал выходного напряжения не превышает 15-20% от установившегося значения, что соответствует требованию ГОСТ 13109-97 к источникам автономного электроснабжения

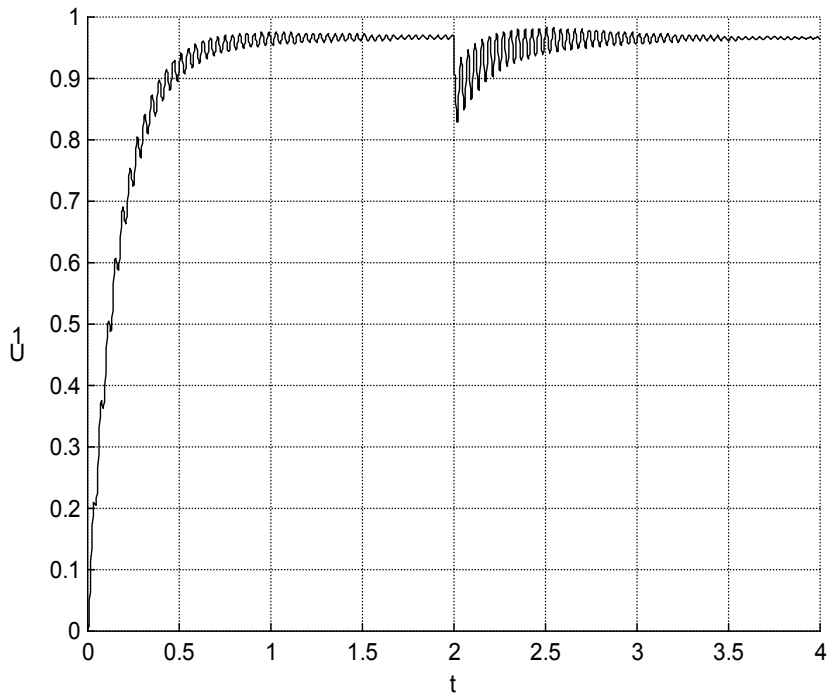


Рис.6 Переходный процесс выходного напряжения при приеме нагрузки.

Данные расчеты выполнены для линеаризованной модели генератора. Изменение нагрузки, особенно при повышенных токах возбуждения ведет к насыщению машины. Для учета насыщения стали основного генератора и возбудителя применим функцию Ланжевена для аппроксимации кривой намагничивания:

$$\psi_m = k \cdot \left(\operatorname{cth}(a \cdot I_m) - \frac{1}{a \cdot I_m} \right)$$

Осуществлена доработка программы моделирования с учетом указанной нелинейности и проведен расчет переходного процесса при приеме нагрузки. Результаты расчета показали, что при работе генератора в насыщенном режиме разработанный нелинейный программируемый регулятор также обеспечивает требуемые показатели качества выходного напряжения при приеме нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На основании обзора состояния ветроэнергетики в мире сделан вывод об актуальности применения автономных ВЭУ для районов России и Китая, не имеющих централизованного электроснабжения и сформулированы основные научные задачи, требующие решения для разработки более совершенных автономных ВЭУ.

2. Рассмотрены принципы построения ВЭУ и способы, обеспечивающие их статическую устойчивость и необходимые пусковые свойства ветродвигателя. На базе аэродинамической теории Н.Е. Жуковского выполнены расчеты статических характеристик ветроагрегата.

3. Разработана методика выбора ветроагрегата по мощности для различных условий эксплуатации и различных значений мощности потребителя на базе вероятностного распределения скорости ветра. В основу расчета выработки электроэнергии ветроагрегатом положено распределение скорости ветра по закону Вейбулла, принятое в последние годы в метеорологии.

4. На основании проведенного анализа систем электрооборудования автономных ветроагрегатов автором работы совместно с научным руководителем А.Н. Кривцовым предложена система электрооборудования для автономных ВЭУ, состоящая из генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором и возбuditеля на базе аналогичной менее мощной машины. За счет прямой электрической связи роторов возбuditеля и генератора система контактных колец на роторах машин устранена и системе "генератор–возбuditель" обеспечена полная бесконтактность. Предложенная система электрооборудования ВЭУ является инвариантной по частоте при переменной частоте вращения ветродвигателя.

5. Разработана математическая модель, описывающая статические режимы работы системы "ветродвигатель–БАСГ–регулятор". Разработана

методика, устанавливающая взаимосвязь скорости ветра, нагрузки генератора и требуемого напряжения на статоре возбудителя. Взаимосвязь этих параметров представляет собой семейство существенно нелинейных характеристик, что доказывает необходимость применения адаптивного регулятора при изменении режимов работы ВЭУ.

6. Предложена полная функциональная схема системы "ветродвигатель–БАСГ–регулятор". Разработана динамическая модель ветроагрегата, включающая в себя нелинейную модель ветродвигателя, нелинейную модель БАСГ и систему регулирования выходного напряжения

7. Сделан вывод о возможности разделения модели ветроагрегата на две слабо связанных между собой системы после анализа переходных процессов в ветродвигателе и в генераторе.

8. На основании сравнительного анализа методов моделирования был выбран пакет MATLAB для исследования динамических режимов работы системы. Синтезирована структура регулятора и уточнены параметры регулятора на основании компьютерного моделирования системы. Показано, что использование предложенного нелинейного программируемого регулятора обеспечивает нестабильность выходного напряжения ВЭУ менее 5% при приеме нагрузки вплоть до номинальной.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Ван Бинь, Кривцов А.Н. Сравнение выработки энергии автономной ВЭУ при различных типах генераторов. // Материалы межвузовской научной конференции. «Неделя науки - 99». – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – С. 104-106.

2. Ван Бинь, Кривцов А.Н. Эффективность применения автономной ВЭУ при различных условиях эксплуатации. // Материалы межвузовской научной конференции. «Неделя науки - 2000». – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 128-130.