

УДК 621.311.24

**ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ВЭУ С АГДП, СОЗДАННОЙ
В MATLAB SIMULINK НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЭУ В МЭИ**

Д.М. Ильин, А.Г. Васьков, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков

Целью исследования является моделирование аварийных режимов на ветроэнергетической установке (ВЭУ) с асинхронным генератором с двойным питанием (АГДП) и анализ поведения системы управления ВЭУ с АДГП в этих режимах. Для верификации разрабатываемых математических моделей, с помощью которых предполагается усовершенствовать системы управления в дальнейших исследованиях, авторы провели исследование на физической модели на базе лабораторных стендов НИУ МЭИ.

Ключевые слова: ВЭУ с АГДП; ПСР; ПСС; шунтирующее сопротивление цепи ротора.

**МОСКВА ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ИНСТИТУТУНДА ШАМАЛ ЭНЕРГИЯСЫ КУРУЛМАСЫНЫН
ФИЗИКАЛЫК МОДЕЛИНДЕ MATLAB SIMULINK БОЮНЧА ТҮЗҮЛГӨН КОШ
АЗЫКТАНДЫРГЫЧЫ МЕНЕН АСИНХРОНДУК ГЕНЕРАТОРУ БАР ШАМАЛ ЭНЕРГИЯСЫ
КУРУЛМАСЫНЫН ЭСЭПТИК МОДЕЛИН СЫНООДОН ӨТКӨРҮҮ**

Д.М. Ильин, А.Г. Васьков, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков

Изилдөөнүн максаты кош азыктандыргычы менен асинхрондук генератору бар шамал энергиясы курулмасында авариялык режимдерди моделдөө жана бул режимдерде кош азыктандыргычы менен асинхрондук генератору бар шамал энергиясы курулмасынын башкаруу системасынын кыймыл-аракетине талдоо жүргүзүү болуп эсептелет. Иштелип чыккан математикалык моделдерди сыноо үчүн авторлор Москва энергетикалык институтунун лабораториялык стенддеринин базасында физикалык моделге изилдөө жүргүзүшкөн. Иштелип чыккан математикалык моделдердин жардамы менен мындан аркы изилдөөлөрдө башкаруу системасын өркүндөтүү божомолдонот.

Түйүндүү сөздөр: кош азыктандыргычы менен асинхрондук генератору бар шамал энергиясы курулмасы; куткаруу-изилдөө иштери; куткаруу-изилдөө кызматы; ротордун чынжырынын каршылыгы.

**VERIFICATION OF THE DFIG WIND TURBINE MODEL IMPLEMENTED
IN MATLAB SIMULINK ON MPEI LABORATORY EQUIPMENT PHYSICAL MODEL**

D.M. Ilyin, A.G. Vaskov, T.A. Shestopalova, V.A. Yurikov

The purpose of the survey is to simulate fault conditions on wind turbine equipped with double-fed induction machine (DFIG) and to analyze the behavior of WT's control system. For verification of the developed mathematical models, by means of which it is supposed to improve control system performance in future researches, authors conducted a research on physical model based on laboratory equipment in MPEI.

Keywords: DFIG WT; RSC; GSC; crowbar.

В данной статье производится верификация математической модели ветроэнергетической установки (ВЭУ) с асинхронным генератором с двойным питанием (АГДП). Проведено срав-

нение ее поведения в нормальном и аварийном режимах с аналогичными сценариями, смоделированными на физической модели ВЭУ с АДГП на лабораторном стенде МЭИ.

В программной среде Matlab Simulink возможно построение систем управления и настройки их параметров для получения наилучшей производительности системы (по критериям обеспечения устойчивости ВЭУ и обеспечения поддержки внешней энергосистемы (ЭС) во время аварий). ВЭУ с АГДП, несмотря на их преимущества [1], более чувствительны к изменению напряжения и могут отключаться при авариях во внешней ЭС. Поэтому для такого типа ВЭУ необходимо предусматривать соответствующую защиту, которая может выполняться за счет добавления электрических компонентов в цепь ротора или статора [2–4], либо за счет усовершенствования алгоритмов управления преобразователями [1], [5].

1. Физическая модель на лабораторном стенде МЭИ

Испытательный стенд состоит из асинхронного генератора с фазным ротором и сервопривода, которые соединены на одном валу. Обмотка ротора асинхронного генератора подключена к сети через преобразователь мощности. Сервопривод моделирует ветроколесо установки и передает генератору механический момент и скорость вращения. За счет управления сервоприводом моделируются разные значения выдаваемой на вал генератора механической мощности, в зависимости от скорости ветра. Ветроколесо, моделируемое сервоприводом, имеет систему регулирования угла установки лопастей и позволяет осуществлять аэродинамическое регулирование выдаваемой мощности.

Асинхронный генератор с двойным питанием, приводимый в движение сервоприводом, выдает мощность во внешнюю сеть через линию электропередачи, которая моделируется отдельным блоком. Обмотки статора АГДП подключаются напрямую к стороне низкого напряжения трансформатора. Обмотки ротора через контактные кольца подключаются к преобразователю мощности, который состоит из двух обратно подключенных (back-to-back) инверторов и далее к внешней сети. Такая конфигурация позволяет обеспечивать двунаправленный поток мощности. Преобразователь мощности со стороны внешней сети (ПСС или GSC) производит выпрямление тока 50 Гц внешней сети, и имеет задачу поддержания напряжения вставки постоянного тока на одном уровне. Преобразователь

мощности со стороны ротора (ПСР или RSC) преобразовывает постоянный ток в переменный для питания обмоток ротора, при этом частота этого тока зависит от режима работы ВЭУ.

Система управления ВЭУ – это закрытая система или “черный ящик”, которая принимает входные параметры и выдает выходные данные в зависимости от требуемых задач. Системы управления описаны в работах [5–8]. На данном этапе система управления ВЭУ испытательного стенда не исследуется. Систему управления физической модели можно охарактеризовать следующими параметрами:

Входные параметры: скорость ветра; уставка по активной мощности; уставка по реактивной мощности.

Выходные параметры: частота вращения ВЭУ; механический момент; ШИМ сигнал на ПСС и ПСР.

Задачи: после выдачи определенного механического момента сервоприводом, ротор генератора разгоняется до определенной скорости и может выдавать определенное значение активной/реактивной мощности через статор. В зависимости от ШИМ сигнала управления на контроллеры ПСР и ПСС через преобразователь мощности возможен переток мощности в обе стороны, и возможно изменять значение мощности статора.

2. Описание математической модели в Simulink

Для проведения испытаний была создана математическая модель ВЭУ с АГДП, которую можно разделить на следующие основные блоки: асинхронный генератор с фазным ротором; аэродинамическая модель ветроколеса; преобразователь мощности для питания обмоток ротора переменным током с изменяющейся частотой; система управления преобразователем мощности.

В аэродинамическую модель на вход поступает значение скорости ветра. Контроллер оптимизации частоты вращения (MPPT) выдает управляющее воздействие на систему поворота лопастей для обеспечения работы с оптимальной быстроходностью, при которой достигается максимальное значение коэффициента мощности C_p . Если ставится задача выдачи ВЭУ мощности меньшей, чем максимально возможная при данной скорости ветра, то мощность можно ограничить за счет снижения частоты вращения

путем поворота лопастей. От аэродинамической модели на вход модели асинхронного генератора поступает значение момента, который можно регулировать за счет системы поворота лопастей.

Электрическое регулирование мощности ВЭУ возможно при помощи системы управления преобразователем мощности. При этом, трехфазные токи со стороны сети преобразуются из трехфазной системы координат в двухфазную систему координат d, q . Это позволяет развязать управление и отдельно регулировать значения тока i_d и i_q . Преобразователи мощности АГДП обычно используют методику векторного управления [6]. Векторное управление позволяет развязать управление активной и реактивной мощностями. При этом вращающаяся система отсчета может быть привязана к переменному магнитному потоку или напряжению, а затем токи могут быть спроецированы на эту вращающуюся систему отсчета. Этими проекциями являются d и q составляющие токов преобразователя. Если системы отсчета выбраны верно, переменные трехфазные токи могут быть постоянными в d, q координатах в установившемся режиме. Если система отсчета преобразователя со стороны ротора отнесена к магнитному потоку статора, изменения i_q преобразователя со стороны ротора приводят к изменению активной мощности, а изменения i_d ПСР приводят к изменению реактивной мощности.

Если система отсчета ПСС отнесена к напряжению статора, то изменение тока i_d ПСС приводит к изменению напряжения ДС вставки постоянного тока, а изменение i_q ПСС приводит к изменению реактивной мощности ПСС.

Таким образом, регулируя токи i_d и i_q двух преобразователей (ПСС и ПСР) можно производить управление активной и реактивной мощностью, а также напряжением ДС.

В управлении преобразователем со стороны ротора присутствуют две независимые ветви управления – одна для регулирования активной мощности, другая – для реактивной. Каждая ветвь состоит из двух ПИ регуляторов в каскаде (рисунок 1). Схема управления ПСС и ПСР, реализованная в программной среде Simulink, показана на рисунках 1 и 2.

3. Программа испытаний для верификации

При проведении испытаний были исследованы нормальные и аварийные режимы работы

на лабораторном стенде. Далее эти испытания были проведены на математической модели. Под нормальными режимами подразумеваются установившиеся режимы работы ВЭУ при различных значениях скорости ветра и требуемой мощности от ВЭУ. При запуске ВЭУ постепенно выводится на рабочий режим – при увеличении скорости ветра до значения пусковой скорости, производится синхронизация с сетью. В зависимости от скорости ветра и мощности ВЭУ возможны два режима – подсинхронный и надсинхронный.

Моделирование режима запуска показывает корректность работы ПСС и ПСР. При наборе мощности и работе в подсинхронном режиме преобразователь мощности потребляет активную мощность из сети. После разгона ВЭУ и перехода в надсинхронный режим, мощность поступает из ПСС в сеть.

Моделирование КЗ. Повышение устойчивости ВЭУ с АГДП, а именно обеспечение возможности ВЭУ оставаться подключенными к сети с возможностью выдачи реактивной мощности во время аварий – основная задача исследования, поэтому было решено провести эксперименты с коротким замыканием в сети и сравнить результаты на двух моделях. Производилось моделирование различных режимов КЗ при подключенной ВЭУ с ЭС и выдающей различную мощность, а также моделирование трехфазного КЗ с продолжительностью от 50 до 900 мс.

4. Испытание на двух моделях и сравнение результатов

Режим запуска ВЭУ. График увеличения скорости ветра при запуске ВЭУ показан на рисунке 3. При начальной скорости ветра в 5 м/с, ВЭУ синхронизирована с сетью, но выработка активной мощности не производится. На валу не достигается необходимое для пуска ВЭУ значение момента (рисунок 3). С ростом скорости возможно увеличение выдаваемой ВЭУ мощности, суммарная мощность ВЭУ при этом >0 . При скорости 10 м/с ВЭУ работает в подсинхронном режиме, из сети потребляется активная мощность для питания обмоток ротора. Поведение моделей при запуске ВЭУ показано на рисунке 4, что позволяет сделать вывод об их сопоставимости.

Режим КЗ. При возникновении КЗ на физической и математической модели активируется защита в виде сопротивления, которое закорачи-

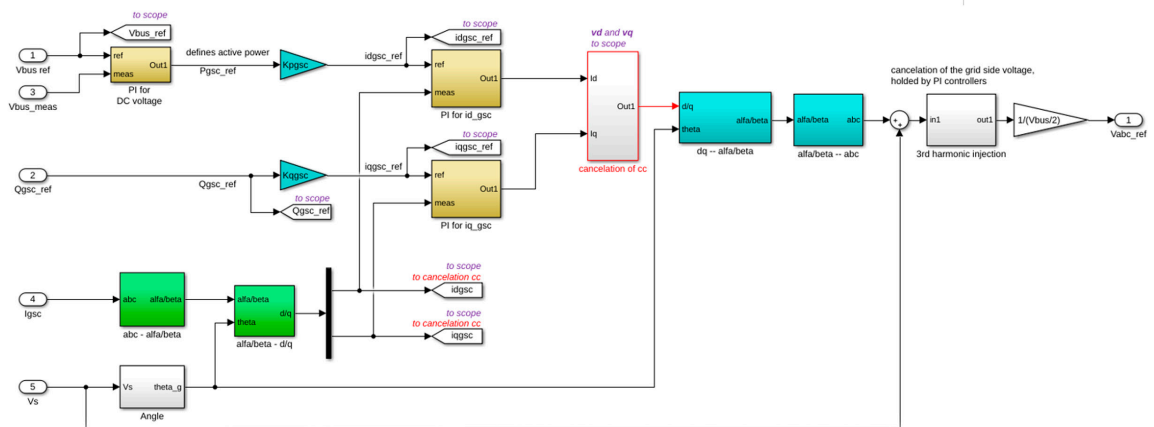


Рисунок 1 – Пример реализации ПСС математической модели системы управления

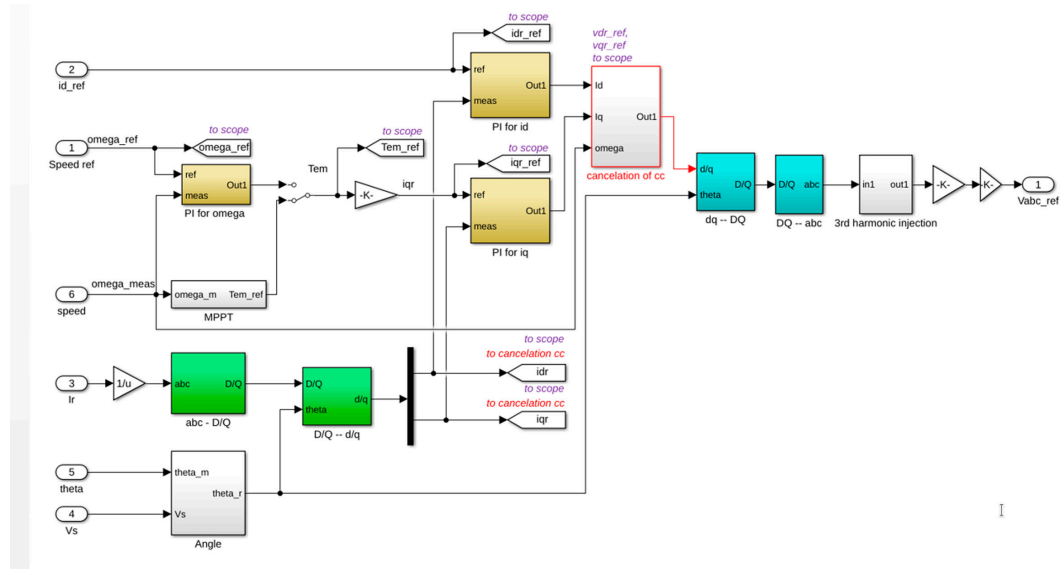


Рисунок 2 – Пример математической модели для реализации управления ПСР

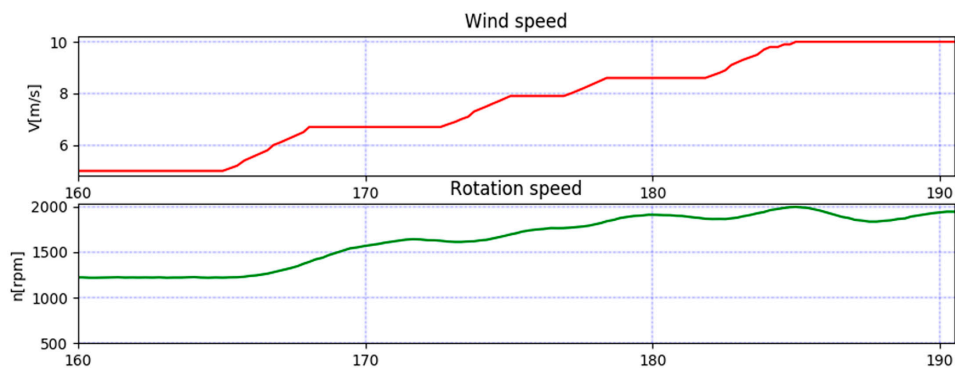


Рисунок 3 – Изменение скорости вращения ВЭУ при режиме запуска ВЭУ

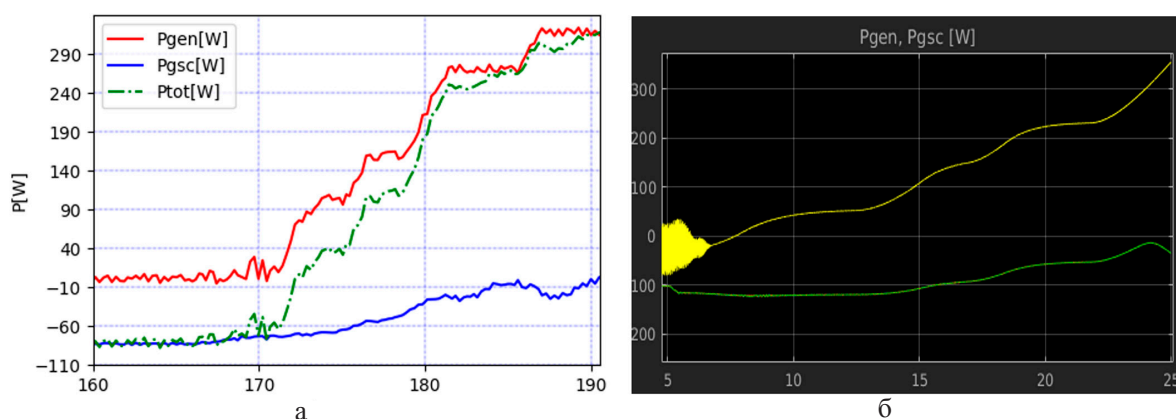


Рисунок 4 – Изменение активной мощности ВЭУ при моделировании режима запуска ВЭУ на физической модели (а) и математической модели (б)

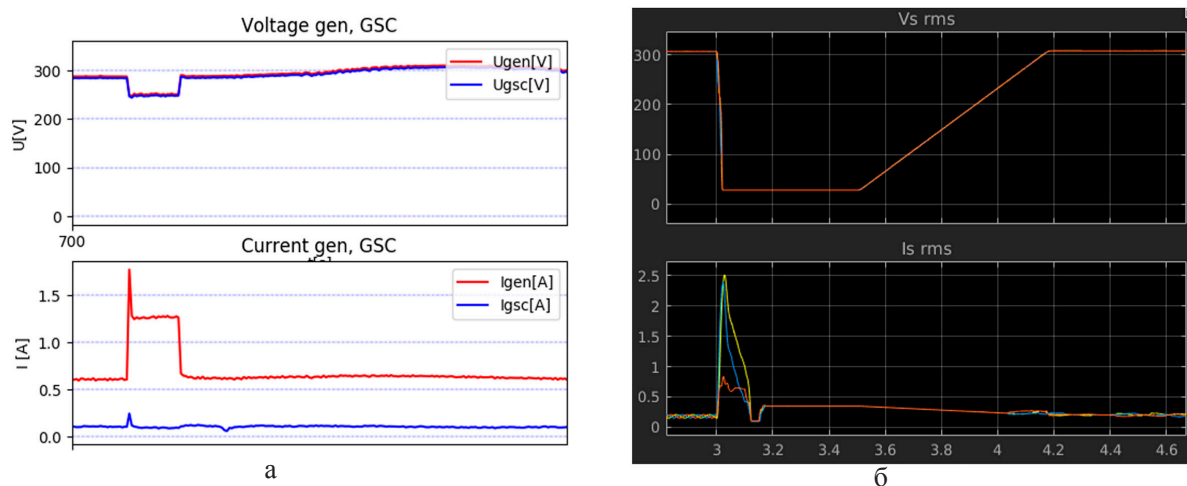


Рисунок 5 – Изменение активной мощности ВЭУ при моделировании режима запуска ВЭУ на физической модели (а) и математической модели (б)

вает обмотки ротора. При этом избыточная мощность при КЗ не поступает в ПСР, а рассеивается на этом сопротивлении. Значение напряжения в точке подключения ВЭУ показано на рисунке 4.

Поскольку ПСР блокируется на время активации шунтирующего сопротивления, ток ПСР I_q равен нулю, поэтому нет возможности регулировать момент и скорость вращения. Ток I_d ПСР при этом устанавливается равным току статора, поэтому через статор выдается реактивная мощность для повышения напряжения в точке подключения ВЭУ. Одинаковое поведение ВЭУ наблюдается как при физическом, так и при математическом моделировании (рисунок 5).

Выводы. Исследования результатов моделирования установившихся и аварийных режимов

и оценка производительности физической и математической модели показали их сопоставимость. Несмотря на отличия в точных значениях уровней снижения напряжения и амплитуды пиковых токов, поведение двух систем аналогично, что говорит об одинаковых алгоритмах систем управления ВЭУ в нормальном и аварийном режимах. Различия в точных значениях могут возникать в результате отличия точных параметров ВЭУ, таких как мощностная характеристика, значение инерции и коэффициенты усиления контроллеров.

Литература

1. Hansen A.D. Co-ordinated voltage control of DFIG wind turbines in uninterrupted operation during

- grid faults / A.D. Hansen, G. Michalke, P. Sorensen, T. Lund and F. Iov // *Wind Energy*. 2007. № 10. P. 51–68.
2. Okedu K.E. Comparative study between two protection schemes for DFIG-based wind generator / K.E. Okedu, S.M. Muyeen, R. Takahashi and J. Tamura // *IEEE Transactions on Power Energy*. 2010. № 12. P. 138–152.
 3. Park W. The effect of SFCL on electric power grid with wind turbine generation system / W. Park and B.C. Sung // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010. № 20. P. 1177–1181.
 4. Causebrook A. Fault ride through of large wind farms using series dynamic braking resistors / A. Causebrook, D.J. Atkinson and A.G. Jack // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007. № 22. P. 966–975.
 5. Дерюгина Г.В. Исследование факторов и математических моделей, влияющих на проектные показатели энергоэффективности ветро-дизельных комплексов / Г.В. Дерюгина, Н.Д. Карпов, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков // *Вестник КРСУ*. 2017. Том 17. № 8. С. 44–49.
 6. Hu J. Modeling and control of DFIG energy generation system under grid voltage dip / J. Hu, D. Sun, Y. He and R. Zhao // *Automation of Electric Power Systems*. 2006. № 30. P. 21–26.
 7. Okedu K.E. Wind Farms Fault Ride Through Using DFIG With New Protection Scheme / K.E. Okedu, S.M. Muyeen, R. Takahashi and, J. Tamura // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2012. P. 242–254.
 8. Xiang D. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through / D. Xiang, L. Ran, P. Tavner and S. Yang // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. № 21. P. 652–662.