

С.Н. УДАЛОВ, В.З. МАНУСОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
И УПРАВЛЕНИЕ ИМИ
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Монография



**НОВОСИБИРСК
2 0 1 3**

УДК 620.92
У 281

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. НГАВТ Ю.В. Дёмин,
д-р физ.-мат. наук, проф. НГТУ С.М. Коробейников

Удалов С.Н.

У 281 Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики : монография / С.Н. Удалов, В.З. Манусов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-2351-6

В монографии представлены модели скорости ветра и определены области их использования, математические модели редуктора, асинхронных и синхронных генераторов и преобразователей частоты. Проведен анализ режимов работы ветроэнергетических установок и рассмотрена возможность управления режимами ветротурбины на основе аппарата нечеткой логики с использованием алгоритмов Мамдани и Ларсена.

УДК 620.92

ISBN 978-5-7782-2351-6

© Удалов С.Н., Манусов В.З., 2013
© Новосибирский государственный
технический университет, 2013

S.N. UDALOV, V.Z. MANUSOV

MODELING OF WIND-DRIVEN POWER PLANT AND THEIR CONTROL BASED ON FUZZY LOGIC

Monograph



NOVOSIBIRSK
2 0 1 3

UDC 620.92
U 281

Reviewers:

Prof. *Yu. V. Dyomin*, D.Sc. (Eng.), NSAWT
Prof. *S. M. Korobeynikov*, D.Sc. (Phys. & Math.), NSTU

Udalov S.N.

U 281 Modeling of wind-driven power plant and their control based on fuzzy logic : monograph / S.N. Udalov, V.Z. Manusov. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2013. – 200 pp. (“NSTU Monographs” series).

ISBN 978-5-7782-2351-6

The monograph presents wind-driven power plant (WDPP) models and the fields of their application. Mathematical models of gearboxes, induction and synchronous generators as well as frequency converters are also described. The analysis of WDPP operation modes is made and the feasibility of WDPP operation control based on fuzzy logic using the Mamdani and Larsen algorithms is studied.

UDC 620.92

ISBN 978-5-7782-2351-6

© Udalov S.N., Manusov V.Z., 2013
© Novosibirsk State
Technical University, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СКОРОСТИ ВЕТРА	11
1.1. Физические основы возникновения энергии ветра	11
1.2. Вероятностная модель скорости ветра	14
1.3. Спектральная модель скорости ветра.....	23
1.4. Нечеткая модель скорости ветра	32
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	45
2.1. Топологии ветроэнергетических установок	45
2.2. Модель крутящего момента ветроколеса	50
2.3. Моделирование повышающего редуктора	62
2.4. Моделирование электрических генераторов	66
2.4.1. Асинхронный генератор	67
2.4.2. Синхронный генератор	74
2.5. Моделирование силового преобразователя: выпрямитель – фильтр – инвертор.....	78
3. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОВОЙ ТУРБИНОЙ.....	87
3.1. Задачи управления ВЭУ	87
3.2. Физические основы первичных задач управления	88
3.2.1. Активное управление углом заклинения.....	90
3.2.2. Активное управление сбросом оборотов ветроколеса	90
3.2.3. Пассивное управление углом заклинения	91
3.2.4. Пассивное управление сбросом оборотов ветроколеса.....	91
3.3. Принципы оптимального управления ВЭУ	92
3.3.1. ВЭУ с переменной скоростью вращения турбины и посто- янным углом заклинения	92
3.3.2. ВЭУ с постоянной скоростью вращения турбины и пере- менным углом заклинения.....	97
3.4. Основные методы управления ВЭУ	99
3.4.1. Управление ВЭУ в режиме переменной скорости вращения и при постоянном угле заклинения	99
3.4.2. Управление ВЭУ с изменяемым углом заклинения.....	107
3.5. Оптимальное управление по комбинированному критерию: энергетическая эффективность – усталостные нагрузки.....	113



4. МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	117
4.1. Общая постановка проблемы	117
4.2. Методы оптимального управления с использованием нелинейной модели.....	118
4.2.1. Отслеживание точки максимальной мощности (ОТММ)	118
4.2.2. Управление на основе нечеткой логики	119
4.2.3. Метод скользящего управления.....	120
4.2.4. Метод прямого наложения оптимальной рабочей точки	122
4.2.5. Управление линейной обратной связью	123
4.3. Методы оптимального управления с использованием линеаризованной модели	123
4.3.1. Установившаяся оптимизация ВЭУ	123
4.3.2. Линейная квадратичная динамическая оптимизация.....	124
4.3.3. Управление на основе теории количественной обратной связи.....	126
4.4. Современные способы управления ВЭУ.....	127
4.4.1. Зоны управления по энергетической характеристике ВЭУ	127
4.4.2. Стандартное управление в зоне 2.....	130
4.4.3. Адаптивное управление в зоне 2	132
4.5. Реализация нечеткого управления в системе регулирования мощности ВЭУ	136
4.5.1. Структурная схема ВЭУ	137
4.5.2. Схема нечеткого регулирования мощности	138
4.5.3. Описание принятия управляющего воздействия.....	148
4.5.4. Функционирование алгоритма Мамдани.....	153
4.5.5. Управление на основе алгоритма Ларсена.....	155
4.5.6. Нечеткое управление ВЭУ в зоне 2	156
5. ВЭУ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ЛОПАСТИ.....	165
5.1. Ветроурубина с изменяемой длиной лопасти	165
5.2. Устройства быстрого изменения воздушного потока вокруг лопасти	169
5.3. Изменение подъемной силы ветроурубины с помощью плазменного привода	180
Заключение	187
Библиографический список	189

CONTENTS

Introduction.....	7
1. MATHEMATICAL WIND SPEED MODELS.....	11
1.1. Physical basics of wind energy	11
1.2. A probabilistic wind speed model	14
1.3. A spectral wind speed model.....	23
1.4. A fuzzy wind speed model	32
2. WIND-DRIVEN POWER PLANT (WDPP) MODELING.....	45
2.1. Topology of wind-driven power plants	45
2.2. A model of wind wheel torque.....	50
2.3. Step-up gearbox modeling	62
2.4. Electric generator modeling	66
2.4.1. Induction generators	67
2.4.2. Synchronous generators	74
2.5. Power converter modeling: rectifier – filter – inverter	78
3. METHODS AND ALGORITHMS OF WIND-DRIVEN TURBINE CONTROL.....	87
3.1. Control of wind-driven turbine	87
3.2. Physical basics of primary control tasks.....	88
3.2.1. Active control of the pitch angle.....	90
3.2.2. Active control of wind wheel rotation reduction	90
3.2.3. Passive control of the pitch angle	91
3.2.4. Passive control of wind wheel rotation reduction.....	91
3.3. Principles of optimal WDPP control	92
3.3.1. Variable speed and constant pitch angle WDPPs.....	92
3.3.2. Constant speed and variable pitch angle WDPPs	97
3.4. The Main Methods of WDPP Control.....	99
3.4.1. WDPP control in the variable speed and constant pitch angle mode.....	99
3.4.2. WDPP control in the variable pitch angle mode	107
3.5. Combined Optimal Control: Energy Efficiency – Fatigue Loads	113
4. OPTIMAL WDPP CONTROL METHODS BASED ON THE ENERGY EFFICIENCY CRITERION.....	117
4.1. General statement of the problem	117



4.2. Optimal control methods based on the nonlinear model.....	118
4.2.1. Maximum power point tracking (MPPT)	118
4.2.2. Fuzzy logic control	119
4.2.3. Sliding-mode control.....	120
4.2.4. Direct imposition of an optimal operating point.....	122
4.2.5. Linear feedback control.....	123
4.3. Optimal control methods based on the linearized model	123
4.3.1. Steady-state WDPP optimization	123
4.3.2. Linear quadratic dynamic optimization	124
4.3.3. Control based on the quantitative feedback theory	126
4.4. State-of-the-art methods of WDPP control.....	127
4.4.1. Control zones based on the WDPP energy characteristics.....	127
4.4.2. Standard control in zone 2.....	130
4.4.3. Adaptive control in zone 2	132
4.5. Implementation of fuzzy control in the WDPP power control system.....	136
4.5.1. WDPP block diagram.....	137
4.5.2. Fuzzy power control diagram.....	138
4.5.3. Control action description	148
4.5.4. The Mamdani algorithm operation	153
4.5.5. The Larsen algorithm-based control	155
4.5.6. WDPP fuzzy control in zone 2	156
5. VARIABLE BLADE GEOMETRY WDPPS	165
5.1. Wind turbines with a variable blade length.....	165
5.2. Devices for a quick change of the air flow around the blade.....	169
5.3. Changing the WDPP lifting force by means of a plasma drive	180
Conclusion	187
References	189