

**УНИВЕРСИТЕТ ИННОПОЛИС**

**М.Р. БАХРАМИ**

**БОНД ГРАФ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

**2-е издание, исправленное и дополненное**

**КАЗАНЬ**

**2021**

УДК 62-7: 621

ББК 30в6

Б 30

*Рекомендовано к изданию  
Ученым советом Университета Иннополис  
(протокол № УС-1/2021/11/18 от 18 ноября 2021 г.)*

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук, профессор **А.Н. Фролов**;  
кандидат технических наук, доцент **А.А. Ашейчик**

**Бахрами М.Р.**

**Б30 Бонд граф: моделирование физических систем: учебное пособие / М.Р. Бахрами. – 2-е изд., испр. и доп. – Казань: Типография ООО «Альфа-К», 2021. – 74 с.**

ISBN 978-5-9690-0955-4

Пособие посвящено особенностям моделирования инженерных систем посредством графа связей (Бонд графов). Автор показывает, что моделирование графом связей — это методология физического моделирования, основанная на обмене физических энергий, которая особенно подходит для моделирования междисциплинарных или мехатронных систем. Основной проблемой теоретического моделирования мехатронных систем является то, что компоненты могут быть из разных энергетических доменов. Графы связей — это многоэнергетическая область. В состав пособия включены учебные материалы по моделированию инженерных систем посредством графа связей (Бонд графов).

Издание второе, исправленное и дополненное.

Для студентов, аспирантов, преподавателей профильных вузов и всех интересующихся моделированием инженерных систем.

Табл. 6. Ил. 67. Библиогр.: 17 название.

ISBN 978-5-9690-0955-4

УДК 62-7: 621

ББК 30в6

© Бахрами М.Р., 2018

© Бахрами М.Р., 2021, с исправлениями и дополнениями

© Типография ООО «Альфа-К», 2021

## Оглавление

Введение .....	4
1. Моделирование физических систем: подход Бонд графов .....	5
1.1. Методы представления системы .....	5
1.2. Значение терминов .....	8
1.3. Соглашения по построению графов связей .....	12
1.4. Входы, выходы, сигналы .....	17
1.5. Основные компоненты: .....	19
1.5.1. Основные 1-портовые элементы .....	19
1.5.2. Основные 2-портовые элементы .....	26
1.5.3. 3-портовые соединительные элементы .....	30
1.6. Причинность в графах связей .....	33
2. Модели систем .....	38
2.1. Общие этапы процедура получения модели графа связей .....	38
2.1.1. Подготовительный этап .....	38
2.1.2. Этап упрощения .....	38
2.2. Систематическая процедура получения модели графа связей для электрических систем ...	41
2.3. Систематическая процедура получения модели графа связей для механических систем ...	47
2.3.1. Поступательное движение .....	47
2.3.2. Вращение неподвижной оси .....	49
2.3.3. Сочетание поступательного и вращательного движения .....	50
2.4. Преобразователи и модели много энергетических доменов .....	53
3. Уравнения пространства состояний из Бонд графов .....	59
3.1. Назначение причинности .....	59
3.2. Процедура назначения причинности .....	59
3.3. Основная формулировка .....	64
3.4. Порядок модели и дифференциальных уравнений .....	67
3.5. Алгебраические петли .....	67
3.6. Производная причинность .....	69
Список литературы .....	73