



Москва, 29 сентября - 1 октября



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ 2021

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ УСТАНОВИВШИХСЯ
РЕЖИМОВ ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВИЭ И СНЭЭ**

Крупенёв Дмитрий Сергеевич

ИСЭМ СО РАН

Россия

Крупенёв Дмитрий Сергеевич



ПЛАН ДОКЛАДА



- Актуальность задачи оценки надёжности систем электроснабжения в современных условиях их развития.
- Методы оценки надёжности систем электроснабжения.
- Математическая модель установившегося режима системы электроснабжения.
- Матрицы (модели) чувствительности установившегося режима систем электроснабжения.
- Экспериментальные исследования.
- Заключение.



АКТУАЛЬНОСТЬ



- ✓ Обеспечение надёжности электроснабжения потребителей является одной из основных задач как при эксплуатации систем электроснабжения (СЭС), так и при их проектировании.
- 
- ✓ Существующие проблемы при обеспечении надёжности СЭС в России: высокий износ электроэнергетического оборудования; низкое качество проведения планово-предупредительных ремонтов; несоответствие эксплуатируемого оборудования фактическим нагрузкам и другие.
 - ✓ Развитие и распространение в современных СЭС новых технологий, таких как возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и системы накопления электроэнергии (СНЭЭ).

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



3D:

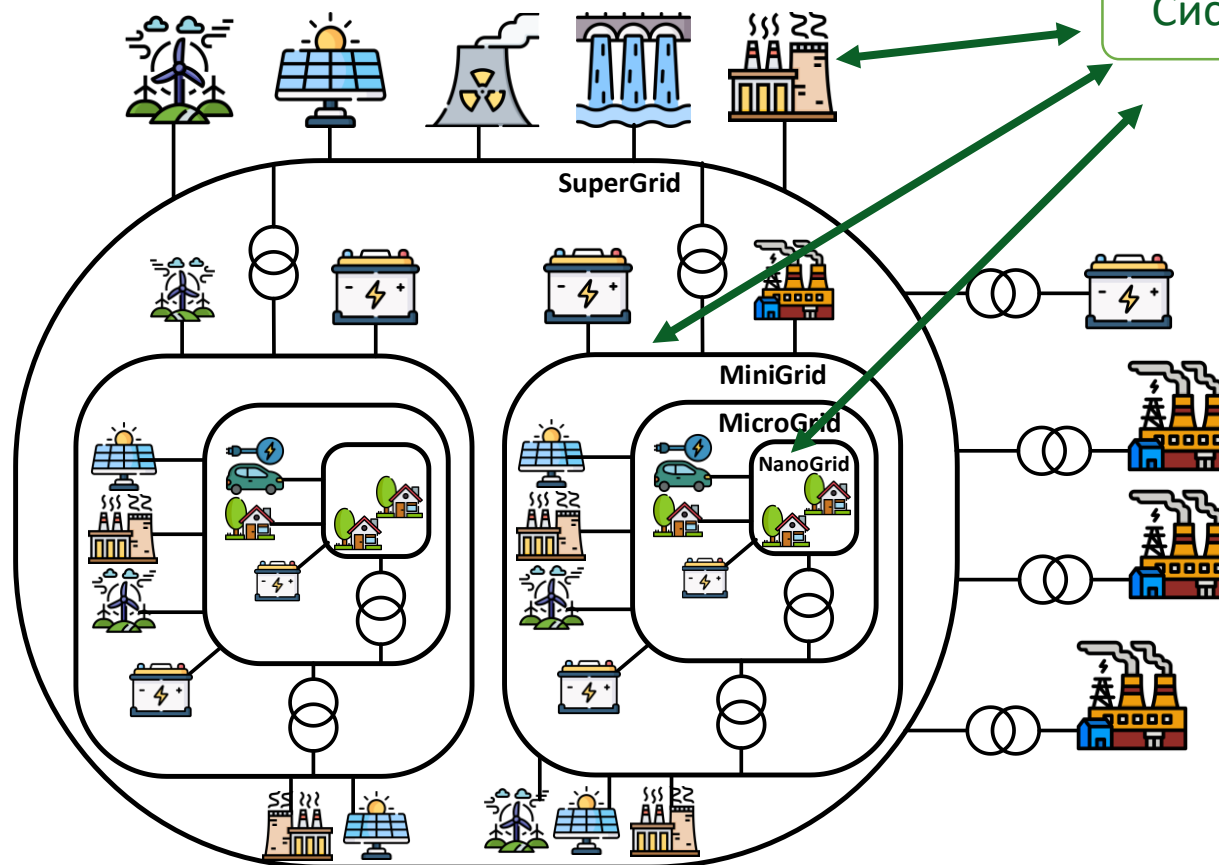
Decentralization
(децентрализация)

Decarbonization
(уменьшение доли
выбросов загрязняющих
веществ)

Digitalisation
(цифровизация)



Система управления





ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ



- определение оптимальной величины, структуры и размещения резервов генерирующих мощностей в СЭС;
- определение оптимальной структуры и пропускных способностей электрических сетей СЭС;
- технико-экономическое обоснование интеграции в СЭС энергетических объектов, в том числе ВИЭ и СНЭЭ;
- формирование оптимальной стратегии проведения плановых ремонтов энергетического оборудования СЭС;
- планирование режимов работы СЭС;
- оперативное автоматизированное управление СЭС;
- реализация функций «советчик диспетчера»;
- поддержка функционирования механизма управления спросом.

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ СЭС



Определение возможных состояний СЭС,
специализированным методом.



Анализ режимов возможных состояний СЭС.

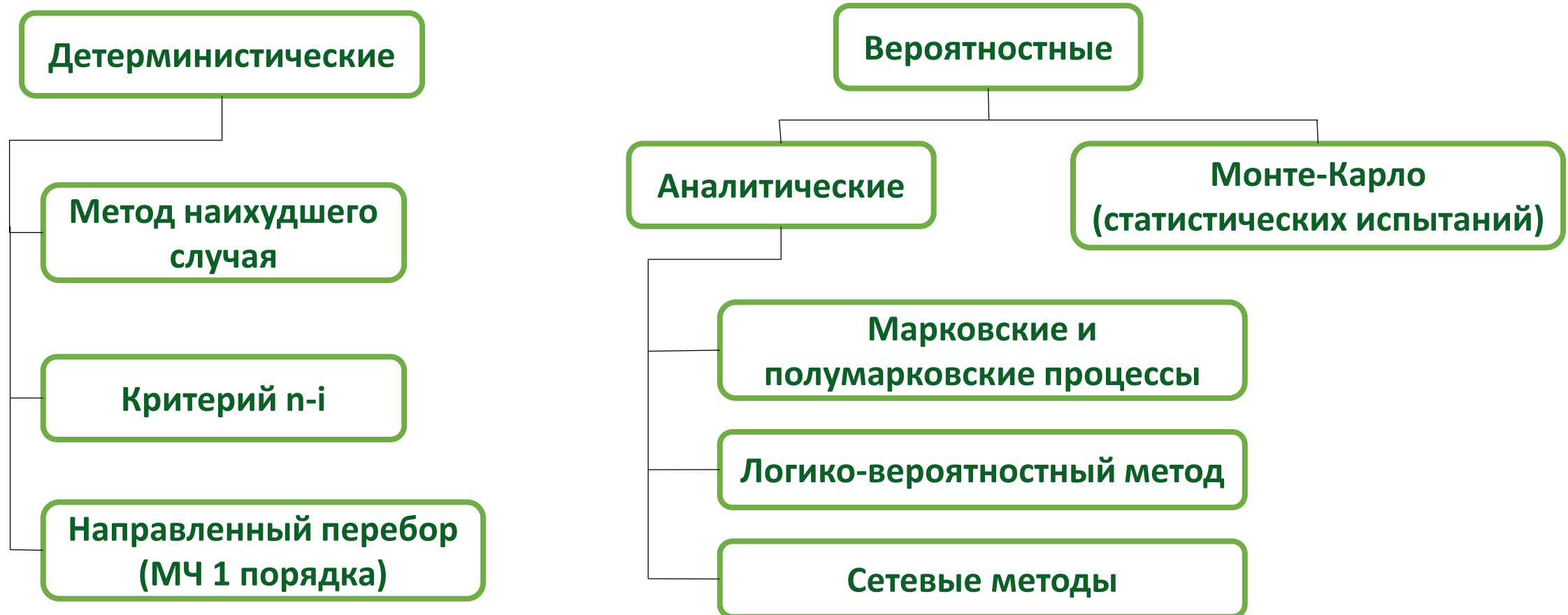


Объединение результатов вероятностного
моделирования и анализа режимов СЭС.



Вычисление показателей надёжности СЭС.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ СОСТОЯНИЙ СЭС





МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЭС



Оптимизационные модели

$$\sum_{i=1}^I (\bar{l}_i - l_i) \rightarrow \min$$

$$f_{ij} = \sum_{i=1}^I m_{i,ij} \cdot (p_i - l_i)$$

$$\sum_{i=1}^I p_i = \sum_{i=1}^I l_i + \sum_{j=1}^J k_{ji} f_{ji}^2$$

$$0 \leq l_i \leq \bar{l}_i, i = 1, \dots, I,$$

$$0 \leq p_i \leq \bar{p}_i, i = 1, \dots, I,$$

$$0 \leq f_{ji} \leq \bar{f}_{ji}, 0 \leq f_{ij} \leq \bar{f}_{ij}, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, i \neq j,$$

$$f_{ij} f_{ji} = 0$$

Модели анализа установившихся режимов

$$A * I = (\tilde{U})^{-1} * S, I \in \mathbb{C}^n, \tilde{U} \in \mathbb{C}^{m \times m}, S \in \mathbb{C}^{m-1},$$

$$A^T * U = (\tilde{Y})^{-1} * I, U \in \mathbb{C}^m, \tilde{Y} \in \mathbb{C}^{n \times n}, I \in \mathbb{C}^n$$



Моделирование действий РЗА



Определение дефицита мощности

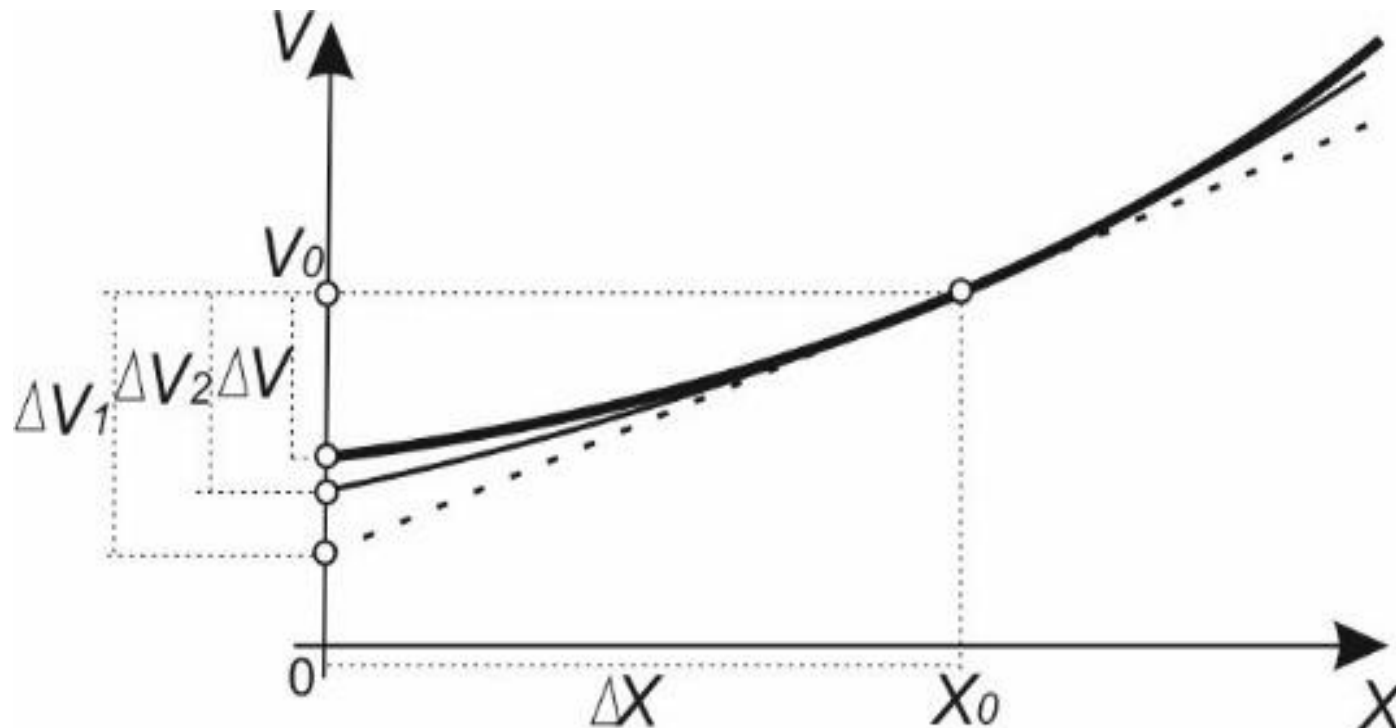


МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЭС



$$W(X, V) = 0$$

W – вектор-функция; X – вектор-столбец входных параметров режима СЭС; V – вектор-столбец выходных параметров режима СЭС



МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЭС (1)



Теорема о неявной функции:

Если отображение $W: O \rightarrow \mathbb{C}^n$, определенное в окрестности O точки $(x_0, v_0) \in \mathbb{C}^{n+m}$, $x \in \mathbb{C}^n$, $v \in \mathbb{C}^m$, таково, что

1. $W \in \mathbb{C}^1(O; \mathbb{C}^n)$ (вектор-функция непрерывно дифференцируемая),
2. $W(x_0, v_0) = 0$ (уравнение имеет решение в точке (x_0, v_0)),
3. $W'_v(x_0, v_0)$ – обратимая матрица,

то для любой точки из окрестности (x_0, v_0)

$$W(x, v) = 0 \Leftrightarrow v = f(x),$$

$$f'(x) = -[W'_v(x, f(x))]' [W'_x(x, f(x))].$$

где n – количество линий электропередачи (связей) СЭС; m – количество узлов СЭС.

МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЭС (2)



$$A * I = (\tilde{U})^{-1} * S, I \in \mathbb{C}^n, \tilde{U} \in \mathbb{C}^{m \times m}, S \in \mathbb{C}^{m-1},$$

$$A^T * U = (\tilde{Y})^{-1} * I, \quad U \in \mathbb{C}^m, \tilde{Y} \in \mathbb{C}^{n \times n}, I \in \mathbb{C}^n$$

где: A – матрица инцидентности графа СЭС размера $m \times n$, где m – число узлов, а n – число ветвей; I – вектор-столбец, компонентами которого являются перетоки по линиям электропередачи СЭС; S – вектор-столбец, компоненты которого являются мощности (разность между генерацией и нагрузками) в узлах СЭС; $\tilde{U}$ – диагональная матрица узловых напряжений СЭС; U – вектор-столбец, компонентами которого являются узловые напряжения СЭС; $\tilde{Y}$ – диагональная матрица проводимостей линий электропередачи СЭС.



МОДЕЛИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЭС



Модель чувствительности 1-го порядка

$$d_y U = -(A\tilde{Y}\tilde{A}^T)^{-1} A\tilde{Y}^{-1} \tilde{I}_0 dY$$

Матрица чувствительности 1-го порядка

$$M^1 = -(A\tilde{Y}\tilde{A}^T)^{-1} A\tilde{Y}^{-1} I_0$$

Модель чувствительности 2-го порядка

$$d_{YY}^2 U = 2(A\tilde{Y}\tilde{A}^T)^{-1} A d\tilde{Y} A^T (A\tilde{Y}\tilde{A}^T)^{-1} A \tilde{I}_0 \tilde{Y}^{-1} dY$$

Зависимость напряжений в узлах СЭС от изменения проводимости в ЛЭП

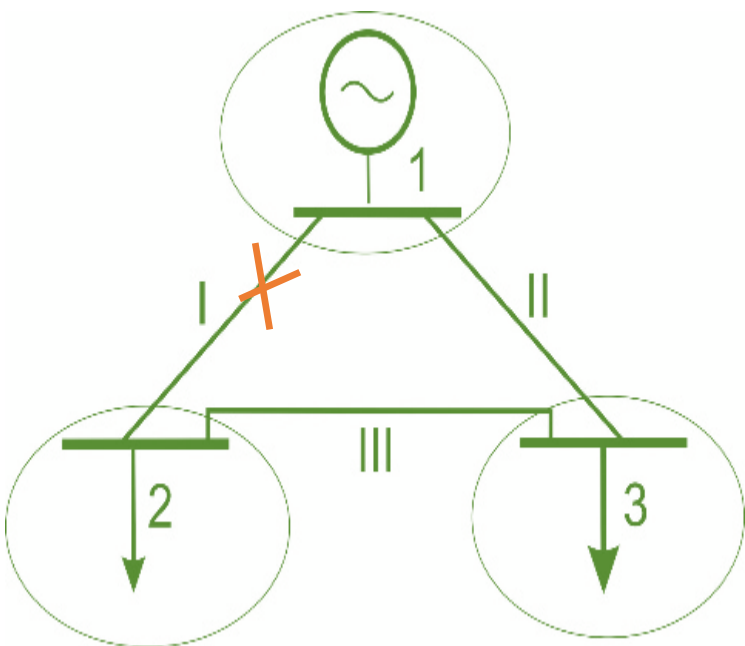
$$U \approx U_0 + d_y U + \frac{1}{2} d_{YY}^2 U$$

Изменения напряжений в узлах СЭС при отказах ЛЭП

$$\Delta_{YY} U \approx d_Y U + \frac{1}{2} d_{YY}^2 U,$$



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



	2-й узел	3-й узел
Точное значение действительной части напряжения, кВ	254,79	224,38
Значения действительной части напряжения, определённые при помощи МЧ 1-го порядка, кВ	244,9	218,65
Значения действительной части напряжения, определённые при помощи МЧ 2-го порядка, кВ	251,22	221,81
Точное значение мнимой части напряжения, кВ	-22,31	-75,73
Значения мнимой части напряжения, определённые при помощи МЧ 1-го порядка, кВ	-12,88	-74,27
Значения мнимой части напряжения, определённые при помощи МЧ 2-го порядка, кВ	-16,15	-75,9



ЗАКЛЮЧЕНИЕ



- ✓ Современные потребители электроэнергии предъявляют высокие требования по обеспечению надёжности электроснабжения.
- ✓ Интеграция ВИЭ, СНЭЭ и других технологий влияет на надёжность СЭС.
- ✓ При оценке надёжности СЭС необходимо за минимальное время провести анализ множества возможных состояний.
- ✓ Матрицы и модели чувствительности высших порядков установившегося режима СЭС являются эффективным инструментом анализа установившихся режимов.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Дмитрий Сергеевич Крупенёв

к.т.н., заведующий лабораторией
«Надёжности топливо- и энергоснабжения»
ИСЭМ СО РАН

<https://reliability.isem.irk.ru/>
Тел. +79246087827
E-mail: krupenev@isem.irk.ru

