

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
Институт энергетики

## **АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ГИБКОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЕЁ ПОВЫШЕНИЮ**

**Докладчик:**

**Косьмина Евгения Владимировна,  
[ukolovaevgenija@yandex.ru](mailto:ukolovaevgenija@yandex.ru)**

**тел. 89086644069**

# Цель

детальный сопоставительный обзор публикаций за последние годы в части анализа основных причин снижения гибкости ЭЭС и мероприятий по ее повышению. На основании этого анализа формирование задач исследований по рассматриваемой проблеме.

# Гибкость ЭЭС

Свойство системы сохранять нормальное состояние (режим) при воздействии внутренних (внезапные изменения и флуктуации генерирующих источников, нагрузок, потоков по линиям) и внешних (внезапные внешние возмущения различного происхождения) случайных (неопределенных) факторов.



# Выводы по таблице: причины снижения гибкости ЭЭС

№ п/п	Причины снижения гибкости ЭЭС					Мероприятия по повышению гибкости ЭЭС				
	Флуктуации выдачи мощности и колебания активной мощности	Неопределенность активной нагрузки	Снижение регулирующих эффектов нагрузки генерации	Снижение неопределенности ЭЭС	Влияние изоляции	Настройка электросети	Резервирование сети	Управление активной нагрузкой	Обеспечение баланса мощности, резервирование	Управление мощностью генерации
10										
12										
13										
14										
43										
31										
24										
25										
28										
53										
15										
11										
17										
40										
4										
33										
6										
7										
9										
26										
11										
54										
36										
35										
46										
2										
38										
30										
42										
61										
5										
62										
19										
51										
21										
23										
49										
44										
47										
60										
63										
39										
46										
16										
32										
22										
48										
20										
29										
34										
37										
50										
31										
58										
59										
27										
41										
45										
16										

**73%** – флуктуации выдачи мощности ветроагрегатами и солнечными станциями.

**20%** - неопределенность нагрузки активных потребителей.

**15%** снижение регулирующих эффектов нагрузки по напряжению и частоте и частотных характеристик генерации

# Выводы по таблице: причины снижения гибкости ЭЭС

№ п/п	Причины снижения гибкости ЭЭС					Мероприятия по повышению гибкости ЭЭС				
	Флуктуации скорости ветра и солнечной радиации	Масштаб нагрузки, активной нагрузки	Снижение реактивной мощности и трансформации	Снижение инерционности ЭЭС	Высокие возмущения	Наличие аварийных ситуаций	Резервирование систем	Управление активной нагрузкой	Обеспечение баланса мощности и резервирование	Технологическое и рыночное управление
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[10]										
[12]										
[13]										
[14]										
[43]										
[9]										
[24]										
[25]										
[28]										
[53]										
[15]										
[11]										
[17]										
[40]										
[4]										
[33]										
[9]										
[7]										
[8]										
[26]										
[1]										
[54]										
[36]										
[35]										
[46]										
[2]										
[38]										
[30]										
[42]										
[61]										
[5]										
[62]										
[19]										
[51]										
[21]										
[23]										
[49]										
[44]										
[47]										
[60]										
[63]										
[39]										
[46]										
[16]										
[32]										
[22]										
[48]										
[20]										
[29]										
[34]										
[37]										
[50]										
[31]										
[58]										
[59]										
[27]										
[41]										
[45]										
[16]										

Подключение к ЭЭС генераторов через выпрямительно-инверторные блоки, а также малые постоянные инерции роторов малых генерирующих установок снижают инерционность и, следовательно, гибкость ЭЭС.

Влияние внешних возмущений как фактора снижения гибкости ЭЭС исследовалось напрямую в незначительном количестве работ.

# Выводы по таблице: мероприятия по повышению гибкости ЭЭС

№ п/п	Причины снижения гибкости ЭЭС					Мероприятия по повышению гибкости ЭЭС				
	Флуктуации выработки и потребления и солнечная генерация	Изменение мощности активной нагрузки	Сильные колебания в режиме работы ЖФУ (генерация и передача)	Сильные колебания мощности ЭЭС	Высокие возмущения	Накопители электроэнергии	Реконфигурация сети	Управление активной нагрузкой	Обеспечение баланса мощности и резервирование	Технологическое и рыночное управление
1										
[10]										
[12]										
[13]										
[14]										
[43]										
[9]										
[24]										
[25]										
[26]										
[53]										
[15]										
[11]										
[17]										
[40]										
[4]										
[33]										
[9]										
[7]										
[8]										
[26]										
[1]										
[54]										
[36]										
[35]										
[46]										
[2]										
[38]										
[30]										
[42]										
[61]										
[5]										
[62]										
[19]										
[51]										
[21]										
[23]										
[49]										
[44]										
[47]										
[60]										
[63]										
[39]										
[46]										
[16]										
[32]										
[22]										
[48]										
[20]										
[29]										
[34]										
[37]										
[50]										
[31]										
[58]										
[59]										
[27]										
[41]										
[45]										
[16]										

**66%** - Управление активной нагрузкой

**55%** - обеспечение баланса мощности за счет аварийного отключения нагрузки, и резервирование активной мощности

**37%** - использование накопителей электроэнергии

**25%** - технологическое и рыночное управление

**12%** - реконфигурация электрической сети



# Вывод

Особенности рассмотрения проблемы гибкости ЭЭС, прежде всего в части причин снижения гибкости, определяются спецификой исследуемых систем. Что касается мероприятий по повышению гибкости, превалирует их **КОМПЛЕКСНОЕ** применение – два и более мероприятий (72% случаев).



# В качестве объекта исследований принята СЭС, в общем случае включающая:

- ✓ подстанцию внешнего электроснабжения, либо традиционный генератор;
- ✓ ВЭС;
- ✓ накопитель электроэнергии;
- ✓ зарядную станцию электромобилей;
- ✓ активный потребитель.

Все эти установки подключены к распределительной электрической сети СЭС.

# Основные положения методики исследований:

**Проблема** исследований состоит в главной особенности средств гибкости ЭЭС – их **случайный** характер.

Цель: определить требования к параметрам накопителя электроэнергии (мощность и емкость)

режимы работы ВЭС, зарядной станции электромобилей, накопителя электроэнергии, а также активных потребителей, подвержены влиянию случайных факторов.

# Основные положения методики исследований:

- Для каждого из этих случайных факторов задаются законы распределения вероятностей.

Композиция этих случайных состояний формирует случайное состояние СЭС, соответствующее одному расчетному интервалу суточного графика нагрузки, для которого определяется оптимальное потокораспределение в распределительной электрической сети по критерию минимума электрических потерь при учете ограничений по уровням напряжений в узлах и токов в ветвях.

- Формирование случайных состояний осуществляется методом Монте-Карло.
- Для накопителя электроэнергии и зарядной станции электромобилей учитывается связь между интервалами графика нагрузки в соответствии с учетом энергоемкости этих элементов

# Минимизация потерь активной мощности в СЭС

Уравнение, описывающее распределение пока по концам ветвей распределительной электрической сети:

$Y^k$  – матрица собственных проводимостей ветвей электрической сети;

$I^k$  – токовая нагрузка по ветвям;

$S^k$  – полная мощность, передаваемой по линии;

$U^k$  – напряжение по концам ветвей.

Критерии минимизации потерь состоят в формировании условий снижения токовой загрузки линий электропередач распределительной системы с учетом поддержания номинального напряжения в сети.

Ограничение по выдаваемой активной мощности и потребляемой мощности активной нагрузки:

Формирование ограничений по отклонению номинального напряжения в распределительной системе:

Формирование ограничений работе СНЭЭ по режиму разряда:

$$\min P_{nom}^k$$

$$\left[ \begin{array}{cccc} \cdot & & & \cdot \\ & \cdot & & \\ & & \cdot & \\ & & & \cdot \end{array} \right]$$

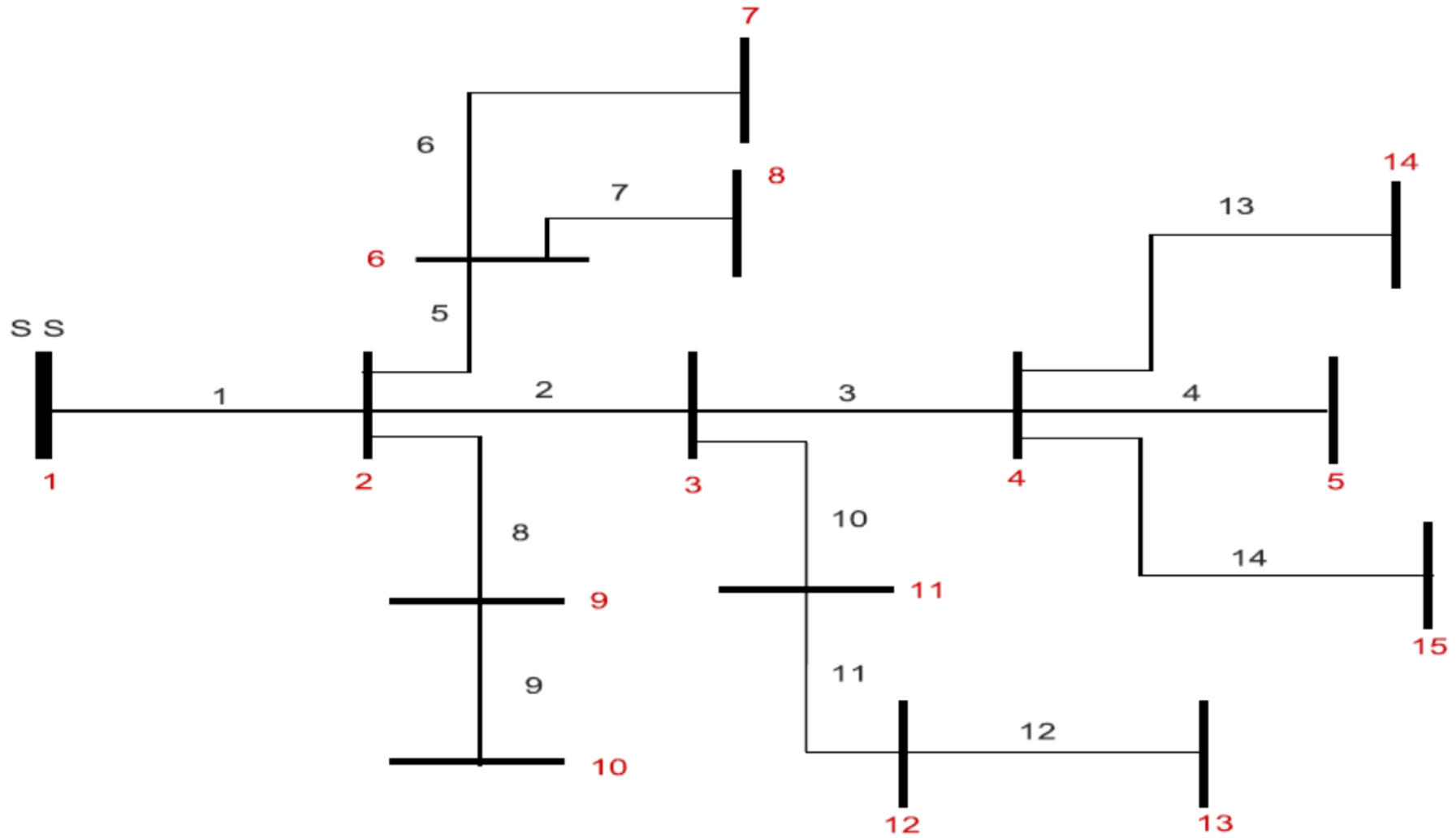
$$\begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array}$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\Gamma}^k \leq P_{\Gamma}^{\max k} \\ 0 \leq P_H^k \leq P_H^{\max k} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_i^{\min k} \leq U_i^k \leq U_i^{\max k} \\ I_{ij}^k \leq I_i^{\max k} \end{cases}$$

$$\mathcal{E}_H^{k-1} + \Delta P_H^k \Delta t \leq \mathcal{E}_H^{\max}$$

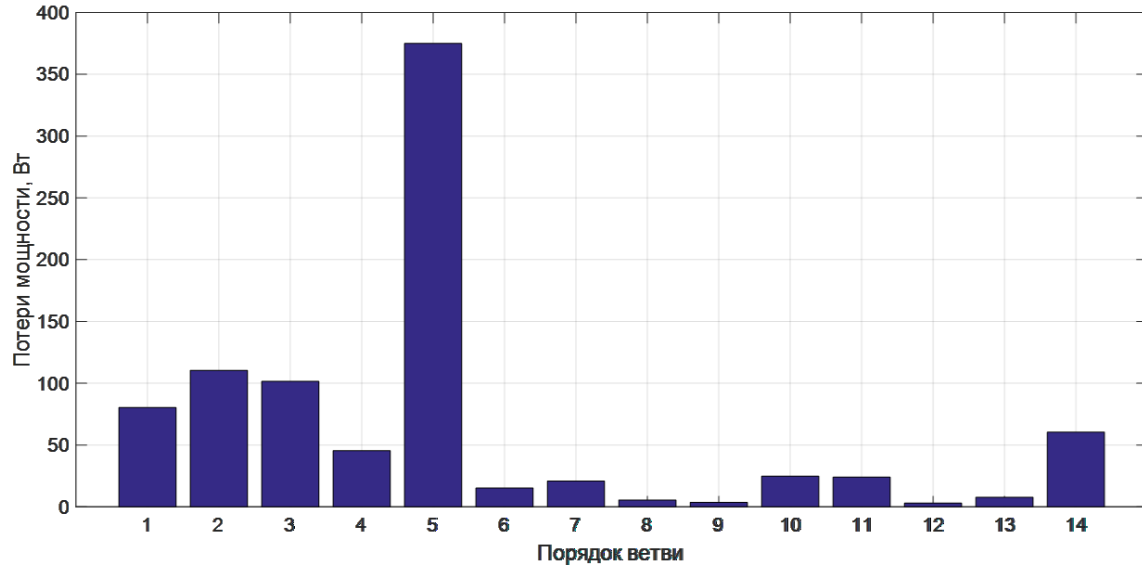
# Тестовая схема



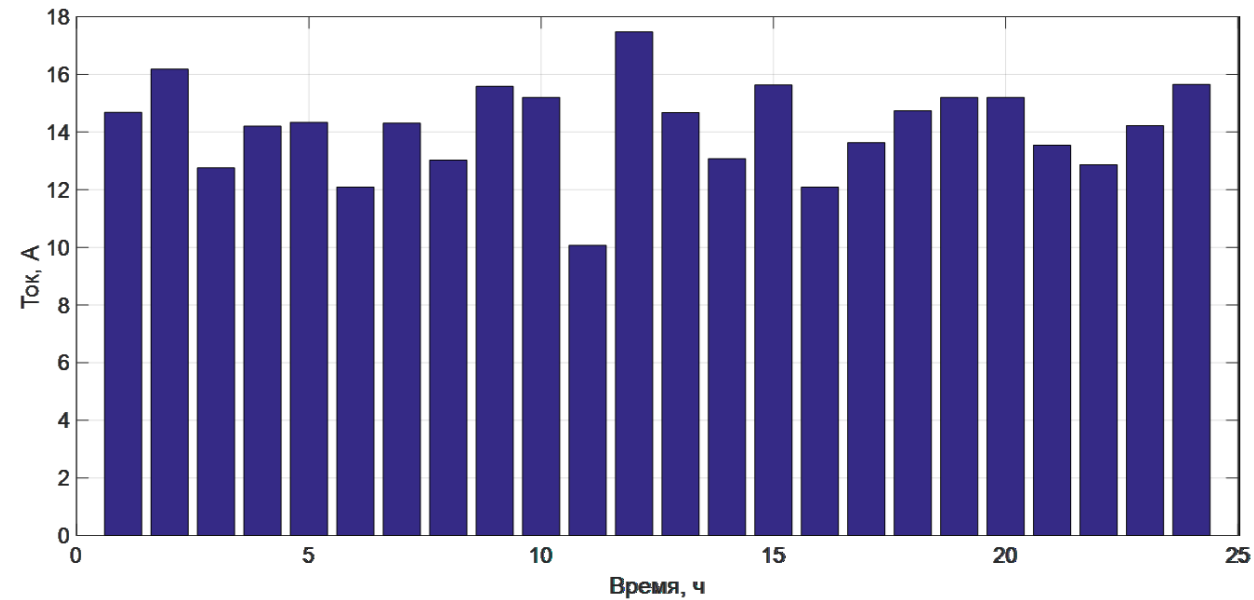
# Смоделированные нагрузки по узлам, кВА

		S10	S13	S14	S15	S5	S7	S8
Часы	1	107,86	133,65	123,17	198,87	53,60	85,80	165,19
	2	107,91	128,79	131,68	155,14	52,63	102,82	173,79
	3	102,73	132,72	118,66	166,76	51,47	49,10	168,94
	4	105,20	129,16	113,64	115,59	55,56	90,06	152,71
	5	101,81	136,07	113,48	127,97	45,92	82,93	162,12
	6	102,07	131,54	128,53	132,08	65,39	61,58	145,09
	7	104,98	134,13	123,29	160,87	62,47	73,06	171,48
	8	109,02	132,44	123,14	131,97	58,93	83,24	139,43
	9	102,97	134,67	135,86	152,54	58,83	125,71	140,66
	10	105,97	132,29	126,98	94,72	53,82	115,09	144,74
	11	104,40	135,16	126,24	130,38	65,74	61,03	111,12
	12	107,93	135,81	137,18	120,51	58,19	118,58	180,15
	13	102,14	138,36	118,35	104,69	54,37	88,27	162,61
	14	105,08	133,36	130,17	148,47	67,93	77,92	145,60
	15	106,45	128,26	131,26	143,73	57,58	88,13	179,07
	16	107,88	131,67	122,76	138,51	55,19	76,06	130,54
	17	109,05	137,42	126,38	109,80	57,13	77,12	155,88
	18	105,22	131,05	115,50	161,48	53,50	98,30	153,69
	19	101,08	136,39	115,64	145,16	51,71	97,24	162,52
	20	103,05	134,19	125,51	131,53	75,64	97,35	162,42
	21	102,21	137,64	130,37	138,29	69,92	87,56	143,87
	22	111,16	128,72	145,04	132,30	61,08	62,90	157,02
	23	103,38	133,35	119,43	101,05	50,81	88,16	154,90
	24	106,96	130,70	126,16	131,81	53,38	100,14	167,38

# Тестовая схема



Потери мощности сети



Расчет токовой загрузки самого загруженного участка (5-ая ветвь)



# Параметры ВЭУ

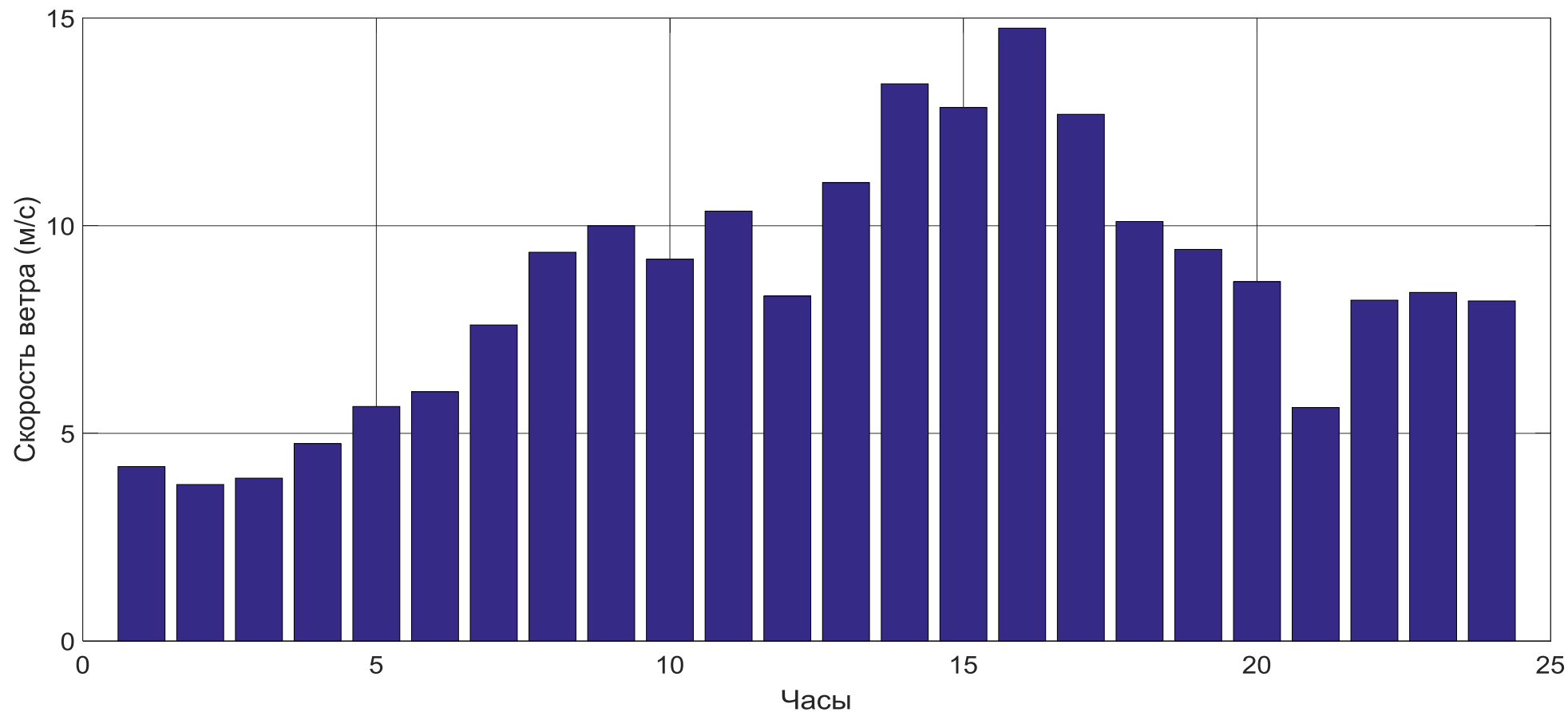
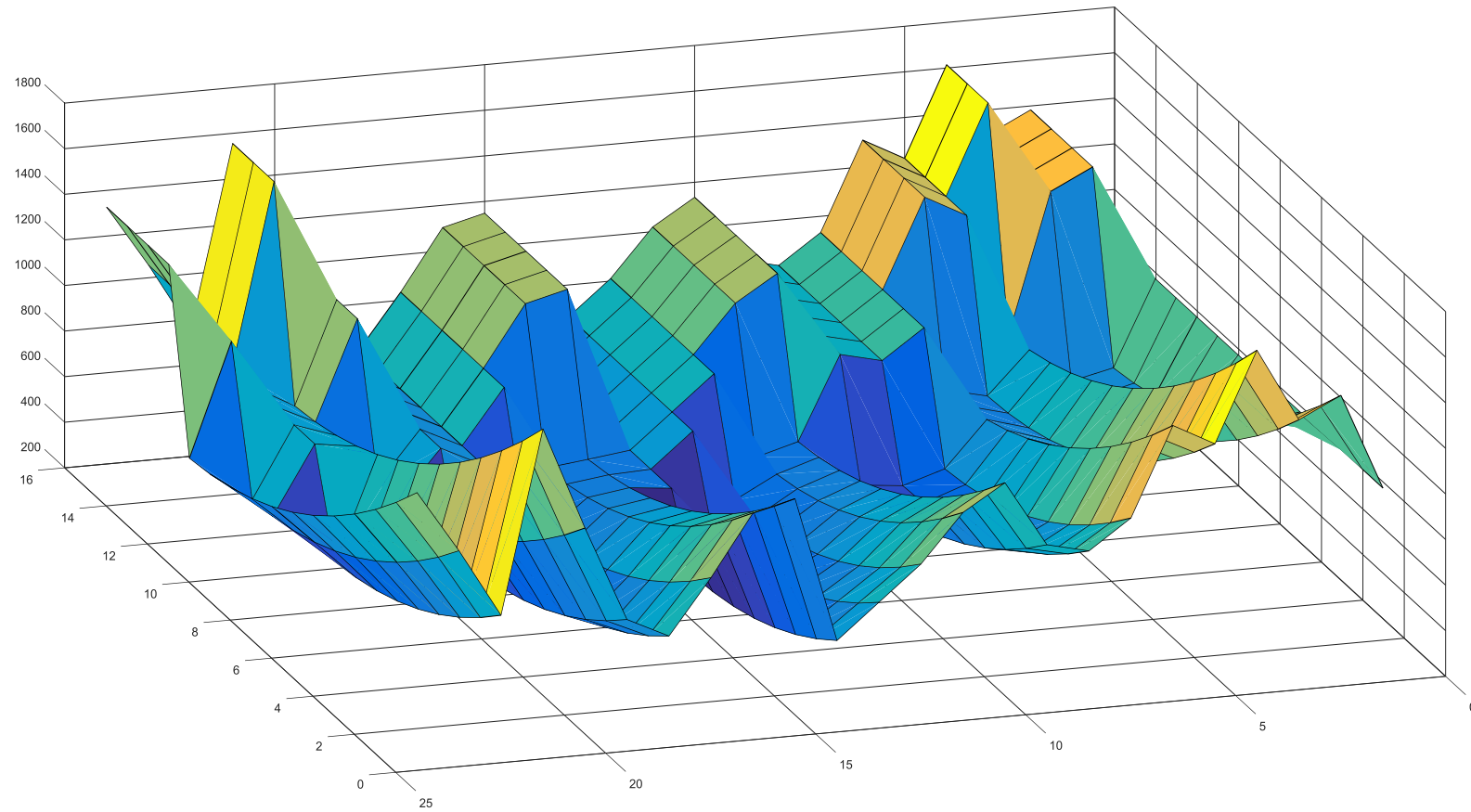


График ветровой активности

# Расчет



Потери на самой загруженной ветви с учетом ВЭУ и составом СНЭЭ по 24 часам

# Заключение

Анализ результатов исследований за последние годы проблем гибкости ЭЭС позволил выявить основные причины снижения гибкости, связанные со случайными флуктуациями выдачи мощности возобновляемых источников электроэнергии, и рекомендуемые мероприятия по повышению гибкости. Этот анализ, с учетом специфики российских условий, позволил сформулировать задачи исследований гибкости СЭС. Рассмотрены основные положения имитационного алгоритма определения необходимых мощности и электроемкости накопителя электроэнергии для компенсации неравномерности выдачи мощности ВЭС при учете основных влияющих случайных факторов.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
Институт энергетики

# Спасибо за внимание!

**АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ГИБКОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И  
МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЕЁ ПОВЫШЕНИЮ**

**Докладчик:**

Косьмина Евгения Владимировна,

**[ukolovaevgenija@yandex.ru](mailto:ukolovaevgenija@yandex.ru)**

тел. 89086644069