

# **Модели и методы развития систем электроснабжения для изолированных территорий**

**Суслов Константин Витальевич**

**кандидат технических наук, доцент**

**Заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники**

**Иркутского национального исследовательского технического университета**

# Актуальность работы

Существующие зоны централизованного и автономного электроснабжения, а также неэлектрифицированных территорий



Источник: Энергетическое снабжение изолированных территорий России / В.В.Елистратов // Академия энергетики. - 2015. - № 4(66) - С.26-33.

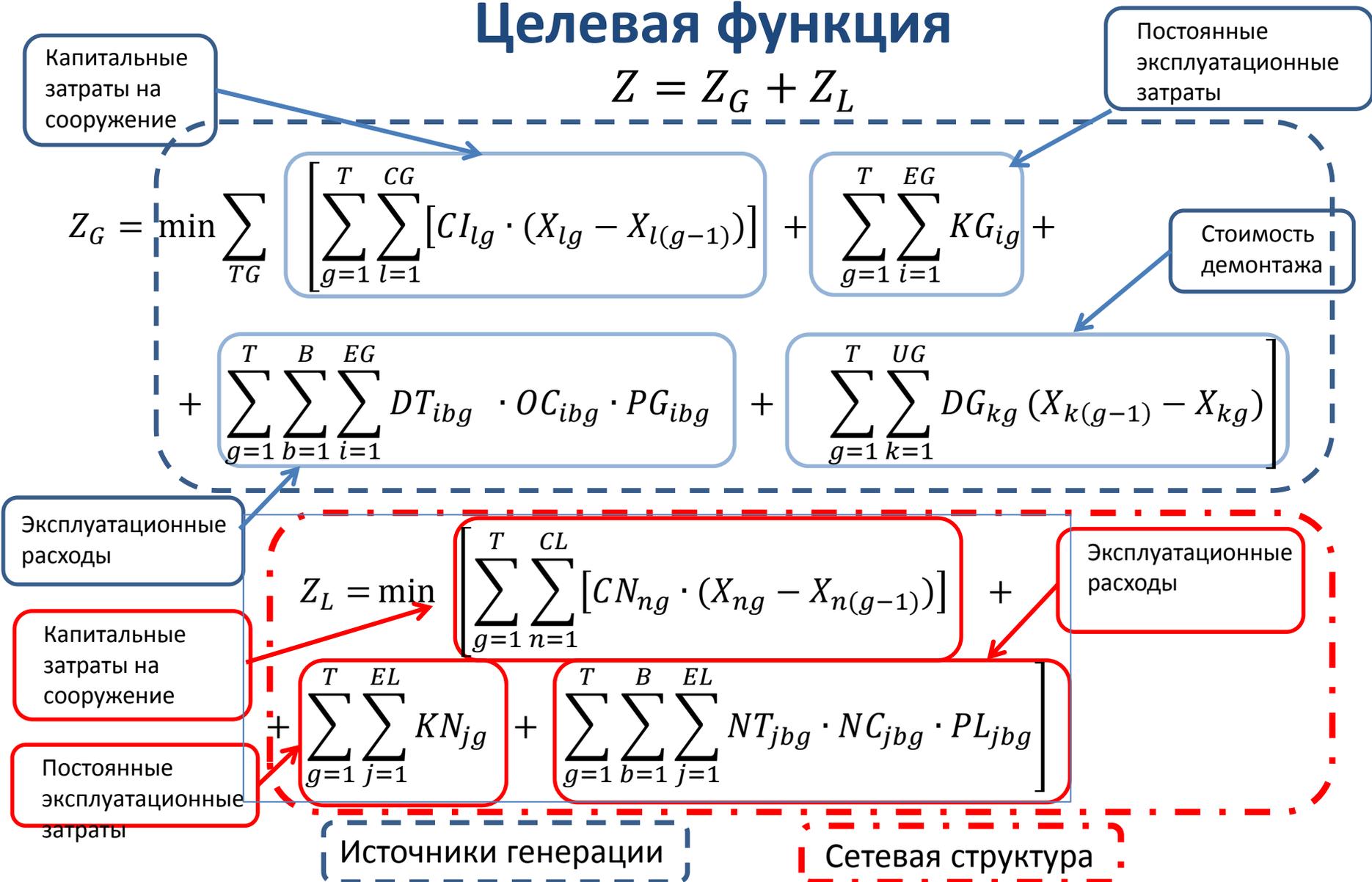
# Схема обоснования развития активных изолированных систем электроснабжения



Методологическая основа – инновационная технологическая платформа интеллектуальной ЭЭС. Ключевой задачей является обеспечение свойства активности СЭС. Обоснование средств обеспечения активности СЭС является важной составляющей обоснования ее развития, что требует исследования управления для обеспечения надежности, качества и эффективности электроснабжения.

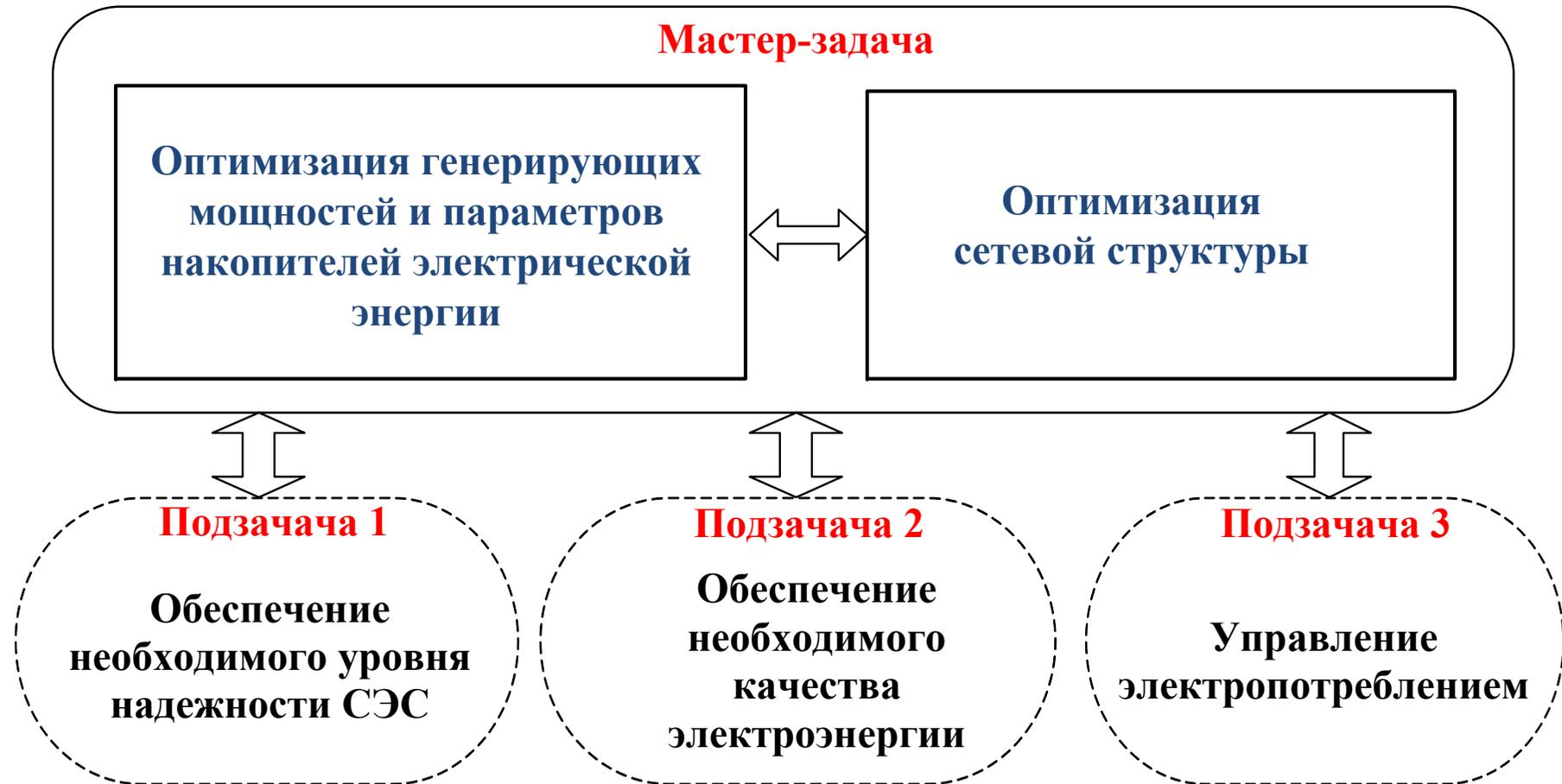
# Целевая функция

$$Z = Z_G + Z_L$$



**Ограничениями** являются: наличие капитала инвестиционных фондов, балансы мощности и энергии, ограничения на их выработку, требования по надежности, ограничения связанные с типом генераторов и ряд других.

# Общая схема использования идеологии метода декомпозиции Бендерса



# Исследование зависимости параметров накопителей электрической энергии от состава генерации

Целевая функция  $\longrightarrow OF_1 = \min \sum_{i=1}^F C_i(P_i(t))$  ,

Ограничения  $\longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^F P_i(t) = P_{\text{нагр}}(t) - P_{\text{вр}}(t) - P_{\text{фэ}}(t) \pm P_{\text{нак}}(t) \\ P_i^{\min}(t) \leq P_i(t) \leq P_i^{\max}(t) \\ P_i(t + \Delta t) \leq UR_i \\ P_i(t + \Delta t) \geq DR_i \\ E_{st}^{\min} \leq E_{st}(t + \Delta t) \leq E_{st}^{\max} \end{array} \right.$

$C_i$  – затраты на выработку мощности дизельными генераторами;  $F$  – количество дизельных генераторов (в рассматриваемом случае – четыре);  $P_i(t)$  – мощность  $i$ -того дизельного генератора;  $P_{\text{нагр}}(t)$  – мощность нагрузки в изолированной системе;  $P_{\text{вр}}(t)$  – мощность, генерируемая ветроэнергетическими установками;  $P_{\text{фэ}}(t)$  – мощность, генерируемая солнечными электростанциями;  $P_{\text{нак}}(t)$  – мощность накопителей электрической энергии;  $t$  – характерные моменты времени,  $t = [0; T]$  (в данном случае решение для одной точки – годового максимума нагрузки в последний год планирования);  $\Delta t$  – шаг по времени (в данном случае 1 час);  $UR_i$  – скорость увеличения мощности дизельного генератора;  $DR_i$  – скорость снижения мощности дизельного генератора;  $E_{st}^{\min}$  и  $E_{st}^{\max}$  – минимальная и максимальная величина емкостей накопителей электрической энергии.

# Определение параметров накопителей, необходимых для функционирования изолированных систем электроснабжения

$$OF_2 = \min(C_T + C_{ao} + C_{ндo} + C_{пот})$$

$C_T$  – годовые затраты на производство электроэнергии (стоимость топлива);

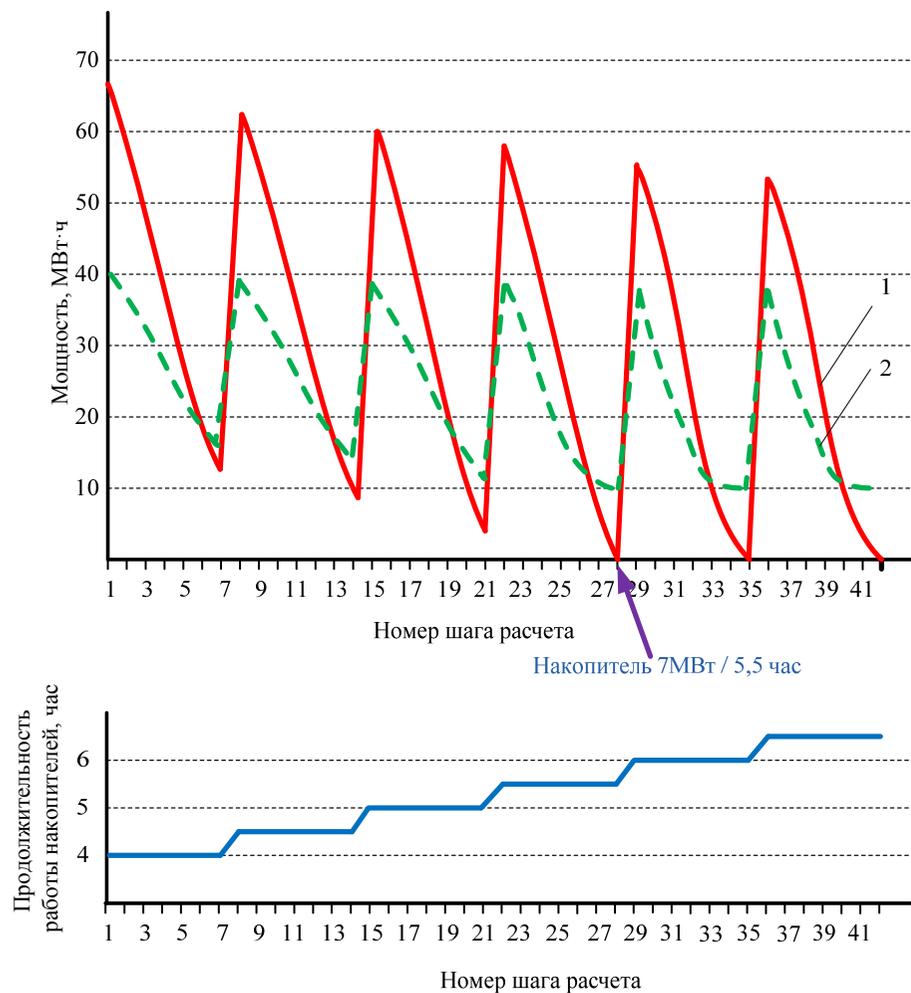
$C_{ao}$  – амортизационные отчисления на систему накопителей энергии;

$C_{пот}$  – стоимость электроэнергии от ВИЭ, неинтегрированной в изолированную систему электроснабжения, т.е. тот случай когда накопитель полностью заряжен и нет возможности накопить еще больше энергии от вырабатываемой ВИЭ

$C_{ндo}$  – стоимость электроэнергии, недоотпущенной потребителям (ущерб), т.е. случай, когда накопитель полностью разряжен и возникают проблемы с покрытием графика нагрузки

.

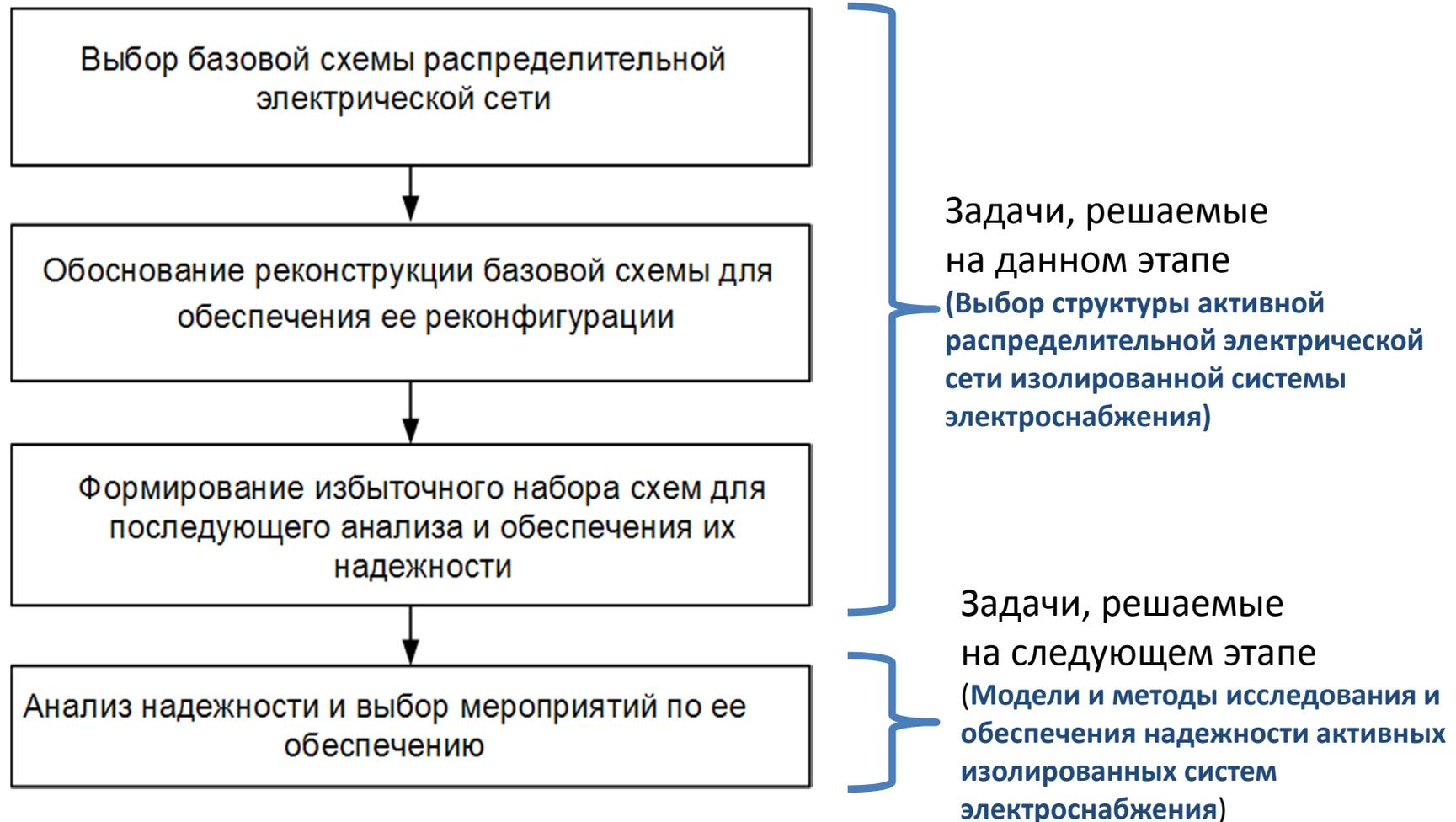
# Параметры накопителей



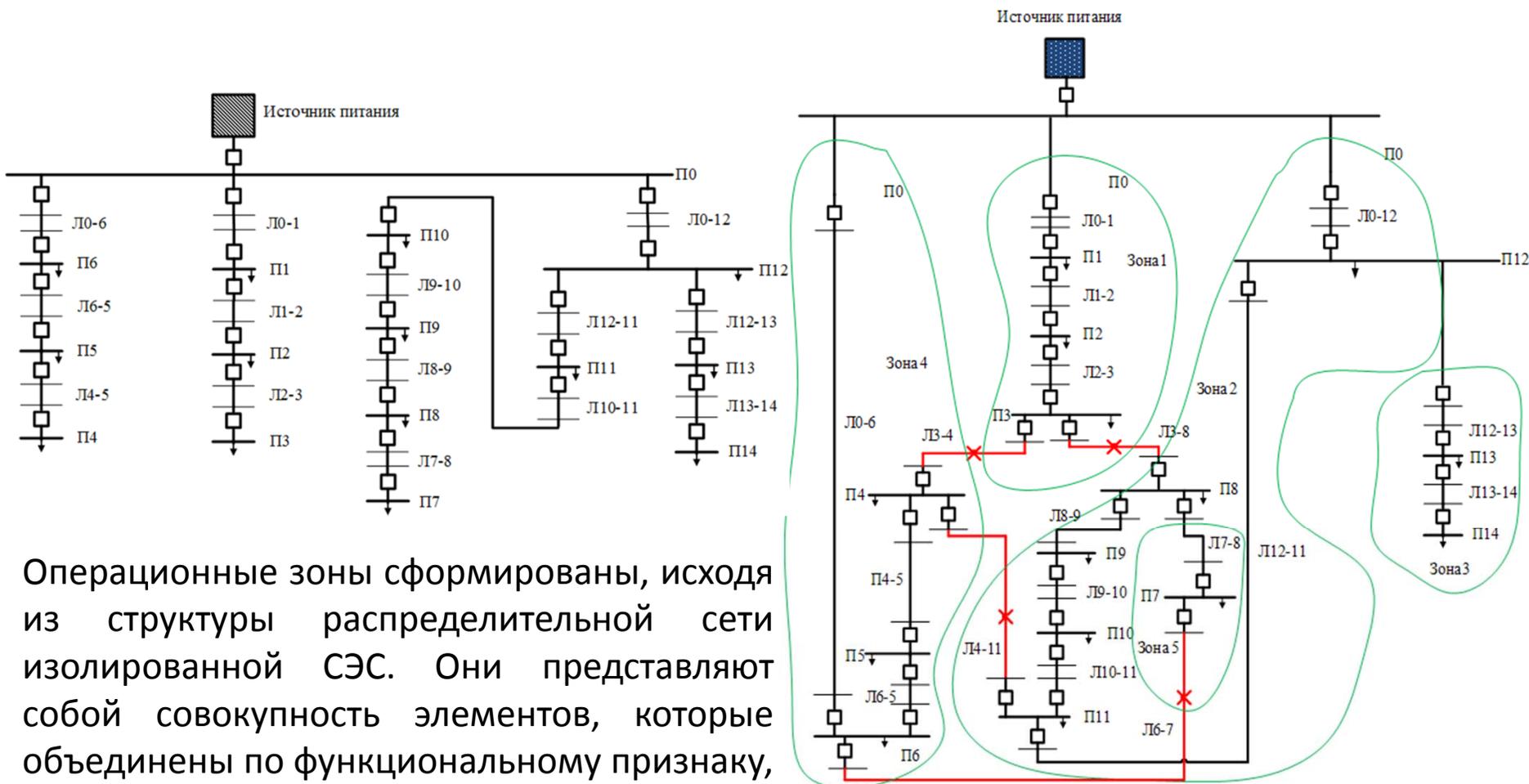
Шаг расчета	Продолжительность работы накопителей, час	Мощность накопителей, МВт	Шаг расчета	Продолжительность работы накопителей, час	Мощность накопителей, МВт
1	4	1	22	5,5	1
2	4	2	23	5,5	2
3	4	3	24	5,5	3
4	4	4	25	5,5	4
5	4	5	26	5,5	5
6	4	6	27	5,5	6
7	4	7	28	5,5	7
8	4,5	1	29	6	1
9	4,5	2	30	6	2
10	4,5	3	31	6	3
11	4,5	4	32	6	4
12	4,5	5	33	6	5
13	4,5	6	34	6	6
14	4,5	7	35	6	7
15	5	1	36	6,5	1
16	5	2	37	6,5	2
17	5	3	38	6,5	3
18	5	4	39	6,5	4
19	5	5	40	6,5	5
20	5	6	41	6,5	6
21	5	7	42	6,5	7

- 1 – неинтегрированная накопителями электроэнергия от ВИЭ  
 2 - недоотпуск электроэнергии

# Последовательность шагов по формированию распределительной сети



# Придание свойства активности распределительной электрической сети



Операционные зоны сформированы, исходя из структуры распределительной сети изолированной СЭС. Они представляют собой совокупность элементов, которые объединены по функциональному признаку, который определяется логикой работы дистанционно управляемыми коммутационными аппаратами.

# Показатели риска при оценке режимной надежности

$$R_{ky} = \sum_k p_k(D_k) \sum_{l=1}^n D_l y_{внl}$$

$n$  - число узлов схемы;

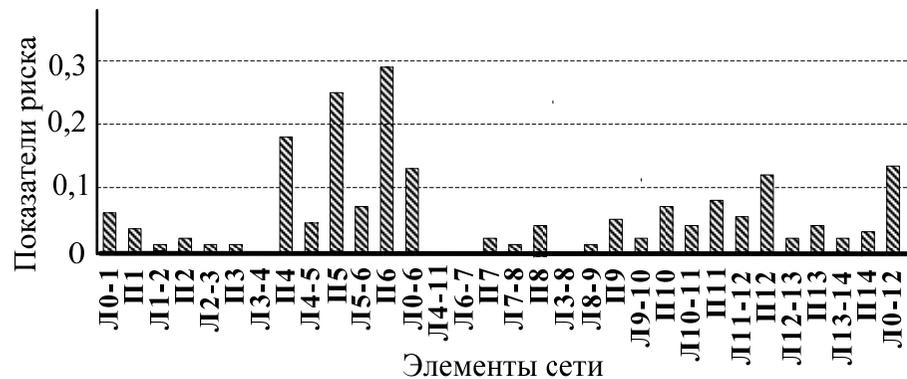
$D_k$  – величина возможного дефицита мощности в рассматриваемом состоянии  $k$  системы электроснабжения;

$p_k(D_k)$  – вероятность возникновения данного дефицита мощности;

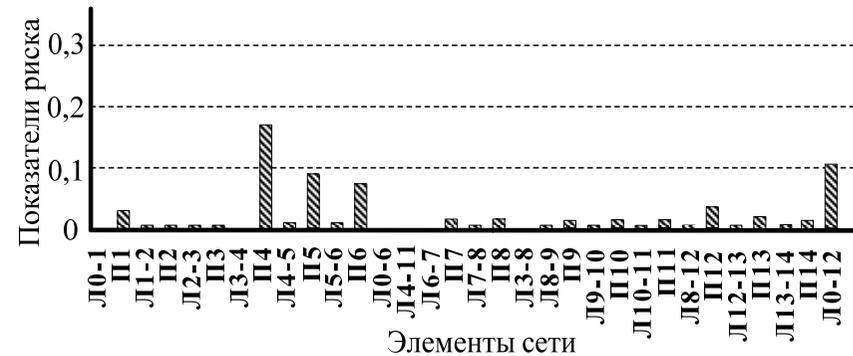
$D_l$  – величина потери мощности при отказе элементов;

$y_{внl}$  – удельный ущерб от внезапности дефицита мощности.

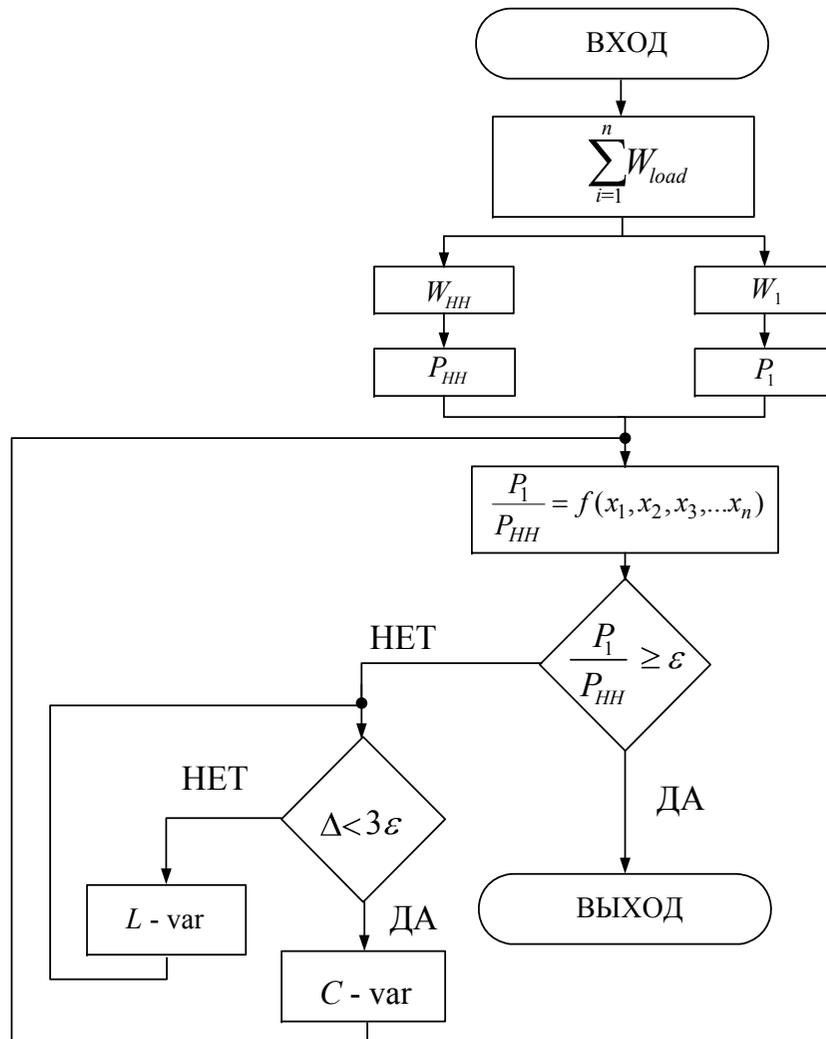
## Исходная сеть



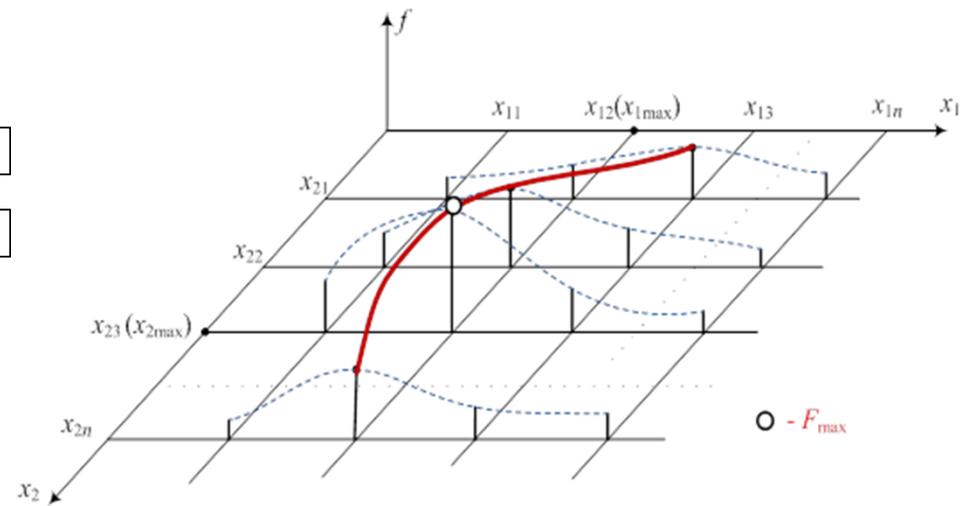
## Реконструированная сеть



# Алгоритм нахождения экстремума целевой функции



$$\frac{P_1}{P_{HH}} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

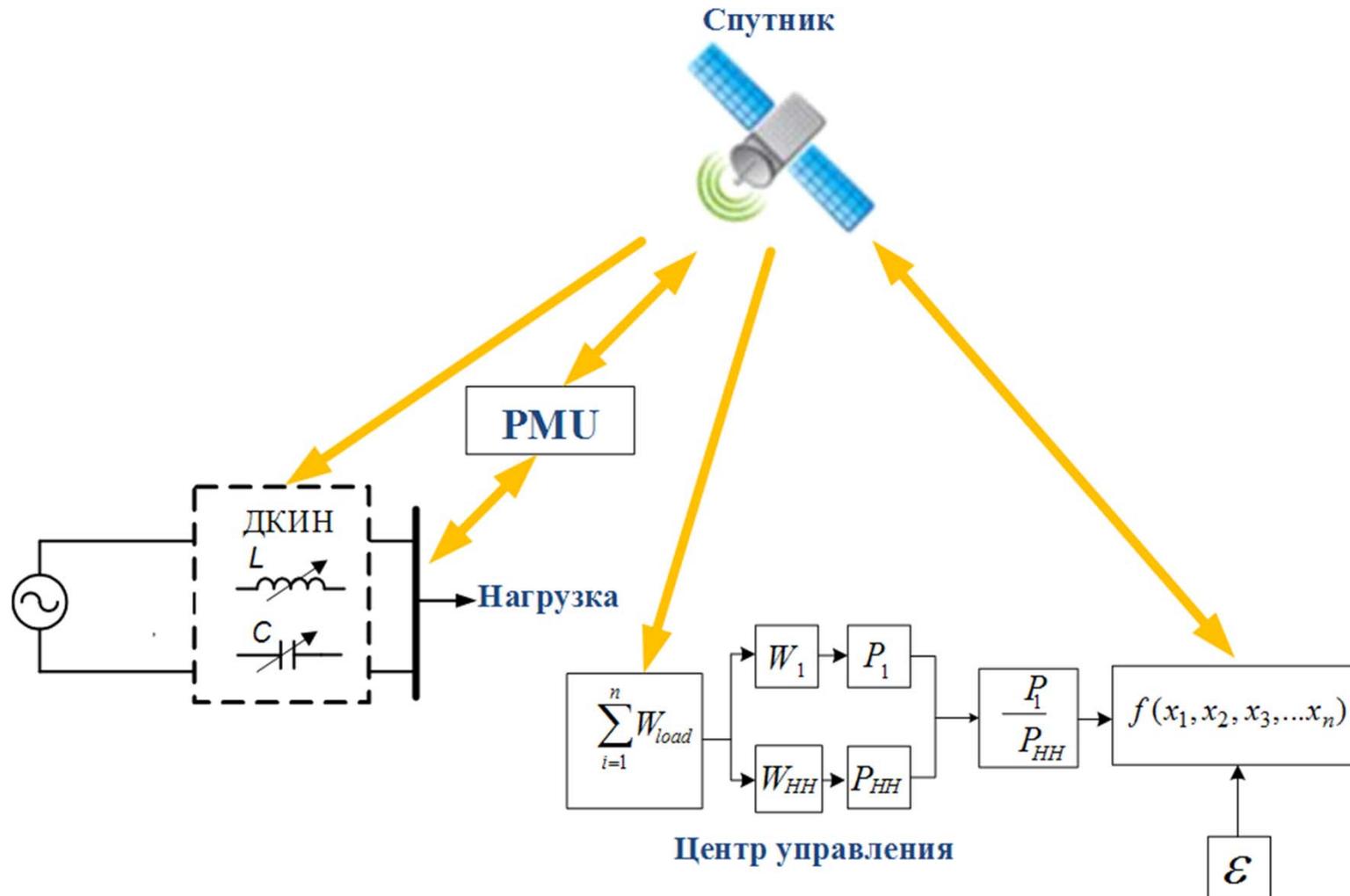


$$\frac{P_1}{P_{HH}} \geq \frac{1}{0,08} = 12,5$$

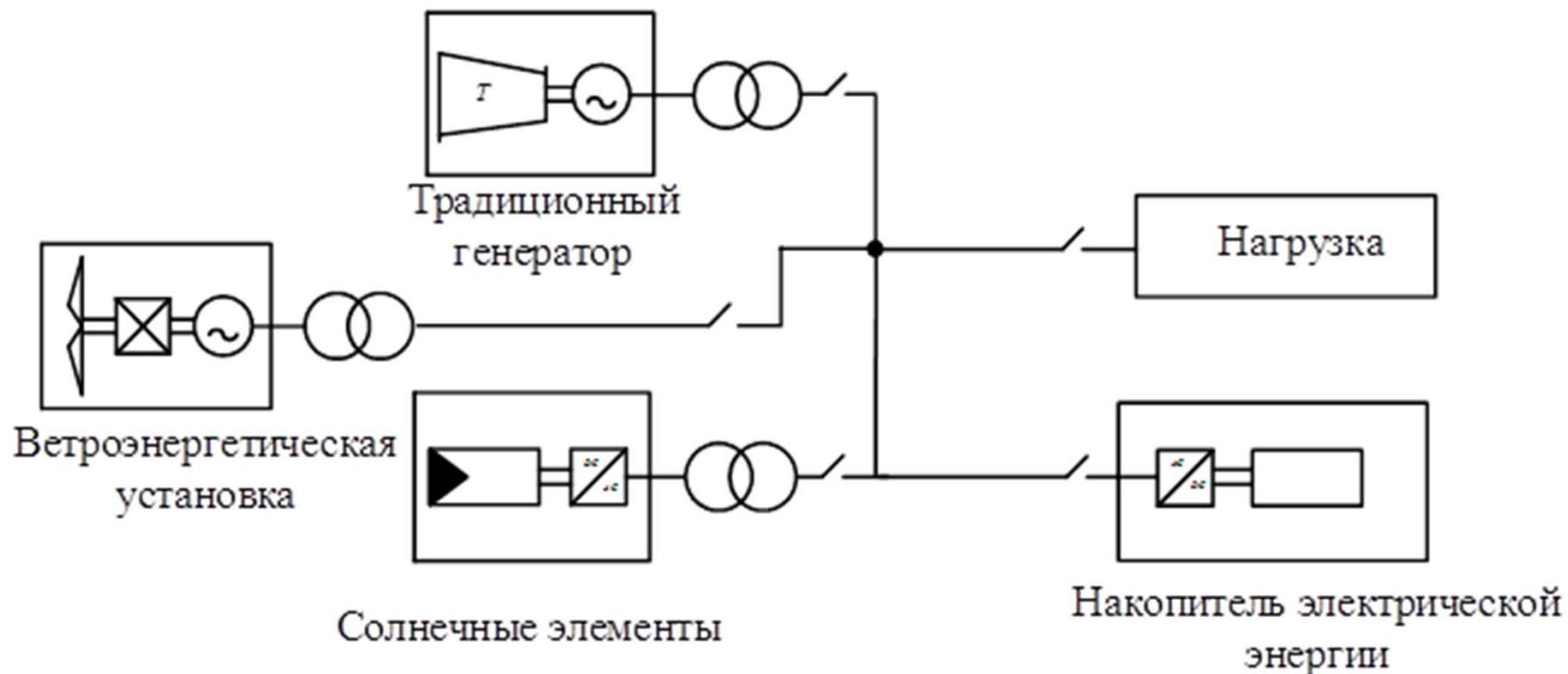
$P_1$  - мощность основной гармоники

$P_{HH}$  - мощность гармоник высших порядков 12

# Схема управления величиной гармонических составляющих высших порядков



## Схема тестовой изолированной системы



Наличие в изолированных СЭС генерирующих установок на базе ВИЭ, прежде всего ветроэнергетических установок с нестационарной выдачей мощности, может приводить к недопустимым отклонениям частоты и напряжений. Для гашения колебаний выдаваемой мощности в работе предложено использовать систему управления поворотом лопастей ветротурбины, работающей по принципу управления с прогнозирующей моделью.

## Динамическая модель ветрогенератора

$$Z(t) = \frac{\omega_T(t)R}{V(t)}; z(t) = \left( \frac{1}{Z(t) + 0,08b(t)} - \frac{0,035}{b^3(t) + 1} \right)^{-1};$$
$$C_p(t) = 0,22 \left( \frac{116}{z(t)} - 0,4b(t) - 5 \right) \exp \left( -\frac{12,5}{z(t)} \right);$$
$$M_T(t) = \frac{\rho S C_p(t) V^3(t)}{2\omega_T(t)}; \frac{d\omega_T}{dt} = \frac{M_T(t) - M_C(t)}{J}; \omega_T(0) = 0$$

$\omega_T$  - угловая скорость вращения элементов ветроустановки, град/с;

$M_T$  - крутящий момент, создающийся аэродинамической силой, м;

$R$  - радиус ветроколеса, м;

$M_C$  - электромагнитный момент, Н·м

$J$  - момент инерции движущихся частей ветровой турбины, кг

$\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  - ометаемая площадь лопастей ветротурбины, м<sup>2</sup>;

$b$  - угол наклона лопастей ветротурбины по нормали от направления ветра, град;

$V$  - скорость ветра, м/с;

$C_p$  - коэффициент использования энергии ветра;

$Z$  - быстроходность;

$z$  - текущее значение быстроходности.

# Реакция ветрогенератора на ВХОДНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Изменение угла наклона лопастей  $\Delta b$  и скорости ветра  $\Delta V$

$$\begin{cases} x_1^{b_1}(t, \omega_1) = -10(e(t) - e(t - \omega_1)), \\ x_2^{V_1}(t) = 5e(t) \end{cases}$$

$$x_1 = \Delta b, x_2 = \Delta V$$

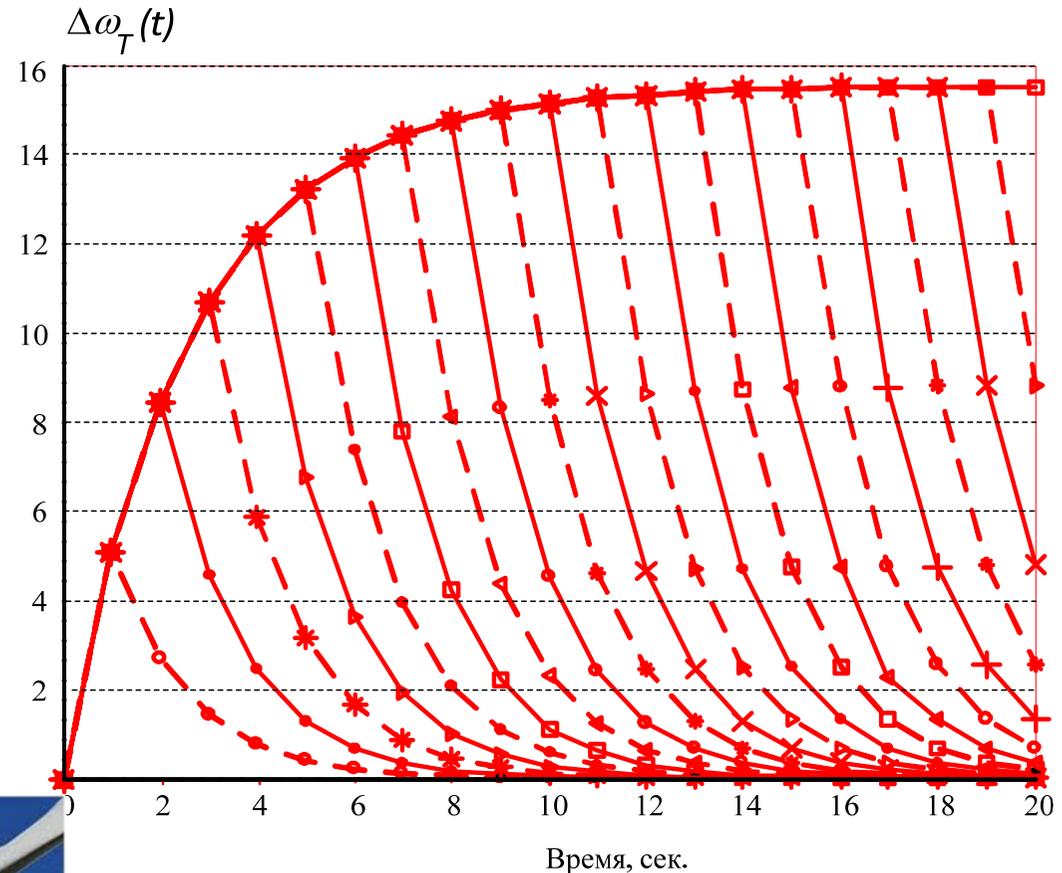
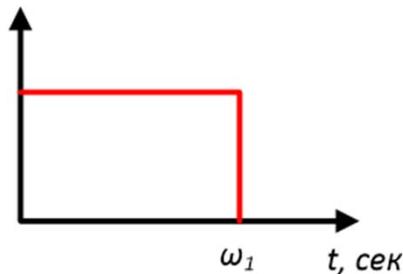
$$t \in [0, 20]$$

Длительность входных сигналов

$$\omega_1 = j \cdot h, \quad j = \overline{1, 20}$$

$$h = 1c$$

Тип входного сигнала



# Управление уровнями напряжений и частоты в изолированной системе электроснабжения

## Величины тока, активной и реактивной мощности в точке подключения ветрогенератора

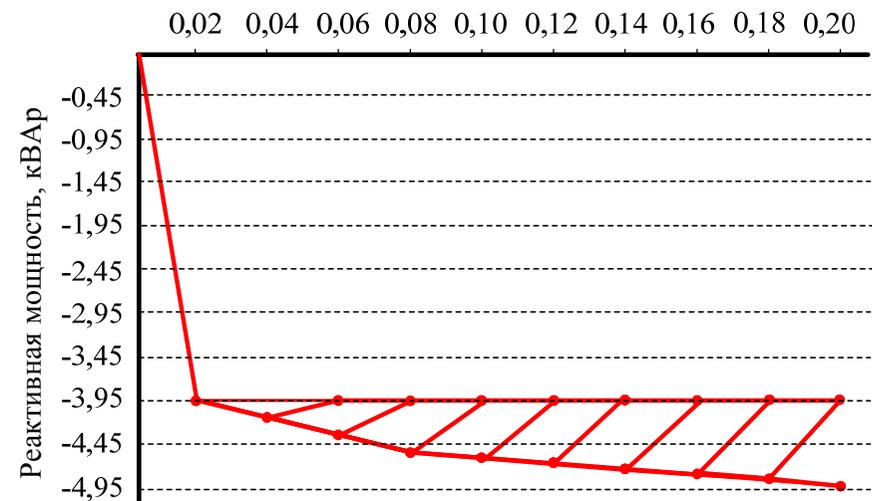
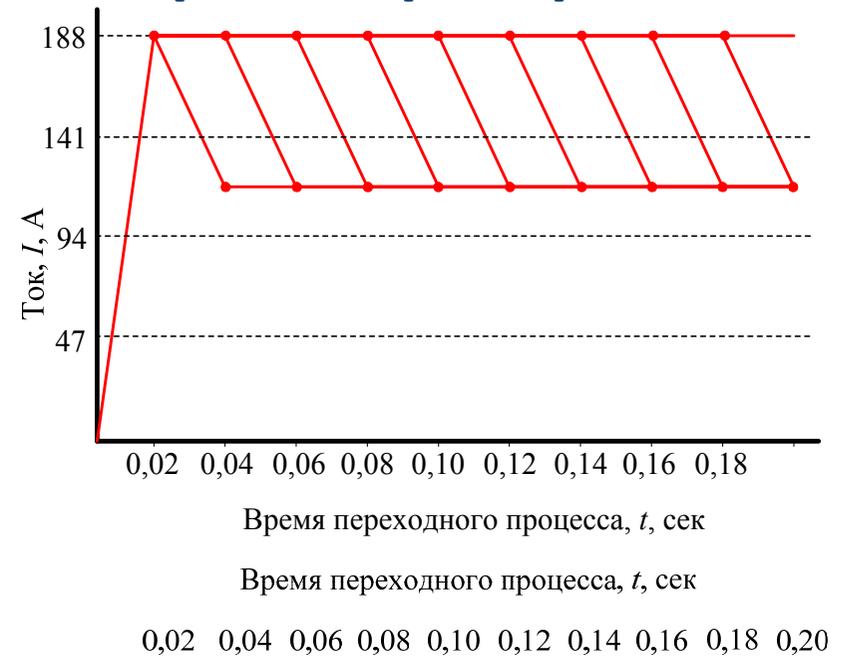
Реакция тестовой системы на входные возмущения:

$$S(t, \omega) = 10(e(t) - e(t - \omega))$$

$e(t)$  – функция Хевисайда

$S$ - полная мощность системы

Математический аппарат позволяет работать с быстродействующими процессами и корректно (по Адамару) решать задачу по идентификации динамических систем.



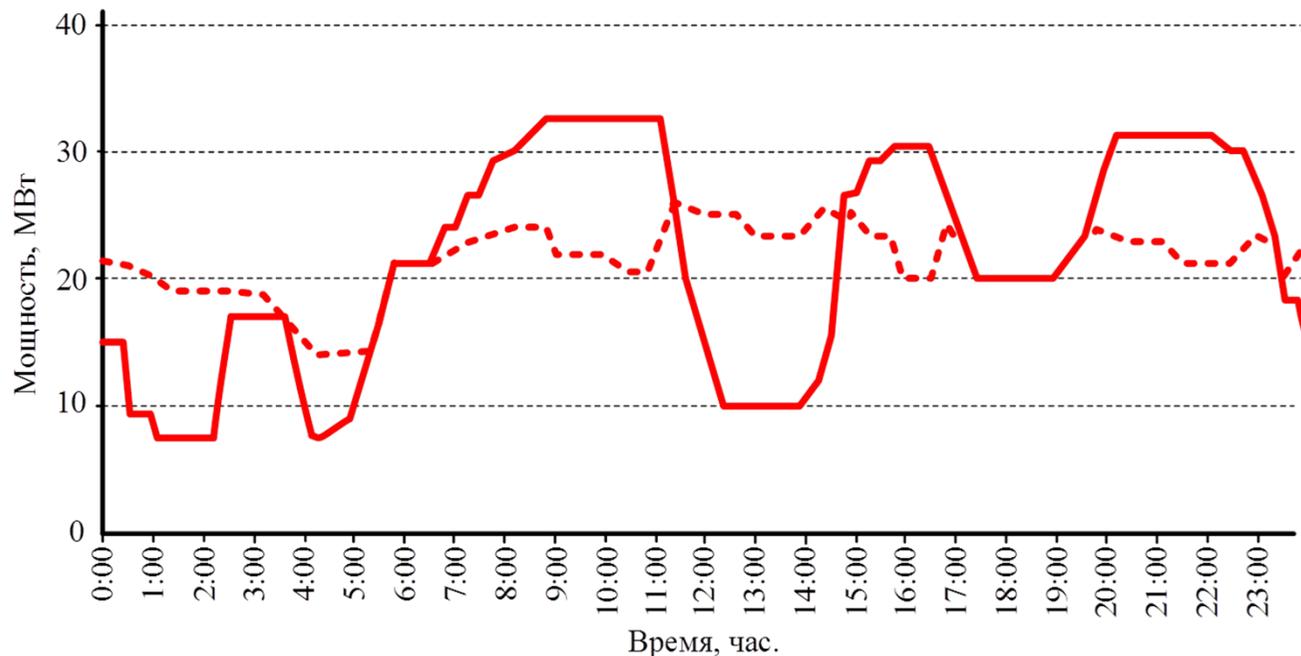
# Управление энергопотреблением

$$\min \sum_k |P_{rk} - P_{r\text{ср}}|, \quad k = \overline{1, K}$$

Ограничения

$$P_{rk \text{ min}} \leq P_{rk} \leq P_{rk \text{ max}}$$

$k$  – номер временного интервала графика нагрузки,  $P_{r\text{ср}}$  – средняя мощность графика нагрузки потребителей,  $P_{rk}$  – текущее (усредненное) значение мощности графика нагрузки на интервале  $k$  графика нагрузки,  $K$  – количество интервалов времени, на которые разбивается график нагрузки  $P_{r \text{ min}}$ ,  $P_{r \text{ max}}$  – технологические ограничения на значения мощности нагрузки в интервале  $k$ .



# Выводы

Разработана методология обоснования развития активных изолированных систем электроснабжения на основе иерархического подхода, позволяющего обосновывать создание новых и реконструкцию существующих систем.

Разработаны методические основы решения задач развития активных изолированных систем электроснабжения с учетом требований надежности электроснабжения, качества электроэнергии и использования управления электропотреблением, базирующиеся на идеологии метода декомпозиции Бендерса.

Разработаны методические принципы определения оптимальных параметров накопителей электрической энергии в изолированных СЭС с высокой долей генерации на базе возобновляемых источников энергии.

# Выводы

Показана необходимость использования принципа активности изолированной распределительной электрической сети и возможность его реализации. Разработан метод обеспечения надежности активных изолированных систем электроснабжения посредством реконфигурации распределительной электрической сети.

Для обеспечения необходимого качества электрической энергии в изолированных СЭС разработана методика распределенного мониторинга и управления гармоническими колебаниями тока и напряжения.

Разработана методика регулирования графиков нагрузок потребителей, применение которой позволяет снизить суммарную мощность генерации, необходимой для электроснабжения потребителей рассматриваемой системы электроснабжения.

**Спасибо за внимание !**

**[dr.souslov@yandex.ru](mailto:dr.souslov@yandex.ru)**