

Критерии контроля участия генерирующего оборудования в нормированном первичном регулировании частоты

1. Математические обозначения

$P_{\text{ном}}$ – номинальная (установленная) мощность генерирующего оборудования;

$P_{\text{макс}}$ – верхняя граница регулировочного диапазона генерирующего оборудования;

$P_{\text{мин}}$ – нижняя граница регулировочного диапазона генерирующего оборудования;

$P_{\text{пл}}(t)$ – плановая мощность генерирующего оборудования;

$P_{\text{факт}}(t)$ – фактическая активная мощность генерирующего оборудования;

$\Delta f_p(t)$ – расчетное отклонение частоты;

$P_{\text{пт}}(t)$ – требуемая первичная мощность генерирующего оборудования;

$P_{\text{пф}}(t)$ – фактическая первичная мощность генерирующего оборудования ($P_{\text{пф}}(t) = P_{\text{факт}}(t) - P_{\text{пл}}(t)$);

\mathbf{x} или \mathbf{Y} (написание полужирным шрифтом) – массив, состоящий из нескольких элементов: $\mathbf{x} = \{x_i, i = 1..N\}$, $\mathbf{Y} = \{Y_j, j = 1..M\}$ (здесь, i, j – индексы элементов массивов, N, M – количество элементов массивов);

$\text{sgn}(x)$ – функция сигнум x :
$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

\equiv – знак тождественности;

$|x|$ – модуль числа x ;

$\lfloor x \rfloor$ – наибольшее целое, меньше или равно x ;

$\tilde{f}(t)$ – обработанная фильтром низких частот функция $f(t)$;

t_x – момент нарушения;

t_{x1}, t_{x2} – границы временного интервала, на котором происходит нарушение;

\mathbf{R} – множество действительных (вещественных) чисел;

\mathbf{R}^+ – множество положительных действительных (вещественных) чисел;

\in – принадлежность к множеству;

\exists, \forall – кванторы существования и всеобщности;

$M(f(t))$ – математическое ожидание функции $f(t)$;

$D(f(t))$ – дисперсия функции $f(t)$;

$\sigma(f(t))$ – среднеквадратичное отклонение функции $f(t)$;

$\max(x; y)$ – максимальное из двух чисел x и y ;

$x^* = \arg \min_{x \in X} f(x)$ – обозначение того, что точка $x^* \in X$ является точкой минимума функции f на множестве X .

2. Общие положения

Критерии контроля участия генерирующего оборудования в НПРЧ реализованы с использованием мер нарушений.

Мера нарушения – числовая скалярная функция, вычисляемая на временном интервале в зависимости от исходных данных: фактической мощности $P_{\text{факт}}(t)$, частоты $f(t)$ или требуемой первичной мощности $P_{\text{пт}}(t)$, величин мёртвой полосы и статизма.

Выявление нарушений осуществляется с использованием граничного значения меры (граничной меры) следующим образом:

- если мера нарушения больше или равна граничной мере, то принимается решение о наличии нарушения;
- если мера нарушения меньше граничной меры, то принимается решение об отсутствии нарушения.

Граничные значения меры по каждому из критериев и параметры алгоритмов указаны в Приложении 1.

При контроле оказания услуг по НПРЧ используются следующие критерии:

1. Непредоставление информации;
2. Несоответствие шага по времени передаваемых параметров требуемому;
3. Непредоставление диапазона первичного регулирования;
4. Несоответствие дискретности регистрации измерений требуемой;
5. Неавтоматический режим САУМ;
6. Недостаточная точность поддержания мощности;
7. Несоответствие величины мертвой полосы/статизма первичного регулирования требуемой;
8. Отсутствие адекватной/должной реакции при изменении частоты;
9. Наличие колебательного процесса.

3. Критерий 1. «Непредоставление информации»

Данный критерий предназначен для выявления нарушения требований к предоставлению информации об оказании услуг по НПРЧ.

Мерой нарушения является суммарное время непредоставления информации.

3.1. Используемая информация:

- Массив значений измерений мощности генерирующего оборудования [МВт] за час – $P = \{P_i, i = 1..n\}, n = 3601$.
- Массив значений измерений частоты генерирующего оборудования [Гц] за час – $f = \{f_i, i = 1..n\}, n = 3601$.
- Массив значений измерений эталонной частоты [Гц] за час – $f_{эт} = \{f_{эт,i}, i = 1..n\}, n = 3601$.
- Массив значений плановой мощности генерирующего оборудования [МВт] за час – $P_{plan} = \{P_{plan,i}, i = 1..n\}, n = 3601$.
- Уставка нижней границы для проверки достоверности мощности – $P_{дост,min}$.
- Уставка верхней границы для проверки достоверности мощности – $P_{дост,max}$.

Параметры алгоритма:

- Минимальное допустимое значение частоты $f_{min,доп}$ [Гц].
- Максимальное допустимое значение частоты $f_{max,доп}$ [Гц].
- Максимальное допустимое отклонение частоты от эталонной частоты $\Delta f_{max,доп}$ [Гц].
- Максимальное допустимое количество повторяющихся значений по частоте $N_{max,f}$.
- Максимальная допустимая величина несоответствия значения сигнала мощности и плановой мощности $P_{несоот,max}$ [МВт].
- Максимальное допустимое количество повторяющихся значений по мощности $N_{max,P}$.
- Максимальное допустимое суммарное время непредоставления информации $t_{max,доп}$.
- Максимальное допустимое суммарное время несоответствия значений сигнала мощности и плановой мощности $t_{max,несоот}$ [сек].

3.2. Алгоритм решения:

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 1.

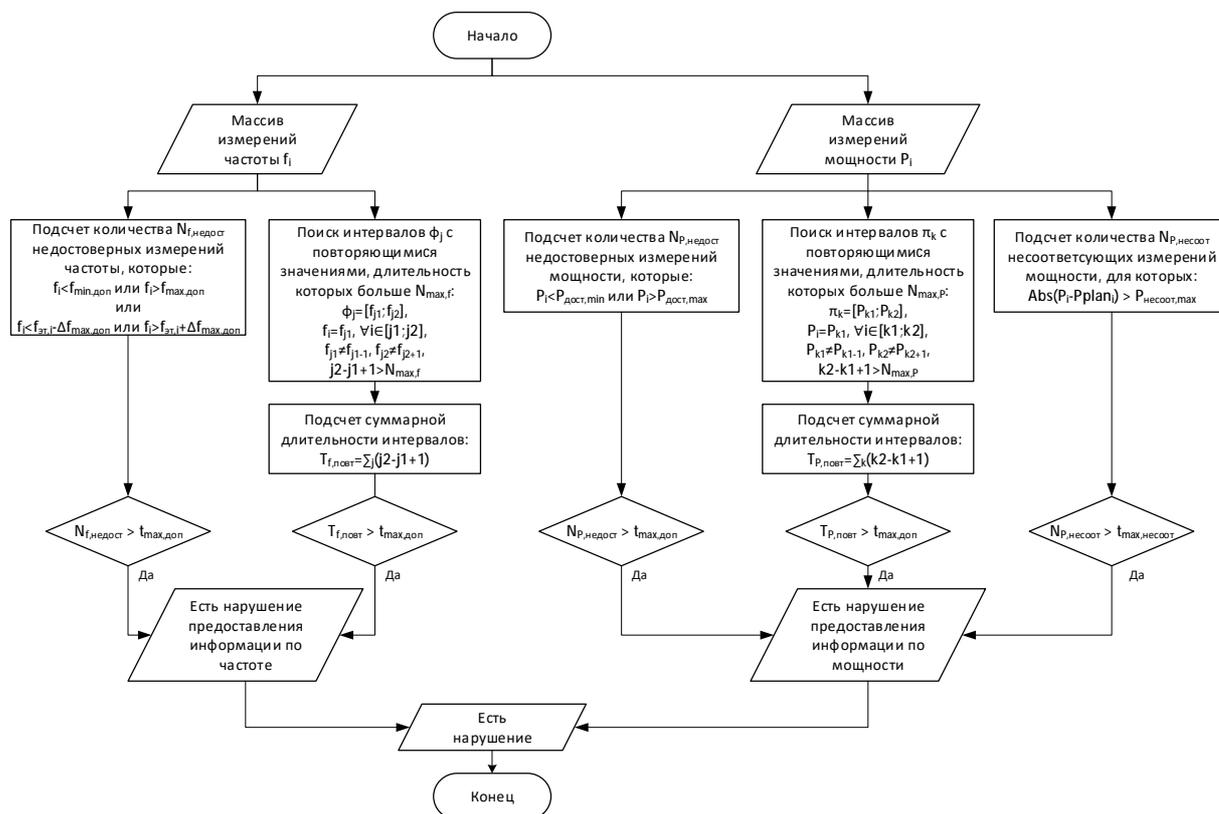


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма "Непредоставление информации"

3.3. Результаты решения:

- Признак наличия нарушения предоставления информации по частоте.
- Признак наличия нарушения предоставления информации по мощности.
- Признак наличия нарушения по критерию «Непредоставление информации».

4. Критерий 2. «Несоответствие шага по времени передаваемых параметров требуемому»

Данный критерий предназначен для выявления случаев несоответствия шага по времени, с которым производится регистрации параметров генерирующего оборудования требованиям Стандарта.

Мерой нарушения является суммарное за час превышение шагов по времени по трем сигналам: частоты, фактической мощности и плановой мощности – максимально допустимого шага по времени.

4.1. Используемая информация:

- Массив меток времени [сек] сигнала частоты за час – $t_f = \{t_{f,i}, i = 1..n_1\}$.
- Массив меток времени [сек] сигнала фактической мощности за час – $t_P = \{t_{P,i}, i = 1..n_2\}$.

- Массив меток времени [сек] сигнала плановой мощности за час – $t_{P_{пл}} = \{t_{P_{пл},i}, i = 1..n_3\}$.
- Параметр алгоритма – граничное значение меры ε .

4.2. Алгоритм решения:

1. Вычисление шагов по времени сигналов частоты, фактической и плановой мощности – как разницы между последовательными значениями меток времени.

$$\Delta t_{f,i} = t_{f,i+1} - t_{f,i}$$

$$\Delta t_{P,i} = t_{P,i+1} - t_{P,i}$$

$$\Delta t_{P_{пл},i} = t_{P_{пл},i+1} - t_{P_{пл},i}$$

2. Вычисление меры нарушения m – суммарного за час по трем сигналам превышения шагов по времени максимально допустимого шага по времени.

$$m = \sum_i \max(\Delta t_{f,i} - 1; 0) + \sum_i \max(\Delta t_{P,i} - 1; 0) + \sum_i \max(\Delta t_{P_{пл},i} - 1; 0)$$

где 1 – максимально допустимый шаг по времени [сек].

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 2.

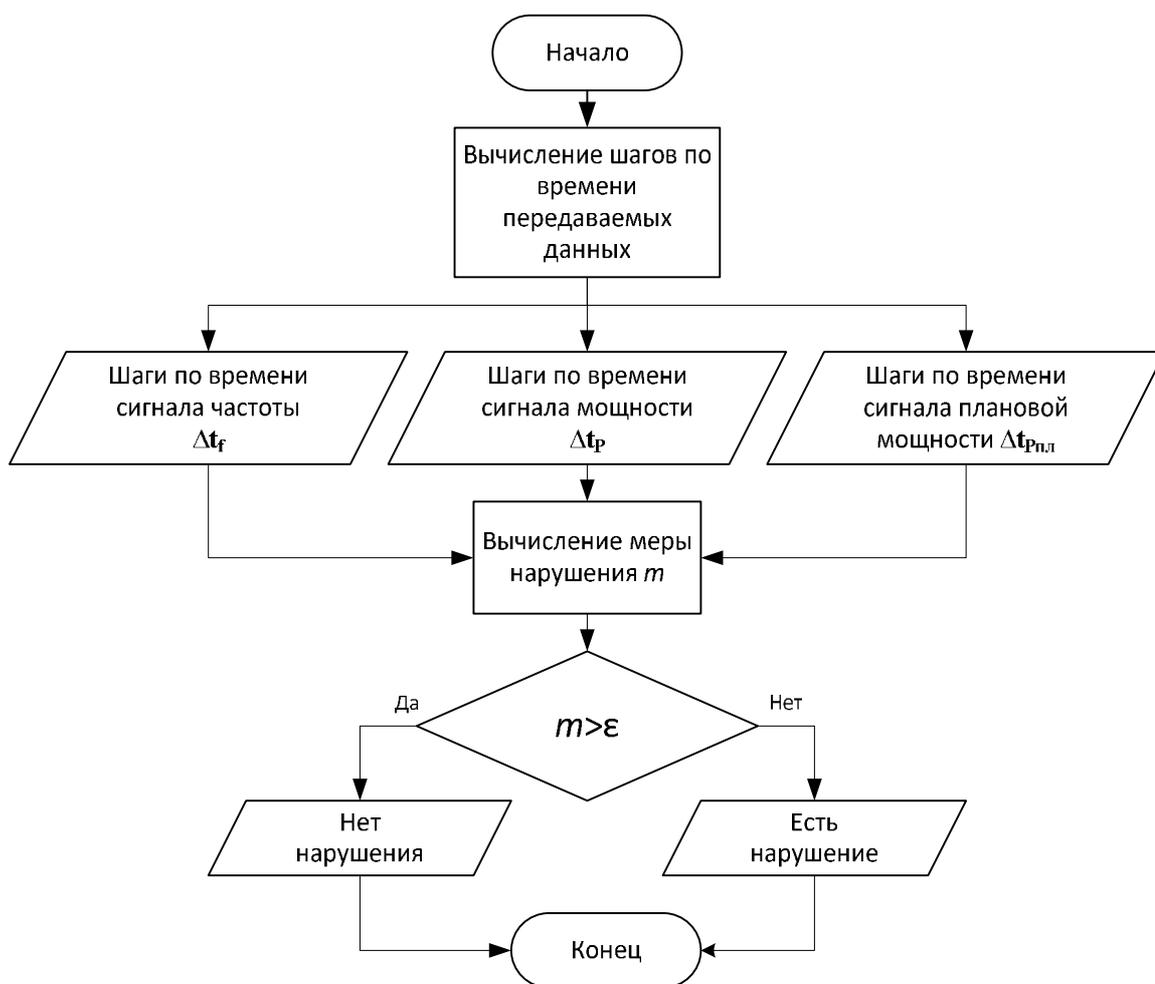


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма "Несоответствие шага по времени передаваемых параметров требуемому"

4.3. Результаты решения:

- Значение меры нарушения.
- Признак наличия нарушения по критерию «Несоответствие шага по времени передаваемых параметров требуемому».

5. Критерий 3. «Непредоставление диапазона первичного регулирования»

Критерий предназначен для выявления случаев несоответствия технических параметров технологического режима работы генерирующего оборудования в части предоставления диапазона первичного регулирования. В соответствии с условиями Договора Исполнитель обязан обеспечить соответствие параметров технологического режима работы генерирующего оборудования включая предоставление диапазона первичного регулирования указанным в Договоре. Непредоставлением диапазона первичного регулирования считается выход величины мощности генерирующего оборудования за пределы, определенные величиной резерва первичного регулирования, на величину, превышающую 1% от $R_{ном}$

при отсутствии выхода частоты за пределы мёртвой полосы первичного регулирования.

Мерой нарушения является суммарная в течение часа продолжительность периодов времени, когда требуемый диапазон не был предоставлен.

5.1. Используемая информация:

- Массив измерений частоты за отчетный час [Гц] – $f = \{f_i, i = 1..n\}$, $n=3600$.
- Массив значений фактической мощности генерирующего оборудования за тот же отчетный час – $P_{\text{факт}} = \{P_{\text{факт},i}, i = 1..n\}$, $n = 3600$.
- Номинальная (установленная) мощность генерирующего оборудования [МВт] – $P_{\text{ном}}$.
- Граничное значение суммарного времени выхода за допустимые границы [сек] – $T_{\text{вых,гр}}$.

5.2. Алгоритм решения:

1. Вычисление верхней $P_{\text{вг}}$ и нижней $P_{\text{нг}}$ допустимых границ фактической мощности с учетом требуемой величины резерва в 5% (7%) $P_{\text{ном}}$ и допустимой точности регулирования в $\pm 1\% P_{\text{ном}}$:

$$P_{\text{вг}} = P_{\text{макс}} - 0,05(0,07) \cdot P_{\text{ном}} + 0,01 \cdot P_{\text{ном}}$$
$$P_{\text{нг}} = P_{\text{мин}} + 0,05(0,07) \cdot P_{\text{ном}} - 0,01 \cdot P_{\text{ном}}$$

2. Вычисление суммарного за отчетный час времени выхода фактической мощности за допустимые границы – количество секунд, в которые фактическая мощность была больше верхней границы или меньше нижней границы и в которые расчетное отклонение частоты было равно нулю:

$$T_{\text{вых}} = \sum_{\substack{i \in [1;3600], \\ P_{\text{факт},i} > P_{\text{вг}} \text{ или } P_{\text{факт},i} < P_{\text{нг}} \\ \Delta f_{p,i} = 0}} 1$$

3. Если $T_{\text{вых}} > T_{\text{вых,гр}}$, то принимается решение о наличии нарушения по критерию «непредоставление диапазона первичного регулирования» на данном часовом интервале.

5.3. Результаты решения:

- Суммарное за отчетный час время выхода фактической мощности за допустимые границы [сек] – $T_{\text{вых}}$.
- Признак наличия нарушения по критерию «непредоставление диапазона первичного регулирования».

6. Критерий 4. «Несоответствие дискретности регистрации измерений требуемой»

Данный критерий предназначен для выявления случаев нарушения требований Договора к предоставляемой информации об оказании услуг в части дискретности регистрации измерений и заданий мощности и частоты.

Мерами нарушения являются первые значения распределений абсолютных, отличных от нуля, приращений измерений мощности и частоты.

6.1. Используемая информация:

- Массив значений измерений мощности генерирующего оборудования [МВт] за час – $\mathbf{P} = \{P_i, i = 1..n\}, n = 3601$.
- Массив значений измерений частоты генерирующего оборудования [Гц] за час – $\mathbf{f} = \{f_i, i = 1..n\}, n = 3601$
- Номинальная (установленная) мощность генерирующего оборудования [МВт] – $P_{ном}$.
- Максимально допустимая дискретность регистрации измерений мощности [% $P_{ном}$] – d_p .
- Максимально допустимая дискретность регистрации измерений частоты [Гц] – d_f .
- Параметр алгоритма – граничное значение меры ε .

6.2. Алгоритм решения:

1. Вычисление абсолютных приращений измерений мощности и частоты как модуля разницы между последовательными измерениями.

$$\Delta P_i = |P_{i+1} - P_i|, \quad \Delta f_i = |f_{i+1} - f_i|$$

2. Вычисление распределения отличных от нуля приращений измерений мощности и частоты.

$$p_{P,i} = \sum_{\substack{j \\ \Delta P_j > 0 \\ d_p * i \geq \Delta P_j > d_p * (i-1)}} \Delta P_j, \quad p_{f,i} = \sum_{\substack{j \\ \Delta f_j > 0 \\ d_f * i \geq \Delta f_j > d_f * (i-1)}} \Delta f_j$$

3. Определение мер нарушения – первые значения распределений мощности и частоты: $p_{P,1}$ и $p_{f,1}$

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 3.

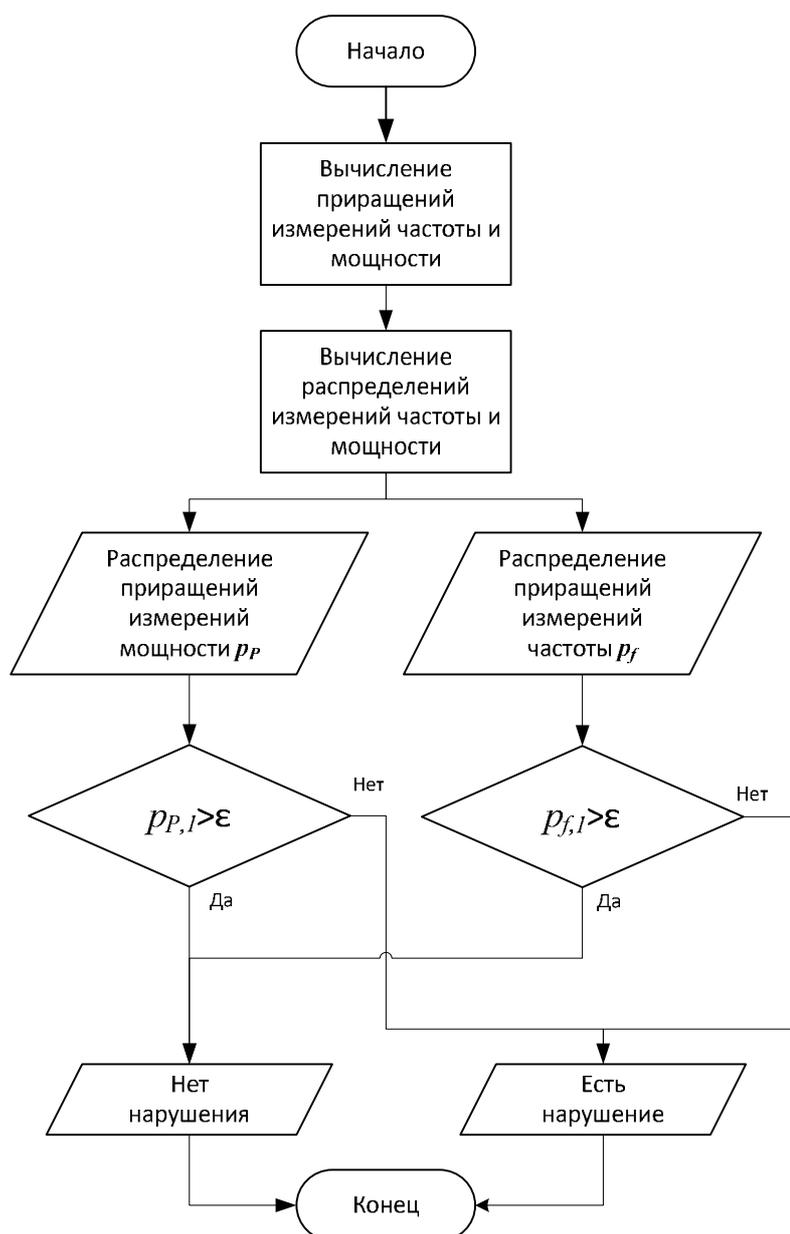


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма "Несоответствие дискретности измерений требуемым"

6.3. Результаты решения:

- Массив значений распределения приращений измерений мощности $\mathbf{p}_p = \{p_{p,i}, i = 1..m_1\}$.
- Массив значений распределения приращений измерений частоты – $\mathbf{p}_f = \{p_{f,i}, i = 1..m_2\}$.
- Признак наличия нарушения дискретности измерения мощности.
- Признак наличия нарушения дискретности измерения частоты.

7. Критерий 5. «Неавтоматический режим САУМ»

Данный критерий предназначен для выявления случаев нарушения требований Стандарта, в соответствии с которыми участие генерирующего оборудования в НПРЧ должно осуществляться действием САУМ (САРЧМ, САУ ГА), обеспечивающей регулирование

мощности генерирующего оборудования в пределах регулировочного диапазона в полностью автоматическом режиме с динамическими и статическими характеристиками, установленными Стандартом. Основным признаком, используемым для определения нарушения, является нарушение условия кусочно-монотонного характера графика плановой мощности генерирующего оборудования (заданной мощности гидроагрегата). По определению монотонность нарушается в каждой такой точке строгого локального экстремума. Таким образом, алгоритм критерия основывается на поиске на графике плановой мощности точек строгих локальных экстремумов.

Мерой нарушения является количество точек строгих локальных экстремумов.

7.1. Используемая информация:

- Массив значений времени [сут] – $t = \{t_i, i = 1..n\}$. Шаг дискретизации – $\frac{1}{60 \cdot 60 \cdot 24}$ сут. Длительность анализируемого интервала – 30 минут ($n = 1801$).
- Массив значений плановой мощности [МВт] – $P_{пл} = \{P_{пл,i} \equiv P_{пл}(t_i), i = 1..n\}$.
- Параметр алгоритма – чувствительность (пороговое значение среднеквадратичного отклонения) – p_1 .
- Параметр алгоритма – максимальный размер окна – p_2 [сек].
- Параметр алгоритма – проверять скорость изменения плановой мощности или нет.
- Параметр алгоритма – предельное значение скорости изменения плановой мощности – p_3 [% $P_{ном}$ /мин].
- Параметр алгоритма – граничное значение меры – предельное количество точек экстремумов – $M_{гр}$.

7.2. Алгоритм решения:

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 4.

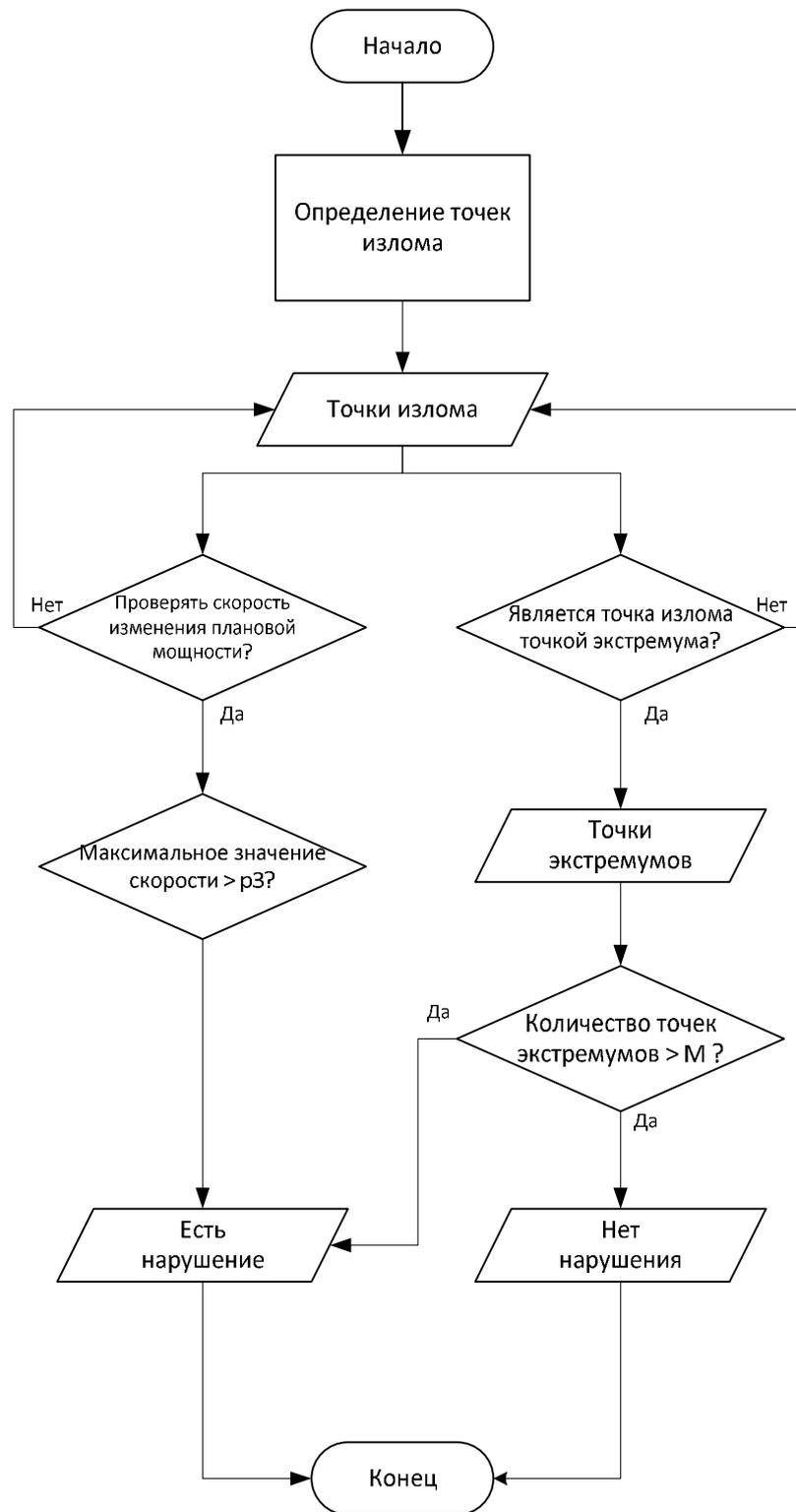


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма "Неавтоматический режим САУМ"

Алгоритм решения:

left – указатель левой границы окна (индекс элемента в массиве t_i)

right – указатель правой границы окна.

В начале: **left = 1, right = left + 1**

Далее в цикле:

1. Из графика плановой мощности «вырезается» кусок (окно) от t_{left} до t_{right} .

2. «Вырезанный» кусок аппроксимируется прямой.

$$t = \{t_i, i = le t \dots r ght\}, P = \{P_i, i = le t \dots r ght\} \rightarrow k_1, b_1, \sigma$$

3. В случае наклонного тренда выполняется нормировка точности аппроксимации – считается её проекция на нормаль к аппроксимирующей прямой.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{\sqrt{(1 + k_1^2)}}$$

4. Далее, если $\sigma_1 > p_1$, то:

– Значения $t_{r ght - 1}$ $P_{r ght - 1}$ сохраняются в массив $t_{и}$, $P_{и}$ соответственно (это точка излома);

– Участок графика плановой мощности на участке от $t_{le t}$ до $t_{r ght - 1}$ считается линейным (на нем нет изломов). Этот участок аппроксимируется прямой. Функция аппроксимации возвращает параметры прямой k, b . Коэффициент наклона этой прямой k – есть производная линейного куска графика плановой мощности слева в точке излома. Для корректной работы алгоритма необходимо на данном шаге округлить значение k до пятого знака после запятой:

$$\tilde{k} = [10^5 \cdot k] \cdot 10^{-5}$$

Это значение добавляется в массив $k_{и}$.

– Указатель $le t$ ставится в точку излома: $le t = r ght - 1$

5. $r ght$ увеличивается на 1.

6. Ограничивается размер окна, если он превысил заданное значение.

7. Проверяем: если $r ght - le t > p_2$, то $le t = le t + 1$.

Цикл повторяется до тех пор, пока $r ght$ не достигнет последнего элемента в исходном массиве t .

В цикле пробегается весь массив $k_{и}$ и проверяется: если $k_{и,j} \cdot k_{и,j-1} < 0$, то значения P_{j-1}, t_{j-1} сохраняются в массив $P_{э}, t_{э}$ соответственно. (Это точка строгого экстремума).

Если количество точек экстремумов больше $M_{гр}$, принимается решение о наличии на этом интервале нарушения по критерию «неавтоматический режим САУМ».

При контроле скорости изменения плановой мощности вычисляется её максимальное значение на интервале:

$$k_{max} = \frac{\max_i (|k_{и,i}|) \cdot 100}{P_{НОМ} \cdot 24 \cdot 60}, \quad [\%P_{НОМ}/\text{мин}]$$

Если $k_{max} > p_3$, то принимается решение о наличии нарушения по критерию «неавтоматический режим САУМ».

7.3. Результаты решения.

- Точки изломов – массивы значений времени, плановой мощности, значений производных плановой мощности слева в точках изломов $P_{и}$ [МВт], $t_{и}$ [сут], $k_{и}$ [МВт/сут].
- Точки экстремумов – массивы значений времени и плановой мощности в точках экстремумов – $P_э$ [МВт], $t_э$ [сут].
- Максимальное на интервале значение скорости изменения плановой мощности – k_{max} [%Pном/мин].
- Признак наличия нарушения по критерию «неавтоматический режим САУМ».

8. Критерий 6. «Недостаточная точность поддержания мощности»

Данный критерий предназначен для выявления случаев нарушения требований Стандарта в части точности поддержания мощности, которым должно отвечать генерирующее оборудование и оборудование регулирования частоты для целей оказания услуг по НПРЧ.

Под недостаточной точностью поддержания мощности понимается отклонение фактического значения мощности от требуемой, на величину, превышающую 1% от номинальной (установленной) мощности генерирующего оборудования.

Мерой нарушения является суммарная в течение часа продолжительность периодов времени, когда отклонение фактической мощности от требуемой превышает 1% от Pном.

8.1. Используемая информация:

- Массив заданий плановой мощности генерирующего оборудования [МВт] за отчетный час – $P_{пл} = \{P_{пл,i}, i = 1..n\}, n = 3600$.
- Массив значений требуемой первичной мощности, рассчитанной в соответствии со Стандартом [МВт], за тот же отчетный час – $\Delta P_{пт} = \{\Delta P_{пт,i}, i = 1..n\}, n = 3600$.
- Номинальная (установленная) мощность генерирующего оборудования [МВт] – $P_{ном}$.
- Граничное значение суммарного времени выхода за допустимые границы [сек] – $T_{вых,гр}$.

8.2. Алгоритм решения:

1. Вычисление верхней $P_{вг}$ и нижней $P_{нг}$ допустимых границ фактической мощности:

$$P_{вг,i} = P_{пл,i} + \max_{j \in [i-30; i]} P_{пт,j} + 0,01 \cdot P_{ном}$$

$$P_{нг,i} = P_{пл,i} + \min_{j \in [i-30;i]} P_{пт,j} - 0,01 \cdot P_{ном}$$

где 30 – допустимая задержка изменения мощности при первичном регулировании [сек].

2. Вычисление суммарного за отчетный час времени выхода фактической мощности за допустимые границы – количество секунд, в которые фактическая мощность была больше верхней границы или меньше нижней границы:

$$T_{вых} = \sum_{\substack{i \in [1;3600], \\ P_{факт,i} > P_{вг,i} \text{ или } P_{факт,i} < P_{нг,i}}} 1$$

3. Если $T_{вых} > T_{вых,гр}$, то принимается решение о наличии нарушения по критерию «недостаточная точность поддержания мощности» на данном часовом интервале.

8.3. Результаты решения.

- Значения верхней допустимой границы фактической мощности [МВт] – $P_{вг} = \{P_{вг,i}, i = 1..n\}, n = 3600$.
- Значения нижней допустимой границы фактической мощности [МВт] – $P_{нг} = \{P_{нг,i}, i = 1..n\}, n = 3600$.
- Суммарное за отчетный час время выхода фактической мощности за допустимые границы [сек] – $T_{вых}$.
- Признак наличия нарушения по критерию «недостаточная точность поддержания мощности».

9. Критерий 7. «Несоответствие величины мёртвой полосы/статизма первичного регулирования требуемой»

В соответствии с условиями Договора Исполнитель обязан обеспечить соответствие параметров технологического режима работы генерирующего оборудования включая мертвую полосу и статизм первичного регулирования указанным в Договоре. Статизм и мертвая полоса определяются как параметры функции регрессии между отклонениями частоты Δf и отклонениями мощности генерирующего оборудования ΔP . Функция регрессии отображает зависимость условного математического ожидания ΔP от Δf . Функция регрессии определяет соответствующую регрессионную модель, отражающую основную статическую характеристику первичного регулирования генерирующего оборудования.

В алгоритме производится уточнение оценки статизма. Коррекция оценки статизма вычисляется с использованием обученной искусственной нейронной сети. Обученная нейронная сеть размещена в открытом доступе в глобальной сети Интернет на сайте Системного Оператора.

Мерами нарушения являются отклонения по модулю оценок величин статизма и мёртвой полосы от требуемых.

9.1. Используемая информация:

- Массив измерений частоты [Гц] – $f = \{f_i, i = 1..n\}$.
- Массив измерений фактической мощности генерирующего оборудования [МВт] для тех же моментов времени, в которые выполнены измерения частоты $P_{\text{факт}} = \{P_{\text{факт},i}, i = 1..n\}$.
- Массив заданий плановой мощности генерирующего оборудования [МВт] для тех же моментов времени, в которые выполнены измерения частоты – $P_{\text{пл}} = \{P_{\text{пл},i}, i = 1..n\}$.
- Номинальная (установленная) мощность генерирующего оборудования [МВт] – $P_{\text{ном}}$.
- Требуемая величина мёртвой полосы [Гц] – $MP_{\text{треб}}$.
- Требуемое значение статизма [%] – $S_{\text{треб}}$.
- Параметр алгоритма – допустимое отклонение оценки мёртвой полосы от требуемой величины мёртвой полосы [Гц] – $\varepsilon_{\text{мп}}$.
- Параметр алгоритма – допустимое отклонение оценки статизма от требуемого статизма [%] – ε_s .

9.2. Алгоритм решения:

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 5.

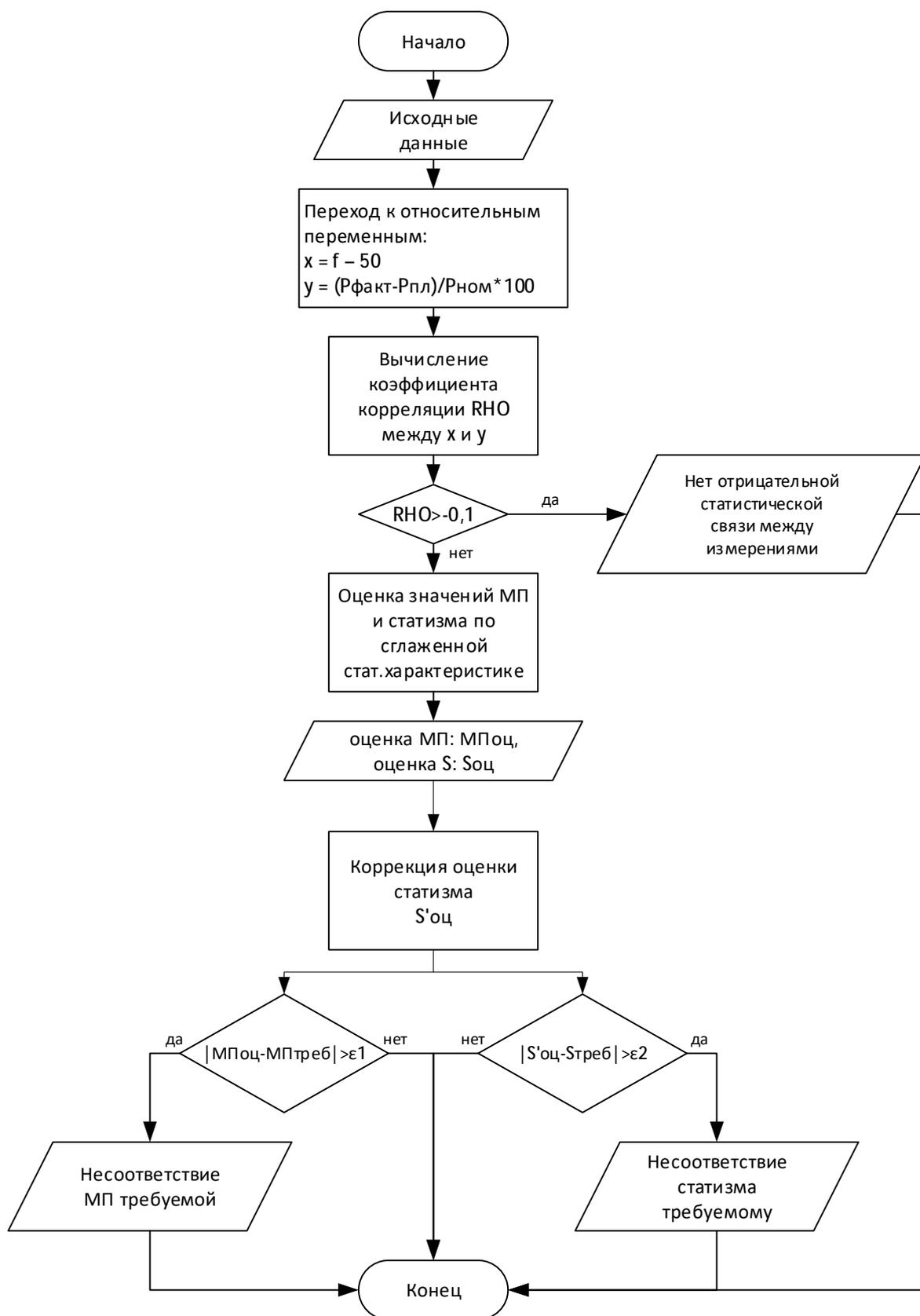


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма "Несоответствие мертвой полосы и статизма требуемым"

Алгоритм решения:

1. Переход от исходных переменных $f, P_{\text{факт}}, P_{\text{пл}}$ к относительным x, y :

$$x_i \equiv \Delta f_i = f_i - 50, \quad y_i \equiv \Delta P_i = \frac{P_{\text{факт},i} - P_{\text{пл},i}}{P_{\text{ном}}} \cdot 100$$

2. Вычисление линейного коэффициента корреляции RHO между x и y

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad M_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$RHO = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - M_y)^2}}$$

3. Проверка наличия отрицательной статистической зависимости между x и y . При нормальной работе генерирующего оборудования в режиме НПРЧ данная статистическая зависимость должна иметь место. Её отсутствие может свидетельствовать, например, об увеличении расширения мёртвой полосы в ЧК более требуемой. Считается, что отрицательная статистическая зависимость отсутствует при

$$RHO > -0,1$$

4. Оценка параметров функции регрессии y по x . Оценка выполняется методом наименьших квадратов, в котором численными методами находится минимум функционала

$$\Phi(\theta_1, \theta_2, p) = \sum_{i=1}^n \left(y_i - f_{\text{рег}}(x_i; \theta_1, \theta_2, p) \right)^2$$

где:

$f_{\text{рег}}(x_i; \theta_1, \theta_2, p)$ – функция регрессии с параметрами θ_1, θ_2, p :

$$f_{\text{рег}}(x_i; \theta_1, \theta_2, p) = \begin{cases} -\theta_2 \cdot (x_i - \text{sgn}(x_i) \cdot \theta_1), & |x| > \theta_1 + p \\ 0 & |x| < \theta_1 - p \\ -\text{sgn}(x_i) \cdot \frac{\theta_2}{4p} \cdot (x_i - \text{sgn}(x_i) \cdot (\theta_1 - p)), & \theta_1 - p \leq |x| \leq \theta_1 + p \end{cases}$$

θ_1 – величина мёртвой полосы;

θ_2 – коэффициент пропорциональности между требуемой первичной мощностью и расчетным отклонением частоты (обратно пропорционален статизму);

p – параметр, определяющий величину сглаживания функции регрессии относительно требуемой статической характеристики первичного регулирования.

Функционал $\Phi(\theta_1, \theta_2, p)$ является достаточно гладким и выпуклым, поэтому для нахождения его минимума можно воспользоваться одним из стандартных алгоритмов, обеспечивающим требуемую точность, например, алгоритмом градиентного спуска. Требуемая точность

нахождения минимума функционала определяется точностью алгоритма данного критерия (должна быть не более). В результате нахождения минимума функционала получаются оценки параметров функции регрессии:

$$\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{p}$$

5. Оценка величины мёртвой полосы и оценка статизма определяются

$$\widehat{\text{МП}} = \hat{\theta}_1, \quad \hat{S} = \frac{200}{\hat{\theta}_2}$$

6. Коррекция оценки статизма.

6.1. Симметризация распределения отклонений частоты:

$$\hat{x} = \{|x|; -|x|\}$$

6.2. Расчет статистик распределения отклонений частоты – стандартного отклонения $\sigma_{\hat{x}}$ и коэффициента эксцесса:

$$k_{\hat{x}} = \frac{M\left((\hat{x} - M(\hat{x}))^4\right)}{\sigma_{\hat{x}}^4}$$

6.3. Расчет скорректированного значения оценки статизма с использованием обученной искусственной нейронной сети:

$$\hat{S}' = \hat{S} + 5,022 - ne(\sigma_{\hat{x}}; k_{\hat{x}})$$

7. При отклонении оценки величины мёртвой полосы от требуемого значения мёртвой полосы

$$|\widehat{\text{МП}} - \text{МП}_{\text{треб}}| > \varepsilon_{\text{мп}}$$

принимается решение о несоответствии величины мёртвой полосы требуемой.

При отклонении оценки статизма от требуемого статизма

$$|\hat{S}' - S_{\text{треб}}| > \varepsilon_s$$

8. Принимается решение о несоответствии статизма требуемому.

9.3. Результаты решения:

- Линейный коэффициент корреляции **RHO**.
- Признак отсутствия отрицательной статистической связи между измерениями частоты и мощности.
- Оценка значения мёртвой полосы $\widehat{\text{МП}}$.
- Оценка значения статизма \hat{S} .
- Признак наличия нарушения по критерию «несоответствие величины мёртвой полосы требуемой».
- Признак наличия нарушения по критерию «несоответствие статизма первичного регулирования требуемому».

10. Критерий 8. «Отсутствие адекватной/должной реакции при изменении частоты»

Критерий предназначен для выявления нарушений фактического участия в регулировании в течение рассматриваемого часа. Критерий выявляет несоответствие между требуемой первичной мощностью, которую должно реализовать генерирующее оборудование в соответствии с требованиями Стандарта, и фактической первичной мощностью. Признаком соответствия или несоответствия является условие повторения графиком фактической первичной мощности формы графика требуемой первичной мощности. Повторяемость формы в данном алгоритме определяется через производные.

Мерой нарушения является величина минимального на отрезке заданной длительности от данного момента времени отклонения значения производной фактической мощности от значения производной требуемой первичной мощности в данный момент времени.

10.1. Используемая информация:

- Массив значений времени [сек] – $t = \{t_i, i = 1..n\}$, дискретность измерений 1 секунда.
- Массив значений требуемой первичной мощности, рассчитанной в соответствии со Стандартом [МВт] – $\Delta P_{пт} = \{\Delta P_{пт,i}, i = 1..n\}$.
- Массив значений фактической мощности [МВт] – $P_{факт} = \{P_i, i = 1..n\}, n = 3600$.
- Массив заданий плановой мощности генерирующего оборудования [МВт] – $P_{пл} = \{P_{пл,i}, i = 1..n\}$.
- Параметр алгоритма – ширина окна фильтра скользящего среднего для сглаживания значений первичной мощности [сек] – w_1 .
- Параметр алгоритма – ширина окна фильтра скользящего среднего для сглаживания значений производных первичной мощности [сек] – w_2 .
- Параметр алгоритма – Δt .
- Параметр алгоритма – граничное значение меры – ε_1
- Параметр алгоритма – ε_2 .

10.2. Алгоритм решения.

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 6.



Рисунок 6. Блок-схема алгоритма "Отсутствие адекватной/должной реакции при изменении частоты"

Алгоритм решения:

1. Переход от исходных переменных $\Delta P_{пт,i}$, $P_{факт}$, $P_{пл}$ к относительным x , y :

$$x_i = \frac{\Delta P_{пт,i}}{P_{ном}} \cdot 100, \quad y_i = \frac{P_{факт,i} - P_{пл,i}}{P_{ном}} \cdot 100$$

2. Применение фильтра скользящего среднего к сигналам x , y :

$$\tilde{x} = \text{AVG}(x, w_1), \quad \tilde{y} = \text{AVG}(y, w_1)$$

где w_1 – параметр фильтра – ширина окна, сек.

3. Вычисление производных с помощью разностной схемы:

$$x'_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i-1}}{1}, \quad x'_0 = 0$$
$$y'_i = \frac{\tilde{y}_i - \tilde{y}_{i-1}}{1}, \quad y'_0 = 0$$

5. Применение фильтра скользящего среднего (см. Приложение 2) к сигналам x', y' :

$$\tilde{x}' = \text{AVG}(x', w_2), \quad \tilde{y}' = \text{AVG}(y', w_2)$$

где w_2 – параметр фильтра – ширина окна, сек.

Вычисление мер нарушения на интервале:

$$M_i = \min_{j \in [i; i+\Delta]} |\tilde{x}'_i - \tilde{y}'_j|$$

6. При существовании такого момента (наличии такого i), при котором

$$M_i > \varepsilon_1 \text{ и } |\tilde{x}'_i| > \varepsilon_2$$

принимается решение об отсутствии адекватной/должной реакции.

10.3. Результаты решения:

- Массивы сглаженных значений требуемой и фактической первичной мощности – \tilde{x}, \tilde{y} .
- Массивы сглаженных значений производных требуемой и фактической первичной мощности – \tilde{x}', \tilde{y}' .
- Массив мер нарушения на интервале – $M_i, i = 1..n$.
- Признак наличия нарушения по критерию «отсутствие адекватной/должной реакции».

11. Критерий 9. «Наличие колебательного процесса»

Данный критерий предназначен для выявления случаев возникновения нежелательных колебаний активной мощности генерирующего оборудования.

В основе критерия лежит использование функции автокорреляции (автокорреляционной функции, АКФ) сигнала фактической мощности генерирующего оборудования. Наличие пиков в функции автокорреляции некоего сигнала означает наличие колебательной составляющей в этом сигнале с соответствующим периодом. Перед вычислением функции автокорреляции выполняется фильтрация исходного сигнала фактической мощности с помощью полосового фильтра в целях выделения нежелательных частот, которые лежат в диапазоне от 0,01 Гц до 0,1 Гц.

Мерой нарушения по данному критерию является значение функции автокорреляции сигнала фактической мощности в точке первого

локального максимума, следующего за первым локальным минимумом.

11.1. Используемая информация:

- Массив значений времени [сек] – $t = \{t_i, i = 1..n\}$, дискретность измерений 1 секунда.
- Массив значений фактической мощности [МВт] – $P = \{P_i, i = 1..n\}$.
- Массив расчетных отклонений частоты [Гц] – $\Delta f_p = \{\Delta f_{p,i}, i = 1..n\}$.
- Параметр использования числа периодов колебаний
- $R_{пер} = \begin{cases} 1, & \text{если используется} \\ 0, & \text{если не используется} \end{cases}$
- Граничное значение числа периодов колебаний – $N_{пер.гр}$

11.2. Алгоритм решения:

1. С целью выделения искомым нежелательных частот выполняется предварительная фильтрация исходного сигнала активной мощности. Фильтрация осуществляется с помощью полосового фильтра, основанного на фильтре скользящего среднего.

Исключение из исходного сигнала высокочастотных шумовых составляющих выполняется фильтром скользящего среднего с параметром (шириной окна) равным 9:

$$P_1 = \text{AVG}(P, 9)$$

Исключение низкочастотных составляющих, соответствующих плавно (медленно) меняющемуся тренду, выполняется с помощью фильтра скользящего среднего с параметром (шириной окна) равным 70:

$$O = P_1 - \text{AVG}(P_1, 70)$$

Сигнал $O(t)$ представляет собой колебания мощности на искомым нежелательных частотах относительно нуля.

2. Разбиваем рассматриваемый интервал на пересекающиеся отрезки длиной в 121 секунд. Каждый следующий отрезок получается путем сдвига границ предыдущего на 10 секунд.

3. Поочередно для отрезков вычисляется автокорреляционная функция (АКФ) сигнала мощности:

$$R_{P,i} = \frac{\sum_k^N O_{i+k} \cdot O_i}{\sum_1^N O_i^2}$$

4. Для АКФ определяются значения γ_P и $T_{\gamma,P}$ сигнала мощности:

$$T_{\gamma,P} = \min T_{loc \text{ ax}}, \quad \gamma_P = R_P(T_{\gamma,P})$$

где

$$T_{loc \text{ ax}} = \{t_i : R_P(t_{i-1}) < R_P(t_i) \text{ и } R_P(t_i) > R_P(t_{i+1})\}$$

$T_{loc\ ax}$ – массив точек локальных максимумов функции R_p .

5. При значении γ_p большем или равным 0,6 и при периоде $T_{\gamma,p}$, лежащем в диапазоне от 5 до 100 секунд, происходит переход к шагу 6. В противном случае происходит переход к следующему отрезку (п.3).

6. На данном отрезке производится фильтрация (сглаживание) сигнала расчетных отклонений частоты при помощи фильтра скользящего среднего с параметром 9.

$$\widetilde{\Delta f_p} = \text{AVG}(\Delta f_p, 9)$$

7. Вычисляются значения автокорреляционной функции (АКФ) $R_{f,i}$ сигнала расчетных отклонений частоты $\widetilde{\Delta f_p}$.

8. Определяется значение АКФ сигнала расчетных отклонений частоты в точке $T_{\gamma,p}$

$$\gamma_{f,p} = R_f(T_{\gamma,p})$$

9. При значении $\gamma_{f,p}$, меньших 0,5, и параметре $p_{пер} = 0$ выносится решение о присутствии автоколебаний на данном отрезке и, соответственно, на всем интервале. При $p_{пер} = 1$ происходит переход к пункту 10.

10. Число периодов колебаний может служить дополнительным критерием выявления нарушения. На отрезках рассматриваемого интервала, определенных в пункте 2, вычисляются значения АКФ сигнала мощности в точке $T_{\gamma,p}$

$$R_p^{(j)}(T_{\gamma,p}), \quad j - \text{номер отрезка}$$

11. Определяется $T_{st\ rt}$, как время начала первого отрезка, на котором $R_p^{(j_1)}(T_{\gamma,p}) > 0,5$, и $T_{e\ d}$, как время конца последнего отрезка, на котором $R_p^{(j_n)}(T_{\gamma,p}) > 0,5$.

12. Количество периодов определяется по формуле:

$$N_{пер} = \frac{T_{st\ rt} - T_{e\ d}}{T_{\gamma,p}}$$

13. Если $N_{пер} > N_{пер,гр}$, то принимается решение о наличии нарушения по критерию «наличие колебательного процесса» на данном интервале.

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 7.

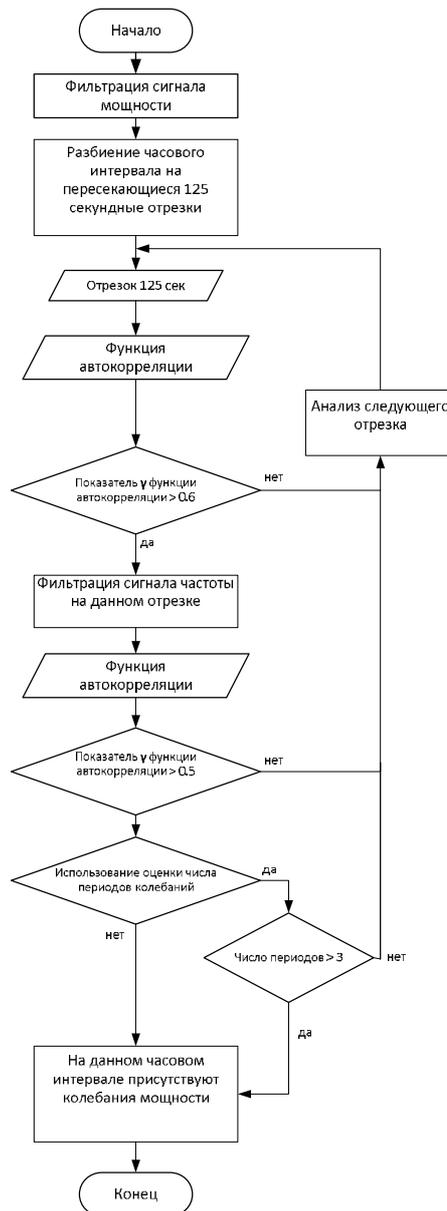


Рисунок 7. Блок-схема алгоритма "Наличие колебательного процесса"

11.3. Результаты решения:

- Признак наличия нарушения по критерию «наличие колебательного процесса»: 1 – есть нарушение, 0 – нет нарушения.

12. Карта граничных мер и параметров алгоритмов критериев контроля участия генерирующего оборудования в нормированном первичном регулировании частоты

Параметры и меры	Значение / граничное значение
Критерий 1. «Непредоставление информации»	
минимальное допустимое значение частоты	48 Гц
максимальное допустимое значение частоты	52 Гц
максимальное допустимое отклонение частоты от эталонной частоты	0,015 Гц
максимальное допустимое количество повторяющихся значений по частоте	10
максимальное допустимое количество повторяющихся значений по мощности	10
максимальная допустимая величина несоответствия значений мощности и плановой мощности	100 МВт
граничная мера - максимальное допустимое суммарное время непредоставления информации	60 сек
граничная мера – максимальное допустимое суммарное время несоответствия значений мощности и плановой мощности	100 сек
Критерий 2. «Несоответствие шага по времени передаваемых параметров требуемому» (не применяется)	
максимально допустимый шаг по времени	1 сек
граничная мера - максимальное допустимое суммарное за час превышение шагов по времени по трем сигналам: частоты, фактической мощности и плановой мощности - максимально допустимого шага по времени	20 сек
Критерий 3. «Непредоставление диапазона первичного регулирования»	
граничная мера - максимальная допустимая суммарная в течение часа продолжительность периодов времени, когда требуемый диапазон не был предоставлен.	60 сек
Критерий 4. «Несоответствие дискретности регистрации измерений требуемой»	
максимально допустимая дискретность регистрации измерений мощности	0,1% $P_{ном}$
максимально допустимая дискретность регистрации измерений частоты	0,001 Гц
граничная мера - минимальные допустимые первые значения распределений абсолютных, отличных от нуля, приращений измерений мощности и частоты.	100

Критерий 5. «Неавтоматический режим САУМ»	
чувствительность алгоритма	0,00005
максимальный размер окна	5 сек
проверять скорость изменения плановой мощности	нет
предельное значение скорости изменения плановой мощности	5% P _{ном} /мин
границная мера - максимальное допустимое количество точек строгих локальных экстремумов.	5,5 / 30 мин
Критерий 6. «Недостаточная точность поддержания мощности»	
(не применяется)	
допустимая задержка изменения мощности при первичном регулировании	30 сек
максимально допустимое отклонение мощности	1% P _{ном}
границная мера - максимальная допустимая суммарная в течение часа продолжительность периодов времени, когда отклонение фактической мощности от требуемой превышает максимально допустимое	60 сек
Критерий 7. «Несоответствие величины мёртвой полосы/статизма первичного регулирования требуемой»	
границная мера - максимальное допустимое отклонение по модулю оценки величины мёртвой полосы от требуемой	0,002 Гц
границная мера - максимальное допустимое отклонение по модулю оценки величины статизма от требуемой	±2,5%
Критерий 8. «Отсутствие адекватной/должной реакции при изменении частоты»	
ширина окна фильтра скользящего среднего для сглаживания значений первичной мощности	25 сек
ширина окна фильтра скользящего среднего для сглаживания значений производных первичной мощности	30 сек
допустимая задержка Δt	30 сек
границная мера ε1	0,015
параметр алгоритма ε2	0,007
Критерий 9. «Наличие колебательного процесса»	
ширина окна	121 сек
шаг сдвига окна	10 сек
границная мера - граничное значение функции автокорреляции сигнала фактической мощности в точке первого локального максимума, следующего за первым локальным минимумом	0,6
границное значение автокорреляционной функции частоты	0,5
учитывать число периодов колебаний	да
границное число периодов колебаний	5