

Рекомендации по выбору уставок дифференциальной защиты трансформатора МР801.

Редакция 1.9. Дата: 27.01.2020.

Тормозная характеристика дифференциальной защиты (рисунок 1) имеет три участка АВ, ВС, CD, четвёртый участок DE обусловлен действием дифференциальной отсечки:

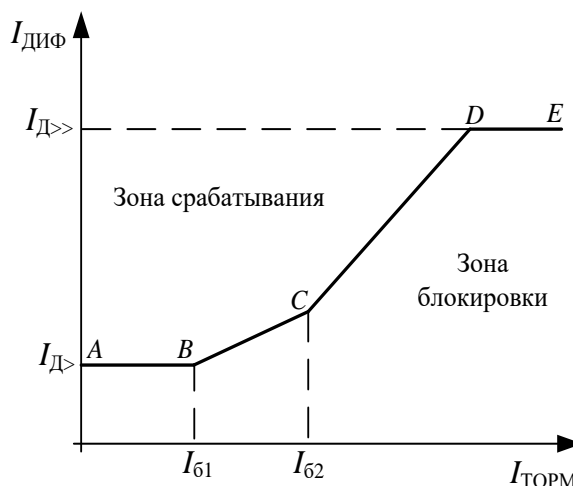


Рисунок 1 – тормозная характеристика.

$I_{Д>}$ - уставка ступени дифференциальной защиты с торможением;

$I_{Д>>}$ - уставка ступени дифференциальной отсечки.

Для задания тормозной характеристики применяются следующие параметры:

- $I_{Б1}$ – начальная точка участка BC , $f1$ – угол наклона BC ;

- $I_{Б2}$ – начальная точка участка CD , $f2$ – угол наклона CD .

Принцип действия дифференциальной защиты основывается на том, что общая сумма всех токов протекающих через защищаемый объект в нормальном режиме равна нулю, при повреждении в защищаемой зоне – току повреждения.

Дифференциальный ток рассчитывается:

$$I_{\text{диф}} = \left| \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \dots + \underline{I}_{CN} \right|,$$

где \underline{I}_{C1} , \underline{I}_{C2} ... \underline{I}_{CN} – токи сторон трансформатора.

N – количество сторон трансформатора (максимальное число сторон для МР801 версии 1.xx и 2.xx – 3 стороны, для версии 3.xx – 4 стороны).

При внешнем повреждении, обеспечивающем протекание большого тока через защищаемую зону может произойти насыщение трансформаторов тока, и за счёт разности их магнитных характеристик может появиться дифференциальный ток. Для предотвращения ложных срабатываний в таких случаях применяется торможение током:

$$I_{\text{ТОРМ}} = \left| \underline{I}_{C1} \right| + \left| \underline{I}_{C2} \right| + \dots + \left| \underline{I}_{CN} \right|,$$

Перед расчетом тормозного и дифференциального токов необходимо выполнить приведение токов по амплитуде к выбранному базисному току.

Для каждой стороны рассчитывается номинальный первичный ток:

$$I_{\text{НОМ.}i} = \frac{S_{\text{НОМ.}i}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ.}i}},$$

где $I_{\text{НОМ.}i}$ - номинальный ток обмотки i -ой стороны силового трансформатора соответственно;

$S_{\text{НОМ.}i}$ - номинальная мощность обмотки i -ой стороны силового трансформатора соответственно;

$U_{\text{НОМ.}i}$ - номинальное напряжение обмотки i -ой стороны силового трансформатора.

Выбор уставки срабатывания $I_{\text{Д} >}$:

$$I_{\text{Д} >} = K_{\text{ОТС}} (K_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{\text{ВЫР}}) \cdot I_{\text{НОМ.НАГР}}^*; I_{\text{Д} >} \geq 0,3,$$

где $K_{\text{ОТС}}$ - коэффициент отстройки, принимается 1,1–1,5 (для повышения надежности отстройки от токов небаланса принимается больший $K_{\text{ОТС}}$, если при этом не обеспечивается условие чувствительности, то принимается меньший $K_{\text{ОТС}}$);

$K_{\text{ОДН}}$ - коэффициент однотипности трансформаторов тока, принимается равным 0,5, если ТТ одинаково нагружены, и 1 – во всех остальных случаях;

ε - относительное значение полной погрешности ТТ (0,05 – 5Р или 0,1 – 10Р);

ΔU - относительная погрешность обусловленная регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора;

$\Delta f_{\text{ВЫР}}$ - коэффициент, учитывающий погрешность цифрового выравнивания, равен:

- 0,03 при наибольшей (из всех плеч защиты) кратности $I_{\text{ТТ}}/I_{\text{НОМ}}$ от 1 до 2;

- 0,04 при наибольшей кратности $I_{\text{ТТ}}/I_{\text{НОМ}}$ от 2 до 3,5;

- 0,05 при наибольшей кратности $I_{\text{ТТ}}/I_{\text{НОМ}}$ свыше 3,5.

$I_{\text{НОМ}}$ - номинальный ток силового трансформатора;

$I_{\text{ТТ}}$ - номинальный первичный ток измерительного ТТ (при выборе ТТ желательно не превышать кратность $I_{\text{ТТ}}/I_{\text{НОМ}}$ более чем в 5 раз);

$I_{\text{НОМ.НАГР}}^*$ - номинальный ток нагрузки.

Рекомендуется принимать минимальную уставку $I_{\text{Д} >}$ не менее 200 мА вторичных при ТТ с $I_{\text{Н}}=5$ А, 40 мА при ТТ с $I_{\text{Н}}=1$ А.

Угол наклона $f1$ первого наклонного участка должен обеспечить несрабатывание ступени при сквозных токах, соответствующих режиму нормальной перегрузки. Такие токи возникают при действии устройств АВР трансформаторов, АВР секционных выключателей, АПВ питающих линий.

Точка второго перегиба:

$$I_{\text{Г2}} = 2I_{\text{НОРМ.ПЕРЕГР}} = 2 \cdot 1,5 = 3,$$

т.к. второй участок учитывает погрешности в зоне допустимой перегрузки трансформатора (при токе нагрузки $1,5I_{\text{НОМ}}$).

Угол наклона участка BC определяется по выражению:

$$f1 = \arctg \frac{K_{\text{отс}} (K_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{\text{вып}}) \cdot I_{\text{норм.перегр}}^*}{I_{\text{б2}}},$$

где относительное значение полной погрешности ТТ ε при сквозных токах нормальной перегрузки рекомендуется принимать равным 0,1.

Для обеспечения надежной отстройки от токов небаланса в условиях нормальной перегрузки рекомендуется принимать угол $f1$ не менее 12° , если это не противоречит условию чувствительности.

Точка первого перегиба:

$$I_{\text{б1}} = \frac{I_{\text{д>}}}{\text{tg} f1}.$$

Наклон второго наклонного участка:

$$f2 = \arctg \frac{K_{\text{отс}} \cdot (K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{\text{вып}}) \cdot I_{\text{внешкз}}^* - \text{tg} f1 \cdot I_{\text{б2}}}{2 \cdot I_{\text{внешкз}}^* - I_{\text{б2}}},$$

$k_{\text{пер}} = 2,5$ – более 50 % нагрузки трансформатора составляет двигательная,

$k_{\text{пер}} = 2$ – двигательная нагрузка менее 50 %.

Для обеспечения надежной отстройки от токов небаланса в условиях внешних КЗ рекомендуется принимать угол $f2$ не менее 26° , если это не противоречит условию чувствительности.

Уставка блокировки при броске тока намагничивания $I2/I1$ принимается равной 14%.

Уставка блокировки при перевозбуждении сердечника трансформатора $I5/I1$ принимается:

для силовых трансформаторов распределительных сетей $I5/I1 = 36\%$ (версии ПО МР801 1.00-1.12), $I5/I1 = 40\%$ (версии ПО 1.14 и выше);

для трансформаторов на электростанциях $I5/I1 = 25\%$.

Рекомендуется выполнять перекрёстную блокировку при броске тока намагничивания и при перевозбуждении сердечника трансформатора.

Дифференциальная токовая отсечка

Если дифференциальный ток защиты превышает уставку $I_{Д>>}$, устройство срабатывает без учета торможения и блокировок по 2-й и 5-й гармоникам.

Первичный ток срабатывания определяется отстройкой от максимального первичного тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора.

По условию отстройки от броска тока намагничивания:

$$I_{Д>>} = (5 \div 10) I_{НОМ.}$$

Ток срабатывания отсечки определяется отстройкой от максимального тока небаланса при переходном режиме внешнего КЗ:

$$I_{Д>>} = K_{ОТС} \cdot K_{НБ} \cdot I_{ВНЕШ.КЗ}^*$$

где $K_{ОТС}$ - коэффициент отстройки, учитывающий погрешности терминала, ошибки расчета и необходимый запас, может быть принят 1,1–1,2;

$K_{НБ}$ – коэффициент небаланса:

- равен 1 в случае, если по сторонам трансформатора используются ТТ с номинальными токами 5 А и 1 А;
- равен 0,7 в случае, если ТТ имеют одинаковый вторичный ток 5А.

Компенсация токов нулевой последовательности (НП)

Компенсация токов НП должна применяться для защиты трансформатора с обмоткой типа «звезда с заземлённой нейтралью». В противном случае возможна ложная работа дифференциальной защиты трансформатора при внешних однофазных КЗ.

Рекомендуется выполнять компенсацию токов НП также в тех случаях, когда нейтраль трансформатора разземлена по условиям режима работы нейтрали в сети, но имеется возможность выполнить заземление (в нейтрали трансформатора установлен заземляющий нож).

Рекомендации по вводу уставок компенсации токов НП:

– для МР801 версии 1.xx и 2.xx для обмоток с заземленной нейтралью или с возможностью заземления нейтрали задать уставки «Тип обмотки» – «Yn», а «Измерение земля» – «Нет»;

– для МР801 версии 3.xx для обмоток с заземленной нейтралью или с возможностью заземления нейтрали задать уставки «Yn с компенс. НП по расч. I0».

Указанный выше способ обеспечивает компенсацию токов НП расчетным методом и **является предпочтительным.**

В случае необходимости компенсации НП на основе измеренного тока в нейтрали можно задать следующие уставки:

– для устройств МР801 версии 1.xx и 2.xx необходимо установить настройку «тип обмотки» – «Yn» а «измерение земля» – «Да»;

– для устройств МР801 версии 3.xx задать уставку «Yn с компенс. НП по изм. In».

При компенсации НП по измеренному току необходимо сфазировать ТТ, установленный в нейтрали силового трансформатора, в соответствии с руководством по эксплуатации МР801.

Проверка по условию чувствительности к КЗ на выводах трансформатора

Проверка чувствительности производится для ступени с торможением в режиме минимального тока КЗ ($I_{\text{МИН.КЗ}}^*$) на выводах трансформатора:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{МИН.КЗ}}^*}{I_{\text{СЗ}}} \geq 2,$$

где ток срабатывания защиты:

$$\begin{aligned} I_{\text{СЗ}} &= I_{\text{Д>}} \quad \text{при } I_{\text{МИН.КЗ}}^* \leq I_{\text{Б1}}, \\ I_{\text{СЗ}} &= I_{\text{Д>}} + \text{tg}f1 \cdot (I_{\text{МИН.КЗ}}^* - I_{\text{Б1}}) \quad \text{при } I_{\text{Б1}} < I_{\text{МИН.КЗ}}^* \leq I_{\text{Б2}}, \\ I_{\text{СЗ}} &= I_{\text{Д>}} + \text{tg}f1 \cdot (I_{\text{Б2}} - I_{\text{Б1}}) + \text{tg}f2 \cdot (I_{\text{МИН.КЗ}}^* - I_{\text{Б2}}) \quad \text{при } I_{\text{МИН.КЗ}}^* > I_{\text{Б2}}. \end{aligned}$$

Пример расчёта 1.

Рассчитать уставки ДЗТ и ДТО для трансформатора 110/10 кВ 6,3 МВА с РПН $\pm 9 \times 1,78\%$, $U_{НВ} = 115$ кВ, $U_{НН} = 11$ кВ. ТТ: 150/5 на стороне 110 кВ; 600/5 на стороне 10 кВ. Ток внешнего КЗ на стороне 10 кВ приведенный к стороне 110 кВ: 345 А.

1. Расчёт номинальных токов обмоток трансформатора:

$$I_{BH} = \frac{S_{BH}}{\sqrt{3}U_{BH}} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 115} = 31,6 \text{ А};$$

$$I_{HH} = \frac{S_{HH}}{\sqrt{3}U_{HH}} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 11} = 330,7 \text{ А};$$

2. Расчёт коэффициентов кратности:

$$K_{BH} = \frac{I_{ТТ.ВН}}{I_{BH}} = \frac{150}{31,6} = 4,7 > 3,5;$$

$$K_{HH} = \frac{I_{ТТ.НН}}{I_{HH}} = \frac{600}{330,7} = 1,81,$$

принимаем $\Delta f_{ВЫР} = 0,05$.

3. Выбор уставки $I_{Д>}$ и углов наклона:

$$I_{Д>} = K_{ОТС} (K_{ПЕР} \cdot K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{ВЫР}) \cdot I_{НОМ.НАГР}^* = 1,2 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{9 \cdot 1,78}{100} + 0,05) \cdot 1 = 0,37;$$

$$I_{Д>ВТОР} = \frac{0,37 \cdot 31,6}{150/5} = 0,39 \text{ А} > 0,2 \text{ А}.$$

1-я точка перегиба:

Наклон первого наклонного участка:

$$I_{Б2} = 3,$$

$$I_{Д2} = K_{ОТС} \cdot (K_{ПЕР} \cdot K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{ВЫР}) \cdot I_{НОРМ.ПЕРЕГР}^* = 1,5 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 + 0,05) \cdot 1,5 = 0,6975$$

$$f1 = \arctg \frac{I_{Д2}}{I_{Б2}} = \arctg \frac{0,6975}{3} = 13,1^\circ.$$

Принимаем $f1 = 14^\circ$.

$$I_{Б1} = \frac{0,37}{\text{tg}14^\circ} = 1,48$$

Наклон второго наклонного участка:

$$f2 = \arctg \frac{K_{ОТС} \cdot (K_{ПЕР} \cdot K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{ВЫР}) \cdot I_{ВНЕШ.КЗ}^* - I_{Д2}}{I_{ТОРМ.ВНЕШ.КЗ}^* - I_{Б2}} =$$

$$= \arctg \frac{1,5 \cdot (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 + 0,05) \cdot \frac{345}{31,6} - 0,6975}{2 \cdot \frac{345}{31,6} - 3} = 20^\circ$$

Принимаем наименьшее значение $f2 = 26^\circ$ по условию $f2 \geq 26^\circ$.

4. Уставка токовой отсечки.

Отстройка от броска тока намагничивания:

$$I_{Д>>} = 6;$$

Отстройка от токов небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{Д>>} = K_{ОТС} \cdot K_{НЕБ} \cdot I_{ВНЕШ.КЗ}^* = 1,2 \cdot 0,7 \cdot \frac{345}{31,6} = 9,17.$$

Принимаем $I_{Д>} = 9,17$.

5. Принимаем $I_2 / I_1 = 14\%$. Перекрестная блокировка «Введена».

6. Принимаем $I_5 / I_1 = 40\%$. Перекрестная блокировка «Введена».

7. Уставки для компенсации токов НП.

– для МР801 версии 1.хх и 2.хх со стороны с заземленной нейтралью задаём «Тип обмотки» – «Yn» и «Измерение земля» – «Нет»;

– для МР801 версии 3.хх со стороны с заземленной нейтралью задать «Yn с компенс. НП по расч. I0».

8. Проверка чувствительности.

Рассчитаем минимальный ток КЗ (режим двухфазного КЗ) приведенный к номинальному току силового трансформатора:

$$I_{\text{МИН.КЗ}}^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{ВНЕШ.КЗ}}^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{345}{31,6} = 9,46, \quad I_{\text{МИН.КЗ}}^* > I_{\text{Б2}}.$$

Рассчитаем ток срабатывания защиты, соответствующий режиму минимального тока КЗ:

$$I_{\text{СЗ}} = I_{\text{Д>}} + \text{tg}f_1 \cdot (I_{\text{Б2}} - I_{\text{Б1}}) + \text{tg}f_2 \cdot (I_{\text{МИН.КЗ}}^* - I_{\text{Б2}}) = 0,37 + \text{tg}14^\circ \cdot (3 - 1,48) + \text{tg}26^\circ \cdot (9,46 - 3) = 3,90$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{Ч}} = \frac{I_{\text{МИН.КЗ}}^*}{I_{\text{СЗ}}} = \frac{9,46}{3,90} = 2,43 \geq 2.$$

Пример расчёта 2.

Рассчитать уставки ДЗТ и ДТО для разделительного трансформатора 10/10 кВ 4,2 МВА $U_{\text{Н1}} = U_{\text{Н2}} = 10,5$ кВ. ТТ: 300/5 на обеих сторонах. Ток внешнего КЗ при питании с одной стороны – 2560 А, ток внешнего КЗ при питании с другой стороны – 650 А.

1. Расчёт номинальных токов обмоток трансформатора:

$$I_{\text{Н1}} = I_{\text{Н2}} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3}U_{\text{Н1}}} = \frac{4,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 231 \text{ А.}$$

2. Расчёт коэффициентов кратности:

$$K_{\text{Н1}} = K_{\text{Н2}} = \frac{I_{\text{ТТ.Н1}}}{I_{\text{Н1}}} = \frac{300}{230} = 1,3, \text{ принимаем } \Delta f_{\text{ВЫР}} = 0,03.$$

3. Выбор уставки $I_{\text{Д>}}$ и углов наклона:

$$I_{\text{Д>}} = K_{\text{ОТС}} (K_{\text{ПЕР}} \cdot K_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{\text{ВЫР}}) \cdot I_{\text{НОМ.НАГР}}^* = 1,2 \cdot (1 \cdot 0,5 \cdot 0,1 + 0,03) \cdot 1 = 0,096,$$

принимаем наименьшее значение $I_{\text{Д>}} = 0,3$ по условию $I_{\text{Д>}} \geq 0,3$.

$$I_{\text{Д>ВТОР}} = \frac{0,3 \cdot 231}{300/5} = 1,155 \text{ А} > 0,2 \text{ А.}$$

1-я точка перегиба:

Наклон первого наклонного участка:

$$I_{\text{Б2}} = 3,$$

$$I_{\text{Д2}} = K_{\text{ОТС}} \cdot (K_{\text{ПЕР}} \cdot K_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{\text{ВЫР}}) \cdot I_{\text{НОРМ.ПЕРЕГР.}}^* = 1,5 \cdot (1 \cdot 0,05 \cdot 0,1 + 0,03) \cdot 1,5 = 0,18$$

$$f_1 = \arctg \frac{I_{\text{Д2}}}{I_{\text{Б2}}} = \arctg \frac{0,18}{3} = 3,43^\circ,$$

принимаем наименьшее значение $f1=12^\circ$, по условию $f1 \geq 12^\circ$. При $f1=12^\circ$ перерасчитаем значение $I_{Д2}$:

$$I_{Д2} = I_{Б2} \cdot \operatorname{tg} f1 = 3 \cdot \operatorname{tg} 12^\circ = 0,64.$$

Базисная точка I:

$$I_{Б1} = \frac{I_{Д>}}{\operatorname{tg} f1} = \frac{0,3}{\operatorname{tg} 12^\circ} = 1,41.$$

Наклон второго наклонного участка:

$$f2 = \arctg \frac{K_{ОТС} \cdot (K_{ПЕР} \cdot K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U + \Delta f_{ВЫР}) \cdot I_{ВНЕШ.КЗ1}^* - I_{Д2}}{I_{ТОРМ.ВНЕШ.КЗ}^* - I_{Б2}} =$$

$$= \arctg \frac{1,5 \cdot (2,5 \cdot 0,05 \cdot 0,1 + 0,03) \cdot \frac{2560}{231} - 0,64}{2 \cdot \frac{345}{31,6} - 3} = 5,8^\circ,$$

принимаем наименьшее значение $f2 = 26^\circ$ по условию $f2 \geq 26^\circ$.

4. Уставка токовой отсечки.

Отстройка от броска тока намагничивания:

$$I_{Д>>} = 6;$$

Отстройка от токов небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{Д>>} = K_{ОТС} \cdot K_{НЕБ} \cdot I_{ВНЕШ.КЗ1}^* = 1,2 \cdot 0,7 \cdot \frac{2560}{231} = 9,31.$$

Принимаем $I_{Д>>} = 9,31$.

5. Принимаем $I2 / I1 = 14\%$. Перекрестная блокировка «Введена».

6. Принимаем $I5 / I1 = 40\%$. Перекрестная блокировка «Введена».

7. Уставки для компенсации токов НП.

– для МР801 версии 1.хх и 2.хх со стороны с заземленной нейтралью задать «Тип обмотки» – «Yn» и «Измерение земля» – «Нет»;

– для МР801 версии 3.хх со стороны с заземленной нейтралью задать «Yn с компенс. НП по расч. I0».

8. Проверка чувствительности.

8.1. Для режима питания с первой стороны.

Рассчитаем минимальный ток КЗ (режим двухфазного КЗ) приведенный к номинальному току силового трансформатора:

$$I_{МИН.КЗ1}^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{ВНЕШ.КЗ1}^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2560}{231} = 9,59, I_{МИН.КЗ1}^* > I_{Б2}.$$

Рассчитаем ток срабатывания защиты, соответствующий режиму минимального тока КЗ:

$$I_{СЗ1} = I_{Д>} + \operatorname{tg} f1 \cdot (I_{Б2} - I_{Б1}) + \operatorname{tg} f2 \cdot (I_{МИН.КЗ1}^* - I_{Б2}) = 0,3 + \operatorname{tg} 12^\circ (3 - 1,41) + \operatorname{tg} 26^\circ (9,59 - 3) = 3,85.$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{МИН.КЗ1}^*}{I_{СЗ1}} = \frac{9,59}{3,85} = 2,49 \geq 2.$$

8.2. Для режима питания со второй стороны.

Рассчитаем минимальный ток КЗ (режим двухфазного КЗ) приведенный к номинальному току силового трансформатора:

$$I^*_{\text{МИН.КЗ2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I^*_{\text{ВНЕШ.КЗ2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{650}{231} = 2,43, \quad I_{\text{Б1}} < I^*_{\text{МИН.КЗ2}} \leq I_{\text{Б2}},$$

Рассчитаем ток срабатывания защиты, соответствующий режиму минимального тока КЗ:

$$I_{\text{СЗ2}} = I_{\text{Д>}} + \text{tg}f1 \cdot (I^*_{\text{МИН.КЗ2}} - I_{\text{Б1}}) = 0,3 + \text{tg}12^\circ(2,43 - 1,41) = 0,52.$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{Ч}} = \frac{I^*_{\text{МИН.КЗ2}}}{I_{\text{СЗ2}}} = \frac{2,43}{0,52} = 4,67 \geq 2.$$