

Стрюков А.Н.,

бакалавр

Институт Электроэнергетики

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Россия, г. Москва

Хамдард Р.М.,

бакалавр

Институт Электроэнергетики

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Россия, г. Москва

Теплов Г.А.,

бакалавр

Институт Электроэнергетики

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Россия, г. Москва

Коньков Н.А.,

магистр

Институт Электроэнергетики

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Россия, г. Москва

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ГРУ 10 КВ ТЭЦ

Аннотация: В статье произведен расчет переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) для ГРУ 10 кВ ТЭЦ с разным количеством присоединений при коротком замыкании (КЗ) на выводах выключателя и при удаленном КЗ.

Ключевые слова: высоковольтный выключатель, ток короткого замыкания, экспоненциальная и пилообразная форма кривой, переходное восстанавливающееся напряжение.

Annotation: The article calculates the transient recovery voltage (TRV) for the GS of 10 kV TPP with different number of connections for short-circuit (SC) at the switch terminals and for non-failed short-circuit.

Key words: circuit breaker, short circuit current, exponential and sawtooth voltage waveforms, transient recovery voltage.

Расчет ПВН для ГРУ 10 кВ типовой ТЭЦ при КЗ на выводах выключателя

В качестве расчетного вида КЗ принято трехфазное КЗ. Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ на выводах выключателя принято равным $I_{п0} = 12$ кА.

Исходя из значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ найдем индуктивность электрической сети L_c при номинальном напряжении $U_{ном} = 10$ кВ:

$$L_c = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{п0} \cdot \omega_c} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 12 \cdot 314} = 1,53 \text{ мГн.} \quad (1)$$

Определим эквивалентную индуктивность цепи:

$$L_{эк} = 1,5 \cdot L_c = 1,5 \cdot 1,53 = 2,3 \text{ мГн.}$$

Определим эквивалентное волновое сопротивление линии:

$$Z_{эк} = \frac{1,5 \cdot Z_1}{N_l} = \frac{1,5 \cdot 100}{34} = 4,4 \text{ Ом.}$$

Далее необходимо найти суммарную емкость электрической цепи, которая включает в себя емкость ошиновки $C_{ш}$, силовых трансформаторов $C_{ст}$, трансформаторов напряжения $C_{тн}$ и тока $C_{тт}$, разъединителей C_p , выключателей C_B и турбогенераторов C_r и рассчитывается:

$$C_{\Sigma} = C_{ш} + n_{ст} \cdot C_{ст} + n_{тн} \cdot C_{тн} + n_{тт} \cdot C_{тт} + n_p \cdot C_p + n_B \cdot C_B + n_r \cdot C_r \quad (2)$$

Согласно [3] входные емкости аппаратов при $U_{ном} = 10$ кВ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения входных емкостей электрооборудования при $U_{\text{ном}} = 10$ кВ

| Аппараты | Входная емкость, нФ |
|--|---------------------|
| Ошиновка | 1 |
| Силовой трансформатор | 1 |
| Трансформатор напряжения электромагнитный | 0,2 |
| Трансформатор тока | 0,3 |
| Разъединитель | 0,1 |
| Выключатель | 0,1 |

Емкости обмоток статора отдельных турбогенераторов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Емкость обмоток статора для испытания изоляции отдельных турбогенераторов

| Тип | Емкость, мкФ |
|-----------|--------------|
| ТВ-60-2 | 0,174 |
| ТВФ-60-2 | 0,26 |
| ТВФ-100-2 | 0,24 |
| ТВ2-150-2 | 0,28 |
| ТВВ-165-2 | 0,154 |
| ТВФ-200-2 | 0,44 |
| ТГВ-200 | 0,4 |
| ТВВ-200-2 | 0,105 |

Определим количество электрооборудования. В выбранную схему типовой ТЭЦ входят: ошиновка, 4 силовых трансформатора, 11 трансформаторов напряжения, 77 разъединителей, 32 выключателя, 2 турбогенератора.

Используя формулу (2), находим суммарную емкость C_{Σ} электрооборудования:

$$C_{\Sigma} = 1 + 4 \cdot 1 + 11 \cdot 0,2 + 77 \cdot 0,1 + 32 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,00028 = 18,1 \text{ нФ.}$$

Определим эквивалентную емкость цепи:

$$C_{\text{ЭК}} = \frac{C_{\Sigma}}{1,5} = \frac{18,1}{1,5} = 12,07 \text{ нФ.}$$

Полученные значения эквивалентной индуктивности, эквивалентного волнового сопротивления и эквивалентной емкости подставляем в формулу (3):

$$Z_{\text{ЭК}} < Z_{\text{К}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{L_{\text{ЭК}}}{C_{\text{ЭК}}}}. \quad (3)$$

$$Z_{\text{ЭК}} = 4,4 \text{ Ом} < Z_{\text{К}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{2,3 \cdot 10^{-3}}{12,07 \cdot 10^{-9}}} = 218,26 \text{ Ом.}$$

Исходя из результатов расчета, получим, что эквивалентное волновое сопротивление ЛЭП $Z_{\text{ЭК}}$ меньше критического сопротивления цепи $Z_{\text{К}}$. Следовательно, ПВН на контактах выключателя определим методом, основанным на экспоненциальной форме кривой.

Найдем скорость нарастания восстанавливающегося напряжения $S_{\text{ПВН}}$:

$$S_{\text{ПВН}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}} \cdot \omega \cdot Z_{\text{ЭК}} = \sqrt{2} \cdot 12 \cdot 314 \cdot 4,4 = 0,023 \text{ кВ/мкс.}$$

Определим отношение эквивалентной индуктивности цепи к эквивалентному волновому сопротивлению ЛЭП:

$$\tau = \frac{L_{\text{ЭК}}}{Z_{\text{ЭК}}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-3}}{4,4} = 522,7 \text{ мкс.}$$

Найдем ПВН на контактах выключателя:

$$U_{\text{ПВН}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}} \cdot \omega \cdot L_{\text{ЭК}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \sqrt{2} \cdot 12 \cdot 314 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - e^{-t \cdot 10^6 / 522,7}\right).$$

На рисунке 1 приведена расчетная экспоненциальная кривая ПВН типовой ТЭЦ при КЗ на выводах выключателя.

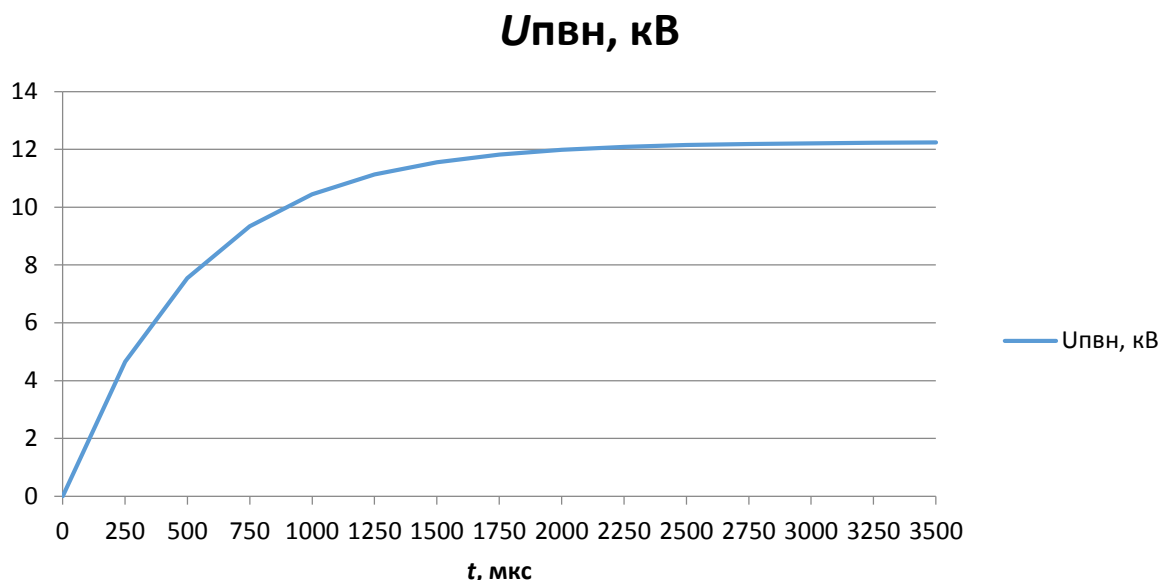


Рисунок 1. Расчетная экспоненциальная кривая ПВН типовой ТЭЦ

Из рисунка 1 видно, что при КЗ на выводах выключателя максимальное значение напряжения составляет $U_{\text{ПВН}} = 12,24$ кВ при времени $t = 3,5$ нс.

Расчет ПВН для ГРУ 10 кВ мини ТЭЦ при КЗ на выводах выключателя

В качестве расчетного вида КЗ принято трехфазное КЗ. Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ на выводах выключателя принято равным $I_{\text{п0}} = 16,6$ кА.

Исходя из значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ и используя формулу (1) найдем индуктивность электрической сети L_c при номинальном напряжении $U_{\text{ном}} = 10$ кВ:

$$L_c = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{п0}} \cdot \omega_c} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 16,6 \cdot 314} = 1,1 \text{ мГн.}$$

Определим эквивалентную индуктивность цепи:

$$L_{\text{ЭК}} = 1,5 \cdot L_c = 1,5 \cdot 1,1 = 1,65 \text{ мГн.}$$

Определим эквивалентное волновое сопротивление линии:

$$Z_{\text{ЭК}} = \frac{1,5 \cdot Z_1}{N_L} = \frac{1,5 \cdot 100}{6} = 25 \text{ Ом.}$$

Далее необходимо найти суммарную емкость электрической цепи. В выбранную схему мини ТЭЦ входят: ошиновка, 4 силовых трансформатора, 13 выключателей, 2 турбогенератора.

Используя формулу (2), находим суммарную емкость C_{Σ} электрооборудования:

$$C_{\Sigma} = 1 + 4 \cdot 1 + 13 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,000174 = 6,3 \text{ нФ.}$$

Определим эквивалентную емкость цепи:

$$C_{\text{эк}} = \frac{C_{\Sigma}}{1,5} = \frac{6,3}{1,5} = 4,2 \text{ нФ.}$$

Полученные значения эквивалентной индуктивности, эквивалентного волнового сопротивления и эквивалентной емкости подставляем в формулу (3):

$$Z_{\text{эк}} = 25 \text{ Ом} < Z_{\text{к}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1,65 \cdot 10^{-3}}{4,2 \cdot 10^{-9}}} = 313,4 \text{ Ом.}$$

Исходя из результатов расчета, получим, что эквивалентное волновое сопротивление ЛЭП $Z_{\text{эк}}$ меньше критического сопротивления цепи $Z_{\text{к}}$. Следовательно, ПВН на контактах выключателя определим методом, основанным на экспоненциальной форме кривой.

Найдем скорость нарастания восстанавливающегося напряжения $S_{\text{ПВН}}$:

$$S_{\text{ПВН}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}} \cdot \omega \cdot Z_{\text{эк}} = \sqrt{2} \cdot 16,6 \cdot 314 \cdot 25 = 0,18 \text{ кВ/мкс.}$$

Определим отношение эквивалентной индуктивности цепи к эквивалентному волновому сопротивлению ЛЭП:

$$\tau = \frac{L_{\text{эк}}}{Z_{\text{эк}}} = \frac{1,65 \cdot 10^{-3}}{25} = 66 \text{ мкс.}$$

Найдем ПВН на контактах выключателя:

$$U_{\text{ПВН}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}} \cdot \omega \cdot L_{\text{эк}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \sqrt{2} \cdot 16,6 \cdot 314 \cdot 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - e^{-t \cdot 10^6 / 66}\right).$$

На рисунке 2 приведена расчетная экспоненциальная кривая ПВН мини ТЭЦ при КЗ на выводах выключателя.

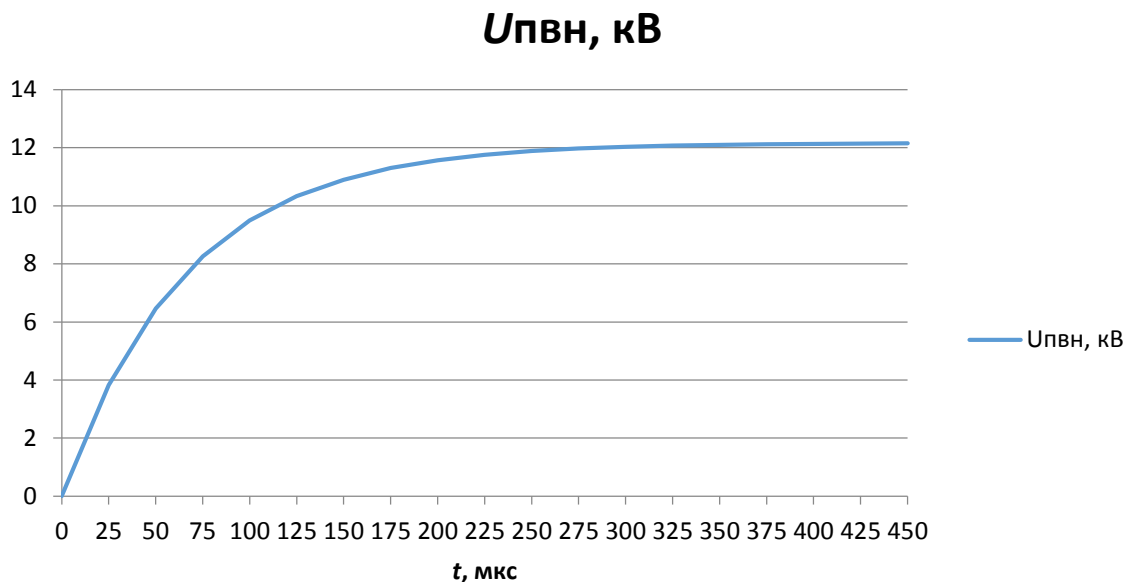


Рисунок 2. Расчетная экспоненциальная кривая ПВН мини ТЭЦ

Из рисунка 2 видно, что при КЗ на выводах выключателя максимальное значение напряжения составляет $U_{\text{ПВН}} = 12,15$ кВ при времени $t = 450$ мкс.

Расчет ПВН для ГРУ 10 кВ типовой ТЭЦ при неудаленном КЗ

При расчете ПВН при неудаленном КЗ принимаем расстояние от выключателя до точки КЗ равным $\lambda = 1$ км. Сопротивление линии принято равным $X_{\text{л}} = 0,4$ Ом.

Определим начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{\text{пол}}$:

$$I_{\text{пол}} = \frac{E_{\text{эк}}}{\sqrt{3} \cdot (\lambda \cdot X_{\text{л}} + X_{\text{с}})} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot (1 \cdot 0,4 + 0,48)} = 6,56 \text{ кА},$$

$$\text{где } X_{\text{с}} = L_{\text{с}} \cdot \omega = 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot 314 = 0,48 \text{ Ом}.$$

Определим скорость нарастания составляющей восстанавливающегося напряжения со стороны линии $S_{\text{л}}$:

$$S_{\text{л}} = \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I_{\text{пол}} \cdot Z_{\text{эф}} = \sqrt{2} \cdot 314 \cdot 6,56 \cdot 100 = 0,29 \text{ кВ/мкс}.$$

Найдем составляющую восстанавливающегося напряжения со стороны линии $u_{\text{л}}$:

$$u_{\text{л}} = d \cdot u_0 = d \cdot \lambda \cdot X_{\text{л}} \cdot I_{\text{пол}} \cdot \sqrt{2} = 1,6 \cdot 1 \cdot 0,4 \cdot 6,56 \cdot \sqrt{2} = 5,94 \text{ кВ/мкс}.$$

Тогда получим, что время первого пика составляющей восстанавливающегося напряжения со стороны линии $t_{\text{л}}$ равно:

$$t_{л} = \frac{u_{л}}{S_{л}} = \frac{5,94}{0,29} = 20,48 \text{ мкс.}$$

Найдем напряжение около выключателя u_0 :

$$u_0 = \lambda \cdot X_{л} \cdot I_{пол} \cdot \sqrt{2} = 1 \cdot 0,4 \cdot 6,56 \cdot \sqrt{2} = 3,71 \text{ кВ.}$$

Тогда составляющая восстанавливающегося напряжения со стороны источника энергии будет равна:

$$u_c = u_1 \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + u_0 = 4,45 \cdot (1 - e^{-t/520,4}) + 3,71,$$

$$\text{где } u_1 = U_{н} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} - u_0 = 10 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} - 3,71 = 4,45 \text{ кВ;}$$

$$\tau = \frac{L_c}{Z} = \frac{1,53 \cdot 10^{-3}}{2,94} = 520,4 \text{ мкс;}$$

$$Z = \frac{Z_{эф}}{N_{л}} = \frac{100}{34} = 2,94 \text{ Ом.}$$

На рисунке 3 приведена расчетная пилообразная кривая ПВН типовой ТЭЦ при неударном КЗ со стороны источника энергии.

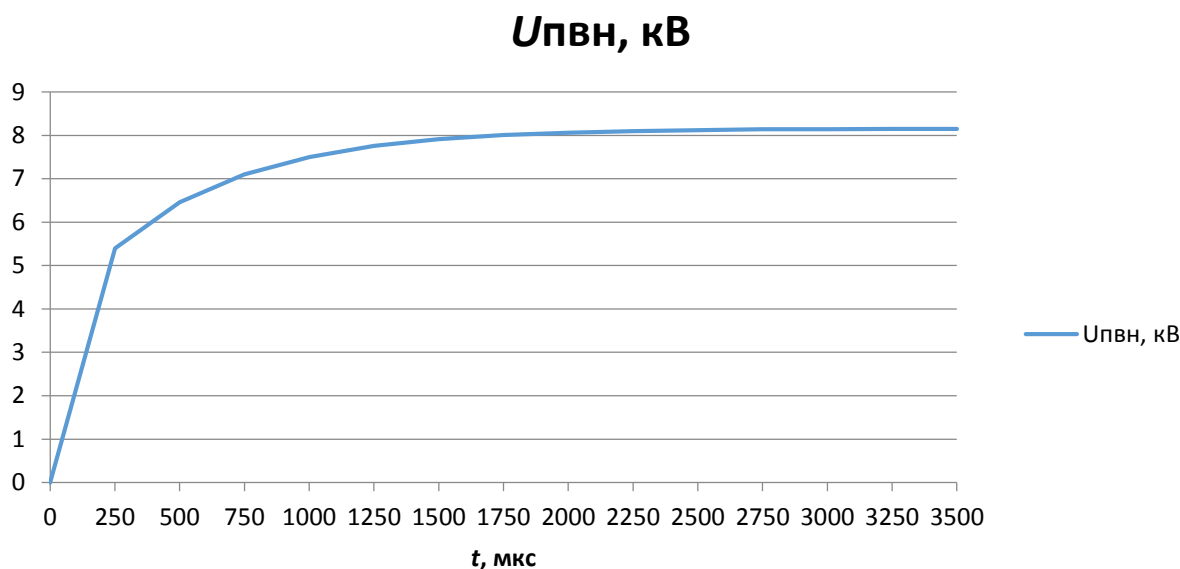


Рисунок 3. Расчетная пилообразная кривая ПВН типовой ТЭЦ

Из рисунка 3 видно, что при неударном КЗ максимальное значение напряжения составляет $U_{пвн} = 8,15$ кВ при времени $t = 3,5$ нс.

Определим скорость нарастания ПВН со стороны источника энергии:

$$S_c = \frac{u_{кас}}{t_{кас}} = \frac{5,4}{250} = 0,021 \text{ кВ/мкс.}$$

Расчет ПВН для ГРУ 10 кВ мини ТЭЦ при неударном КЗ

Определим начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{\text{пол}}$:

$$I_{\text{пол}} = \frac{E_{\text{эк}}}{\sqrt{3} \cdot (\lambda \cdot X_L + X_C)} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot (1 \cdot 0,4 + 0,34)} = 7,8 \text{ кА},$$

$$\text{где } X_C = L_C \cdot \omega = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 314 = 0,34 \text{ Ом}.$$

Определим скорость нарастания составляющей восстанавливающегося напряжения со стороны линии S_L :

$$S_L = \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I_{\text{пол}} \cdot Z_{\text{эф}} = \sqrt{2} \cdot 314 \cdot 7,8 \cdot 100 = 0,34 \text{ кВ/мкс}.$$

Найдем составляющую восстанавливающегося напряжения со стороны линии u_L :

$$u_L = d \cdot u_0 = d \cdot \lambda \cdot X_L \cdot I_{\text{пол}} \cdot \sqrt{2} = 1,6 \cdot 1 \cdot 0,4 \cdot 7,8 \cdot \sqrt{2} = 7,06 \text{ кВ/мкс}.$$

Тогда получим, что время первого пика составляющей восстанавливающегося напряжения со стороны линии t_L равно:

$$t_L = \frac{u_L}{S_L} = \frac{7,06}{0,34} = 20,76 \text{ мкс}.$$

Найдем напряжение около выключателя u_0 :

$$u_0 = \lambda \cdot X_L \cdot I_{\text{пол}} \cdot \sqrt{2} = 1 \cdot 0,4 \cdot 7,8 \cdot \sqrt{2} = 4,41 \text{ кВ}.$$

Тогда составляющая восстанавливающегося напряжения со стороны источника энергии будет равна:

$$u_c = u_1 \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + u_0 = 3,75 \cdot (1 - e^{-t/66,2}) + 4,41,$$

$$\text{где } u_1 = U_H \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} - u_0 = 10 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} - 4,41 = 3,75 \text{ кВ};$$

$$\tau = \frac{L_C}{Z} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3}}{16,6} = 66,2 \text{ мкс};$$

$$Z = \frac{Z_{\text{эф}}}{N_L} = \frac{100}{6} = 16,6 \text{ Ом}.$$

На рисунке 4 приведена расчетная пилообразная кривая ПВН мини ТЭЦ при неудаленном КЗ со стороны источника энергии.

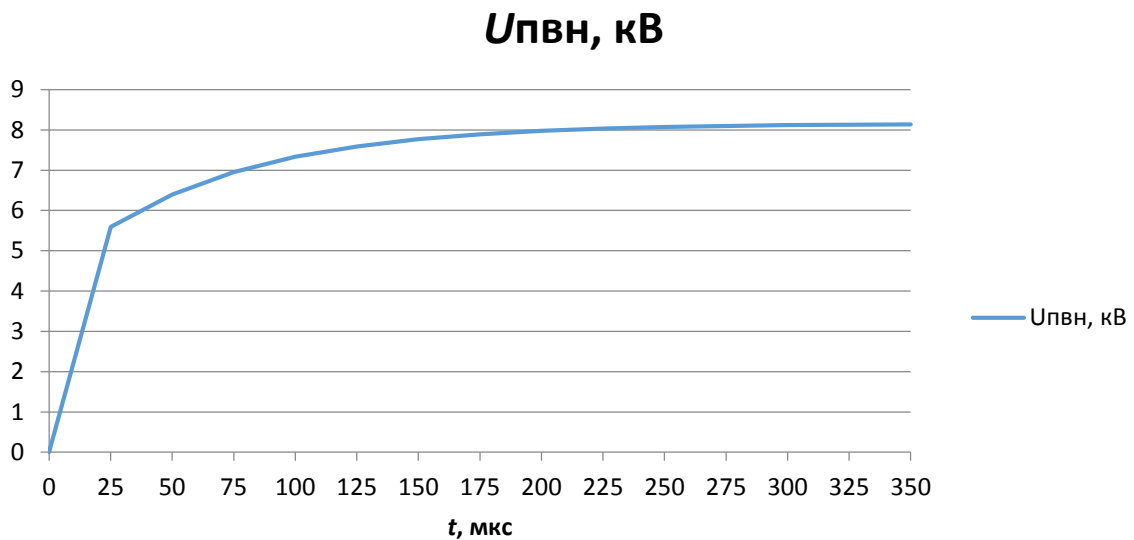


Рисунок 4. Расчетная пилообразная кривая ПВН мини ТЭЦ

Из рисунка 4 видно, что при неудаленном КЗ максимальное значение напряжения составляет $U_{\text{ПВН}} = 8,14$ кВ при времени $t = 350$ мкс.

Определим скорость нарастания ПВН со стороны источника энергии:

$$S_c = \frac{u_{\text{кас}}}{t_{\text{кас}}} = \frac{5,59}{25} = 0,22 \text{ кВ/мкс.}$$

В таблице 3 приведены результаты расчетов пиковых значений $U_{\text{ПВН}}$ и скоростей нарастания ПВН $S_{\text{ПВН}}$ при КЗ на выводах выключателя и неудаленном КЗ, расположенном на расстоянии 1 км от выключателя, а также нормированные параметры ПВН по ГОСТ 52565-2006.

Таблица 3. Расчетные и нормируемые параметры ПВН

| Тип ТЭЦ | Форма кривой ПВН | | Расчетные параметры ПВН | | Нормируемые параметры ПВН | |
|---------|------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| | | | $U_{\text{ПВН}}$, кВ | $S_{\text{ПВН}}$, кВ/мкс | U_c , кВ | S , кВ/мкс |
| Типовая | Экспоненциальная | | 12,24 | 0,023 | 22 | 0,85 |
| | Пилообразная | со стороны источника | 8,15 | 0,021 | | |
| | | со стороны линии | 5,94 | 0,29 | | |
| Мини | Экспоненциальная | | 12,15 | 0,18 | | |
| | Пилообразная | со стороны источника | 8,14 | 0,22 | | |
| | | со стороны линии | 7,06 | 0,34 | | |

Из таблицы 3 видно, что пиковые значения и скорости нарастания ПВН не превышают нормированных значений. При этом различие пиковых значений типовой и мини ТЭЦ составляет 0,7 % в случае метода, основанного на экспоненциальной форме кривой и 0,12 % в случае метода, основанного на пилообразной форме кривой. Из этого следует, что именно скорость нарастания ПВН является преобладающим параметром с точки зрения влияния на аварийность ВВ.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 52565 – 2006: Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. – Введ. 2007 – 04 – 01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 91 с.
2. Рахимов Д.Б. Оценка соответствия отключающей способности выключателей токам коротких замыканий и переходным восстанавливающимся

напряжениям в энергосистеме Республики Таджикистан: дис. канд. техн. наук: 05.14.02: защищена 08.06.2018: утв. 15.06.2018 / Рахимов Джамшед Бобомуродович – Москва, 2018.

3. РД 153 – 34.3 – 35.125 – 99. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. – 2 – е изд. – СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 с.

4. Электрическая часть станций и подстанций: учебник для вузов / А.А. Васильев и др.; под ред. А.А. Васильева. – 2 – е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

5. Волков М.С., Гусев Ю.П. Оценка влияния характеристик токоограничивающего реактора на переходные восстанавливающиеся напряжения на контактах выключателя при отключении токов короткого замыкания. Наука и образование. 2013. Стр. 329 – 334.

6. Denis D. Transient Recovery Voltages (TRVs) for High-Voltage Circuit Breakers Part 1. Chair CIGRE WG A3.28 & IEEE WG C37.011, Fellow IEEE San Antonio (USA), 19/09/2013. – 186 p.