

Пример расчёта провала напряжения в узле СЭС при прямом пуске электродвигателя

В приведенной на рисунке системе электроснабжения и заданных исходных данных требуется определить провал напряжения на I-й секции шин 10 кВ ГПП при прямом пуске асинхронного электродвигателя.

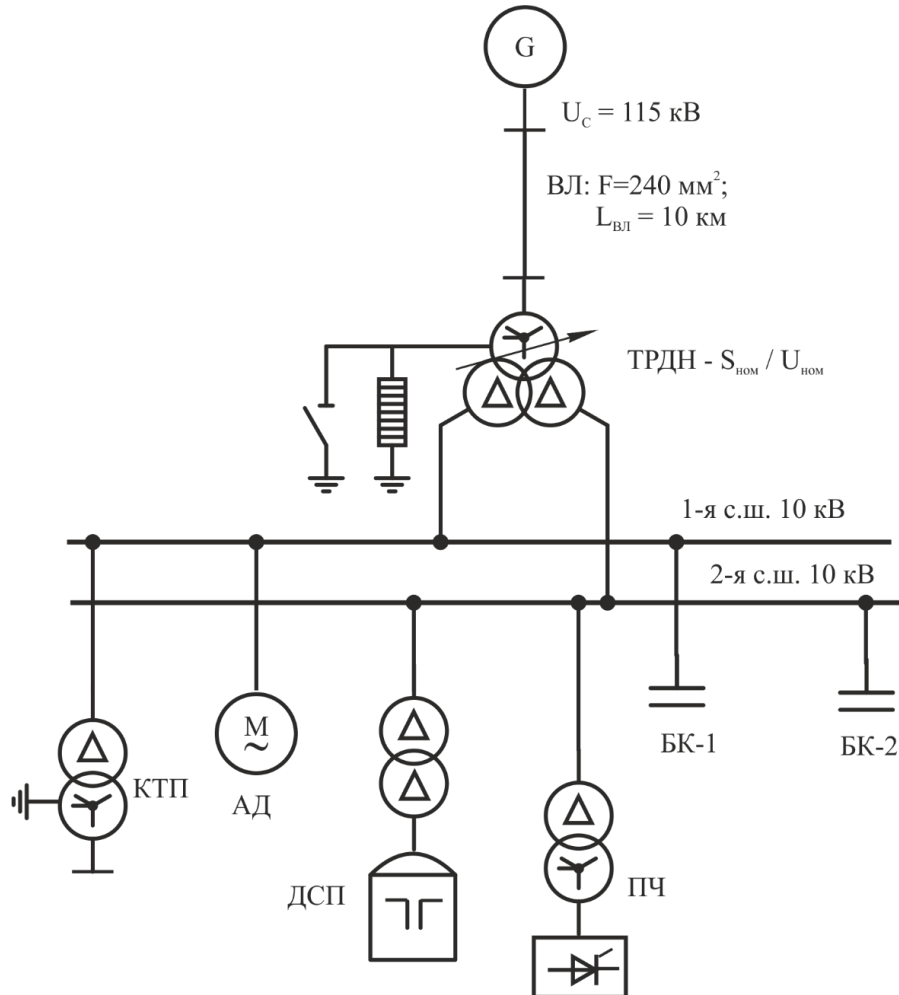


Рис. 1. Принципиальная схема системы электроснабжения

Таблица 1

Исходные данные:

Система	Тр-тр ГПП			КТП			Асинхр. электродвигатели				
$U_c, \text{кВ}$	$S_{т.ном}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	$U_{квн}, \%$	$S_{т.ном}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	Кол во	$K_{зт}$	$\cos \varphi_n$	$P_{ном}, \text{МВт}$	КПД, от.ед	$K_{пуск}$	$K_{иа}$	$\cos \varphi$
115	25	10,5	1,6	7	0,7	0,8	3	0,95	6	0,7	0,8

Окончание таблицы 1

ДСП		Преобразователи		Мощность БК, Мвар	
$S_{т.ном}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	$\cos \varphi$	$S_{т.п.ном}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	$\cos \varphi$	БК1	БК2
8	0,8	2	0,7	2	5

Составим схему замещения, которая изображена на рис.2, и определим параметры её элементов. При этом условимся о том, что расчёты будем проводить в относительных единицах, приведенных к базисным условиям, приняв в качестве базисной мощности $S_6 = 100 \text{ МВА}$ и базисные напряжения на стороне высшего напряжения $U_6 = 115 \text{ кВ}$, а на стороне внутривозовского электроснабжения $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$.

С целью упрощения расчётов условимся также и о том, что групповые коэффициенты использования $K_{\text{на}}$ установленной мощности электроприёмников, получающих питание через трансформаторы всех КТП, одинаковы и равняются 0,7. С этой же целью примем $k_{\text{н.а. АД}}$ также равным 0,7.

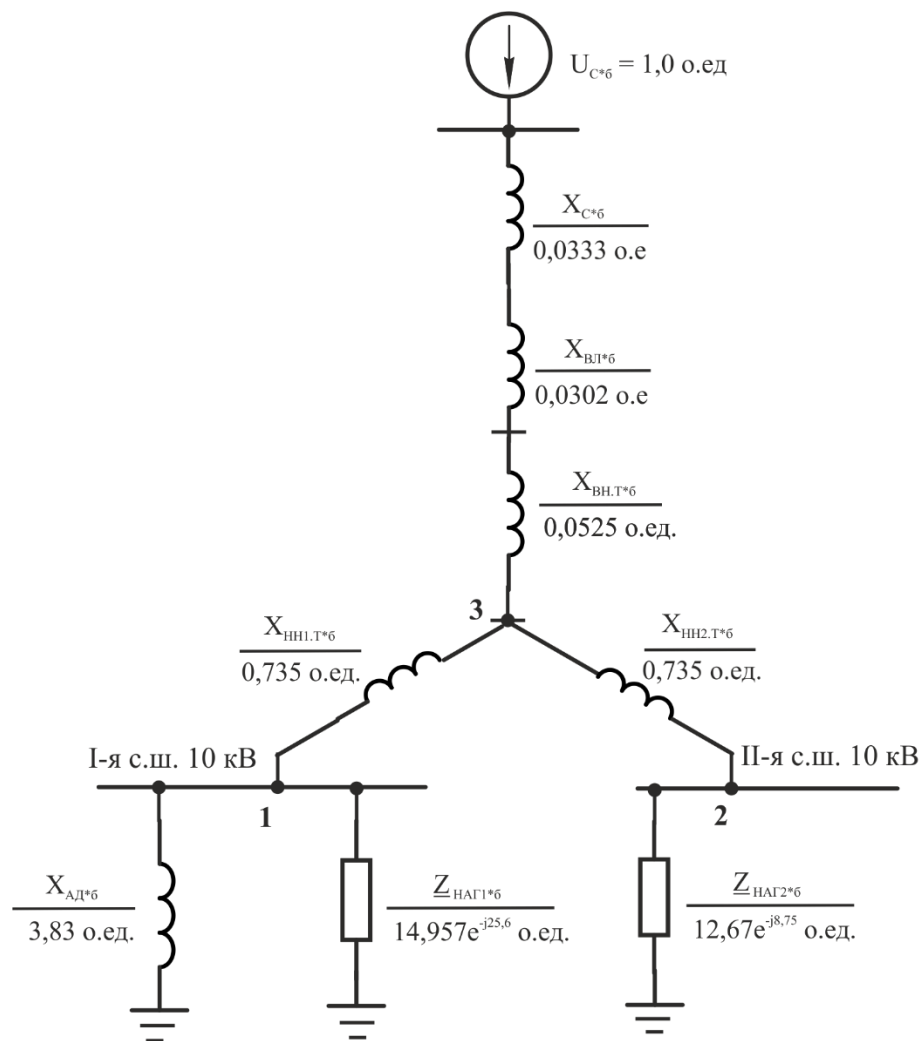


Рис. 2. Схема замещения для расчёта провалов напряжения

В режимах пуска электродвигатели вводятся в схемы замещения сверхпереходным сопротивлением, который при представлении его в относительных единицах, приведенных к базисным условиям, рассчитывается по выражению

$$X_{\text{АД}*\text{б}} = \frac{1}{K_{\text{пуск}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{АД, НОМ}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} = \frac{1}{6} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{АД, НОМ}} / (\eta_{\text{НОМ.АД}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ.АД}})} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} =$$

$$= \frac{1}{6} \cdot \frac{10^2_{\text{НОМ}}}{3 / (0,95 \cdot 0,8)} \cdot \frac{100}{10,5^2} = 3,83 \text{ от. ед.}$$

В этом выражении $K_{\text{пуск}}$ – кратность пускового тока двигателя.

Сопротивление системы в относительных единицах, приведенных к базисным условиям

$$X_{\text{С}*\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз}}} = \frac{100}{4000} = 0,025 \text{ от.ед.}$$

Сопротивление воздушной линии

$$X_{\text{ВЛ}*\text{б}} = X_{\text{уд}} \cdot L_{\text{ВЛ}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,0302 \text{ от.ед.}$$

Индуктивные сопротивления обмоток высокого $X_{\text{ВН.Т}}$ и низкого $X_{\text{НН.Т}}$ напряжений трансформатора ГПП, который имеет расщеплённую на 2 части низковольтную обмотку

$$X_{\text{ВН.Т}*\text{б}} = 0,125 \frac{U_{\text{к}} \%}{100\%} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{Т. ГПП. НОМ}}} = 0,125 \frac{10,5\%}{100\%} \frac{100}{25} = 0,0525 \text{ о.ед.};$$

$$X_{\text{НН.Т}*\text{б}} = 1,75 \frac{U_{\text{к}} \%}{100\%} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{Т. ГПП. НОМ}}} = 1,75 \frac{10,5\%}{100\%} \frac{100}{25} = 0,735 \text{ о.ед.};$$

Определим сопротивления обобщённых нагрузок 1-й и 2-й секций шин 10 кВ ГПП, выраженных в относительных единицах, приведенных к базисным условиям, и комплексной форме. Отметим, что при определении сопротивления обобщённой нагрузки первой секции шин в составе нагрузки не учитывается асинхронный электродвигатель, находящийся в режиме пуска. С учётом сказанного искомые сопротивления обобщённых нагрузок будем определять по выражениям

$$\underline{Z}_{\text{наг.1}*\text{б}} = \frac{\underline{Z}_{\text{наг.1}}}{Z_{\text{б}}} = \frac{\underline{U}_{\text{с}}^2}{\underline{S}_{\text{наг.1}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}; \quad (1)$$

$$\underline{Z}_{\text{наг.2}*\text{б}} = \frac{\underline{Z}_{\text{наг.2}}}{Z_{\text{б}}} = \frac{\underline{U}_{\text{с}}^2}{\underline{S}_{\text{наг.2}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}, \quad (2)$$

Отметим, что надстрочный индекс «'» в обозначениях полной мощности нагрузки 1-й секции шин $\underline{S}'_{\text{наг.1}}$ и её составляющих указывает на то, что они определены без учёта двигателя, который находится в режиме пуска.

При расчётах примем фазу вектора сетевого напряжения \underline{U}_c на комплексной плоскости равным нулю. Учитывая сказанное и то, что в режимах максимальных нагрузок на секциях шин 10 кВ напряжение поддерживается равным 10,5 кВ, которое равняется U_6 , выражения (1) и (2) принимают более простой вид

$$\underline{Z}_{\text{наг.1}*\delta} = \frac{S_6}{\underline{S}'_{\text{наг.1}}}; \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{\text{наг.2}*\delta} = \frac{S_6}{\underline{S}_{\text{наг.2}}}. \quad (4)$$

Таким образом, для нахождения указанных сопротивлений достаточно определить полные мощности нагрузок на секциях шин в комплексной форме с учётом мощности конденсаторных батарей, подключённых к секциям шин. Определим их по выражениям

$$\underline{S}'_{\text{наг.1}} = P'_{\text{наг.1}} + j(Q'_{\text{наг.1}} - Q_{\text{БК1}}); \quad (5)$$

$$\underline{S}_{\text{наг.2}} = P_{\text{наг.2}} + j(Q_{\text{наг.2}} - Q_{\text{БК2}}). \quad (6)$$

Так как секции шин 10 кВ с точки зрения расчёта электрических нагрузок относятся к 5-му уровню, активные и реактивные расчётные мощности согласно Руководящим указаниям по расчёту электрических нагрузок (РТМ 36.18.32.4-92) рассчитываются по формулам:

– на первой секции шин

$$P'_{\text{наг.1}} = K_{\text{ом}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{ТП}}} P_{\text{ТП.}i} + \sum_{i=1}^{N_{\text{в/в}}} k_{\text{иа.}i} P_{\text{ном.}i} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ТП}}} \Delta P_{\text{т.}i} \right]; \quad (7)$$

$$Q'_{\text{наг.1}} = K_{\text{ом}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{ТП}}} Q_{\text{ТП.}i} + \sum_{i=1}^{N_{\text{в/в}}} k_{\text{иа.}i} P_{\text{ном.}i} \text{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^{N_{\text{ТП}}} \Delta Q_{\text{т.}i} \right]. \quad (8)$$

Так как в нашем случае к первой секции подключен только один высоковольтный асинхронный электродвигатель, который в решаемой нами задаче находится в режиме пуска, вторые суммы в квадратных скобках равняются нулю. С учётом сказанного при заданных исходных данных (равенстве номинальных мощностей всех цеховых трансформаторов $S_{\text{т.ном}}$, их коэффициентов загрузки $K_{\text{з.т}}$, а также коэффициентов реактивной мощности расчётных нагрузок $\text{tg} \varphi_p$) расчётные выражения (7) и (8) трансформируются к виду

$$P'_{\text{наг.1}} = K_{\text{ом}} \cdot N_{\text{ТП}} \cdot \left[S_{\text{т.ном}} \cdot K_{\text{з.т}} \cdot \cos \varphi_p + \Delta P_{\text{т}} \right]; \quad (9)$$

$$Q'_{\text{наг.1}} = K_{\text{ом}} \cdot N_{\text{ТП}} \cdot \left[S_{\text{т. ном}} \cdot K_{3. \text{т}} \cdot \sin \varphi_p + \Delta Q_{\text{т}} \right]. \quad (10)$$

Прежде чем воспользоваться этими формулами найдём численные значения потерь активной и реактивной мощности в одном цеховом трансформаторе

$$\Delta P_{\text{т}} = \Delta P_{\text{хх}} + K_{3. \text{т}}^2 \Delta P_{\text{кз}} = 2,65 + 0,7^2 \cdot 16,5 = 10,735 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_{\text{т}} = \frac{S_{\text{т. ном}}}{100 \%} \left(I_{\text{хх}} \% + K_{3. \text{т}}^2 U_{\text{кз}} \% \right) = \frac{1600}{100} (1\% + 0,7^2 \cdot 6\%) = 63,04 \text{ квар.}$$

Коэффициент одновременности максимумов нагрузок всех ТП $K_{\text{ом}}$ определим по нижеприведенной таблице

Таблица 2

Значения коэффициента одновременности максимумов нагрузки

Средневзвешенный коэффициент использования	Число присоединений на сборных шинах 6, 10 кВ, РП, ГПП			
	2 – 4	5 – 8	9 – 25	> 25
$K_{\text{иа}} < 0,3$	0,9	0,8	0,75	0,7
$0,3 \leq K_{\text{иа}} < 0,5$	0,95	0,9	0,85	0,8
$0,5 \leq K_{\text{иа}} \leq 0,8$	1,0	0,95	0,9	0,85
$K_{\text{иа}} > 0,8$	1,0	1,0	0,95	0,9

Согласно исходным данным количество КТП, подключённых к 1-й секции шин 10 кВ ГПП, равняется 7-и, а групповой коэффициент использования установленной мощности электроприёмников, подключённых к каждому трансформатору, равняется 0,7.

При указанных данных $K_{\text{ом}} = 0,95$. Тогда подставив числовые данные всех величин, входящих в выражения (8) и (10) получим

$$P'_{\text{наг.1}} = 0,95 \cdot 7 \cdot [1600 \cdot 0,7 \cdot 0,8 + 10,735] = 6030 \text{ кВт};$$

$$Q'_{\text{наг.1}} = 0,95 \cdot 7 \cdot [1600 \cdot 0,7 \cdot 0,6 + 63,04] = 4888 \text{ квар.}$$

Подставив полученные значения активной и реактивной нагрузки в (5) найдём искомые значения полной нагрузки на 1-й с.ш. в комплексной форме

$$\underline{S}'_{\text{наг.1}} = P'_{\text{наг.1}} + j(Q'_{\text{наг.1}} - Q_{\text{БК1}}) = 6,03 + j(4,888 - 2) = 6,686 e^{j25,6^\circ} \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

Ввиду того, что ко 2-й секции шин подключены только 2 электроприёмника, вероятность того, что они на одном и том же интервале времени будут работать в номинальном режиме велика. Поэтому расчётную мощность на этой секции шин определим путём суммирования их номинальных мощностей

$$P_{\text{наг. 2}} = S_{\text{ном. ДСП}} \cdot \cos \varphi_{\text{ДСП}} + S_{\text{ном. пр}} \cdot \cos \varphi_{\text{пр}} = 8 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,7 = 7,8 \text{ МВт};$$

$$Q_{\text{наг. 2}} = S_{\text{ном. ДСП}} \cdot \sin \varphi_{\text{ДСП}} + S_{\text{ном. пр}} \cdot \sin \varphi_{\text{пр}} = 8 \cdot 0,6 + 2 \cdot 0,7 = 6,2 \text{ Мвар}.$$

Подставив полученные значения активной и реактивной мощности в (6) получим искомое значение полной нагрузки на второй секции шин в комплексной форме

$$\underline{S}_{\text{наг. 2}} = P_{\text{наг. 2}} + j(Q_{\text{наг. 2}} - Q_{\text{БК2}}) = 7,8 + j(6,2 - 5) = 7,892 e^{j8,75^\circ} \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

Воспользовавшись выражениями (3) и (4) найдём искомые комплексные значения сопротивлений обобщённых нагрузок

$$\underline{Z}_{\text{наг. 1}^*6} = \frac{S_6}{\underline{S}'_{\text{наг. 1}}} = \frac{100}{6,686 e^{j25,6^\circ}} = 14,957 e^{-j25,6^\circ} \text{ от.ед.};$$

$$\underline{Z}_{\text{наг. 2}^*6} = \frac{S_6}{\underline{S}_{\text{наг. 2}}} = \frac{100}{7,892 e^{j8,75^\circ}} = 12,67 e^{-j8,75^\circ} \text{ от. ед.}$$

Преобразуем схему, представленную на рис. 2 к виду, изображённому на рис. 3

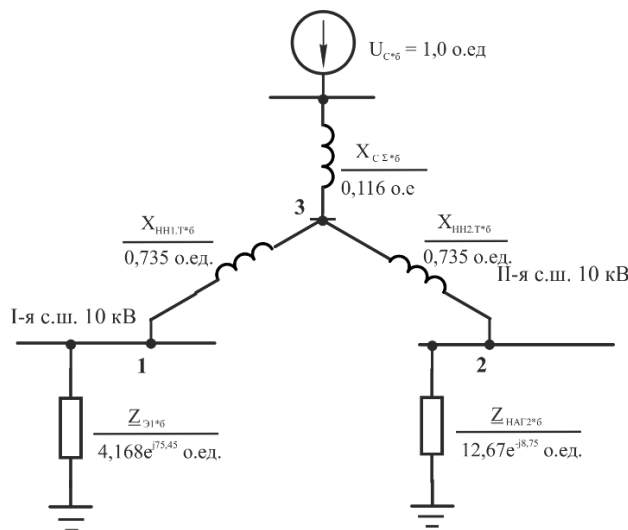


Рис. 3. Промежуточная схема замещения

В этой схеме

$$X_{C_\Sigma^*6} = X_{C^*6} + X_{ВЛ^*6} + X_{ВН. Т^*6} = 0,0333 + 0,0302 + 0,0525 = 0,116 \text{ от.ед.},$$

а эквивалентное сопротивление $\underline{Z}_{\text{Д1}^*6}$ получено в результате параллельного сложения сопротивления обобщённой нагрузки 1-й секции шин $\underline{Z}_{\text{наг. 1}^*6}$ и сопротивления двигателя $X_{\text{АД}^*6}$, находящегося в режиме пуска

$$\underline{Z}_{\Sigma 1*6} = \frac{\underline{Z}_{\text{наг.1*6}} \cdot jX_{\text{АД*6}}}{\underline{Z}_{\text{наг.1*6}} + jX_{\text{АД*6}}} = \frac{14,957 e^{-j25,6^\circ} \cdot 3,83 e^{j90^\circ}}{14,957 e^{-j25,6^\circ} + j3,83} = 4,168 e^{j75,45^\circ} = 1,0471 + j4,034$$

Далее сложим последовательно сопротивления обобщённой нагрузки 2-й секции шин $\underline{Z}_{\text{наг.2*6}}$ и одной половины вторичной обмотки трансформатора ГПП. В результате схема, представленная на рис. 3, преобразуется к виду, показанную на рис. 4.

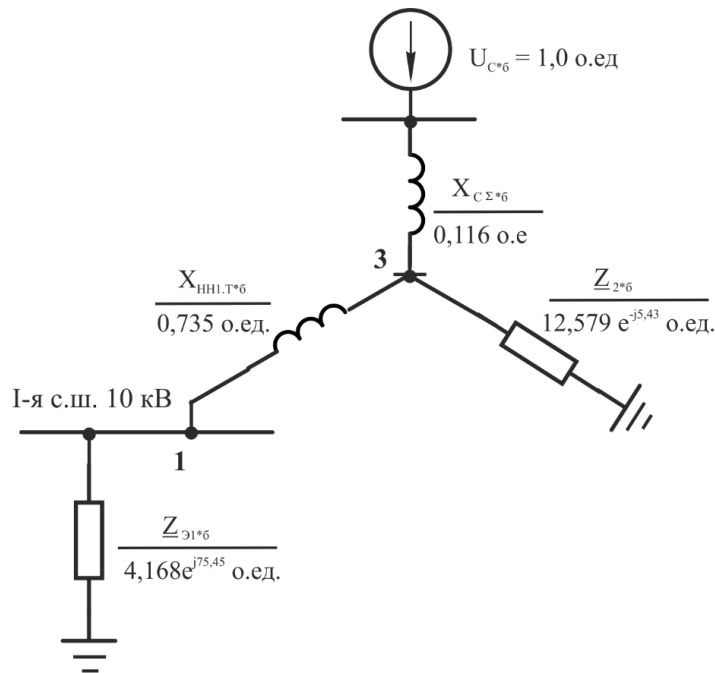


Рис. 4

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2*6} &= \underline{Z}_{\text{наг.2*6}} + jX_{\text{НН.Т*6}} = 12,67 e^{-j8,75^\circ} + j0,735 = 12,523 - j1,926 + j0,735 = \\ &= 12,523 - j1,191 = 12,579 e^{-j5,43^\circ} \text{ от.ед.} \end{aligned}$$

Сложим теперь параллельно ветви с сопротивлениями $X_{C\Sigma*6}$ и $\underline{Z}_{\text{наг.2*6}}$ и обозначим полученное сопротивление через $\underline{Z}_{\Sigma 2*6}$, численное значение которого

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\Sigma 2*6} &= \frac{jX_{C\Sigma*6} \cdot \underline{Z}_{2*6}}{jX_{C\Sigma*6} + \underline{Z}_{2*6}} = \frac{j0,116 \cdot 12,579 e^{-j5,43^\circ}}{j0,116 + 12,579 e^{-j5,43^\circ}} = \frac{1,4592 e^{j84,57^\circ}}{j0,116 + 12,523 - j1,075} = \\ &= \frac{1,4592 e^{j84,57^\circ}}{12,569 e^{-j4,91^\circ}} = 0,1161 e^{j89,48^\circ} = 0,00105 + j0,116095 \text{ от.ед.} \end{aligned}$$

Учитывая то, что сопротивление ветви с источником $X_{C\Sigma*6}$ много меньше сопротивления другой ветви $\underline{Z}_{\text{наг.2*6}}$ эквивалентная Э.Д.С 2-х параллельно сложенных ветвей, определяемая по формуле

$$\underline{E}_3 = \frac{\sum_{i=1}^2 \underline{E}_i \underline{Y}_i}{\sum_{i=1}^2 \underline{Y}_i}$$

останется равной $E_{c1*6} \approx 1,0$.

Найдём теперь остаточное напряжение на 1-й секции шин (в узле 1) при прямом пуске электродвигателя используя закон Ома

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \frac{E_{c*6} \cdot U_6}{\underline{Z}_{\Sigma 2*6} + jX_{HH.T*6} + \underline{Z}_{\Sigma 1*6}} \cdot \underline{Z}_{\Sigma 1*6} = \\ &= \frac{1,0 \cdot 10,5}{0,00105 + j0,116095 + j0,735 + 1,0471 + j4,034} \cdot 4,168 e^{j75,45^\circ} = \\ &= \frac{10,5}{1,0482 + j4,885} \cdot 4,168 e^{j75,45^\circ} = 8,76 e^{-j2,45^\circ} \text{ кВ} \end{aligned}$$

Провал напряжения на 1-й секции шин 10 кВ ГПП при прямом пуске двигателя составляет

$$\delta U_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{ном}} - U_1}{U_{\text{ном}}} 100\% = \frac{10 - 8,76}{10} 100\% = 12,4\% ,$$

что больше $\delta U_{\text{пр. доп}} = 10\% .$

Такой провал напряжения не допустим. Поэтому следует использовать систему мягкого пуска.