

## 4. Расчётная часть

### 4.1. Общие положения

Марка и сечение кабеля данного класса напряжения выбирается и проверяется по 4 условиям, предусмотренным в нормативно-технической документации и литературе:

1. Выбор сечения кабеля по нагреву. Кабели должны удовлетворять требованиям в отношении предельно допустимого нагрева с учетом нормальных и послеаварийных режимов. Условие:  $I_{д.т.} > I_p$ , где  $I_{д.т.}$  - допустимый длительный ток для кабелей (ПУЭ, 6 изд., гл. 1.3), А;  $I_p$  - расчетный ток нагрузки.
2. Проверка сечения по экономической плотности тока. Условие:  $S_{выб} > S_{эк}$ , где  $S_{выб}$  - предварительно выбранное сечение кабеля по 1 условию, мм<sup>2</sup>;  $S_{эк}$  - экономически целесообразное сечение (ПУЭ, 6 изд., п. 1.3.25), мм<sup>2</sup>.
3. Проверка сечения кабеля на термическую устойчивость к действию токов короткого замыкания. Условие:  $S_{выб} > S_{min}$ , где  $S_{выб}$  - предварительно выбранное сечение кабеля по 1 и 2 условиям, мм<sup>2</sup>;  $S_{min}$  - минимально допустимое сечение кабеля по термической устойчивости, мм<sup>2</sup>.
4. Проверка по потере напряжения. Условие:  $\Delta U > \Delta U_p$ , где  $\Delta U$  - нормативное значение потери напряжения,  $\Delta U_p$  - расчетное значение потери напряжения.

Из вышеперечисленных условий выбирается то, которое является самым требовательным.

### 4.2. Исходные данные и результаты расчётов

#### 4.2.1. Исходные данные

В соответствии с техническим заданием проектируемые кабельные врезки предназначены для электропитания от КТП «Наплатинская» с 1 силовым трансформатором на 400кВА ВЛ-0,4кВ №1. КТП обеспечивает электроснабжение жилого массива.

Время работы КЛ 24 часа в сутки. Продолжительность потребления 8760 ч. В соответствии с техническим заданием кабеля выбраны марки АСБ2л, проложенные в земле. По данным полученным от сетевой организации 3х фазный ток короткого замыкания на шинах ПС №48  $I_{кз\ max} = 5292A$   $I_{кз\ min} = 4578A$ . Время срабатывания защиты линии  $t_d = 1,5$  секунды.

В п.2.5 Пояснительной записки определено:

- по ф.2.3. расчётная нагрузка на шинах РУ-0,4кВ КТП «Наплатинская» от силовой части ВЛ-0,4кВ №1  $S_{расч.л.} = 75,5кВА$ ;
- по ф.2.4. расчётная нагрузка на шинах РУ-0,4кВ КТП «Наплатинская» от уличного освещения (светильников установленных на опорах ВЛ-0,4кВ №1)  $S_{расч.л.} = 2,1кВА$ ;
- по ф.2.6. расчётный ток линии электроснабжения ВЛ-0,4кВ №1  $I_{расч.л.} = 114,4A$ ;
- по ф.2.10. максимальный (пусковой) ток линии уличного освещения  $I_{пуск.УО} = 31,5A$ .

#### 4.2.2. Расчет токов короткого замыкания

С учётом изменений связанных с реконструкцией рассматриваемой системы электроснабжения выполнены проверочные расчёты токов трёхфазного к.з. на стороне 10кВ, приведенные на листе 3 графического материала шифр 4710028255-012-ЭС-ГМ.

					4710028255-012-ЭС-ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Цель расчёта – определение токов короткого замыкания на высокой и низкой стороне проектируемой трансформаторной подстанции для проверки выбранного оборудования на действие токов короткого замыкания.

Для ограничения размеров аварии необходимо сократить время протекания токов к.з. Эту задачу выполняют с помощью предохранителей, электромагнитных расцепителей, автоматических выключателей и быстродействующей релейной защиты с действием на отключение без выдержки времени.

Существуют одно-, двух-, трехфазные к.з. Трехфазные к.з. - это симметричные к.з., при которых, напряжение, ток и сопротивления равны. Это наиболее опасное к.з. Расчетные токи трехфазного к.з. используются для проверки выбранного оборудования и для расчета релейной защиты.

Расчет токов короткого замыкания производится для трех случаев: в системе с неограниченной мощностью  $S_c = \infty$ , в системе с ограниченной мощностью  $S_c \neq \infty$  и в установках с напряжением до 1000 В.

#### 4.2.3. Расчёт токов короткого замыкания для линий до 1000В

Расчёт токов короткого замыкания в сети 0,4кВ проводим в соответствии с РД 153-34.0-20.257-98, используя расчётную схему (рис.1.) и схему замещения (рис.2.) отдельно для линий электроснабжения и уличного освещения.

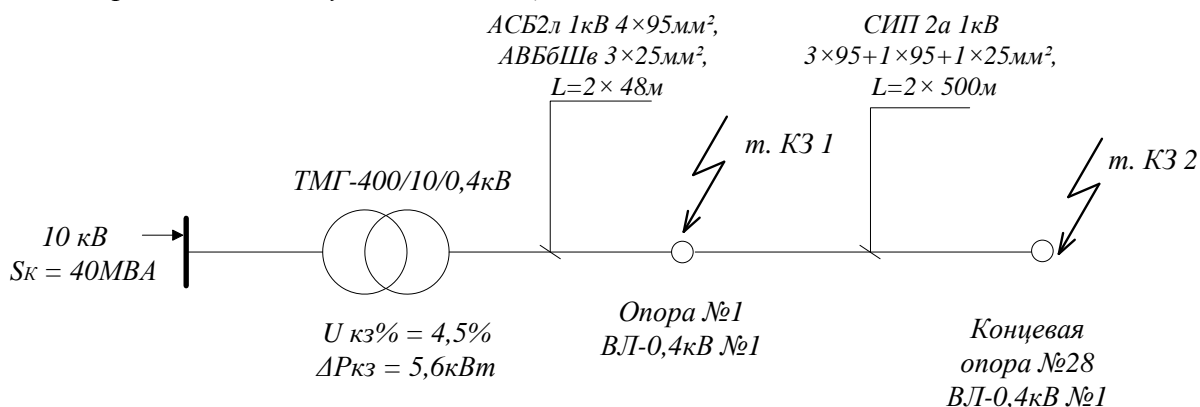


Рис.1. Расчётная схема токов к.з. линии КВЛЭП-0,4кВ

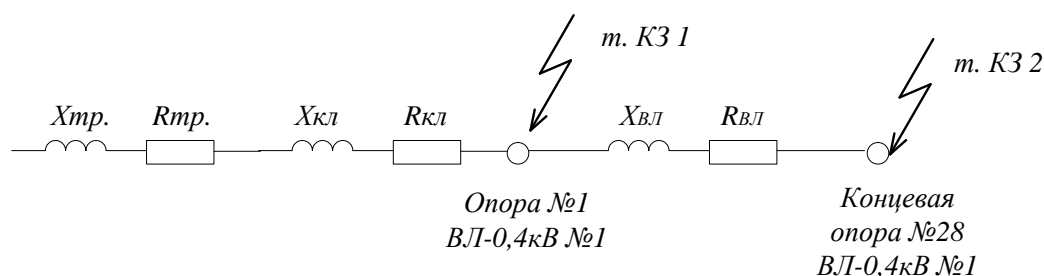


Рис. 2. Схема замещения для расчёта токов к.з. линии КВЛЭП-0,4кВ

Расчёты проводим для токов одно- и трёхфазного короткого замыкания, используя формулы:

$$4.1. \quad I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \times Z_{\text{к}}}, \text{ кА},$$

где:  $U_{\text{л}}$  - линейное номинальное напряжение сети в точке к.з., кВ;

$Z_k$  – полное сопротивление до точки к.з., Ом.

$$4.2. \quad I_{кз}^{(1)} = \frac{U_{кф}}{Z_n + \frac{Z_T^{(1)}}{3}}, \text{ кА},$$

где:  $U_{кф}$  – фазное напряжение сети в точке к.з., кВ;

$Z_T^{(1)}/3$  – полное сопротивление обмоток трансформатора, при соединении обмоток по схеме  $\Delta/Y$  с выведенным нулем для трансформатора марки ТМГ-400/10/0,4, применяемом на КТП «Наплатинская» равно 0,019 Ом;

$Z_n$  – полное сопротивление петли фаза-нуль до точки к.з., Ом.

В рабочем проекте реконструкции участка ВЛ-0,4кВ от ТП-46 шифр ГС-010424-043-ЭС.Т1 в качестве проводника выбран самонесущий изолированный провод СИП 2а сечением  $3 \times 95 + 1 \times 95 + 1 \times 25 \text{ мм}^2$ . Проводники сечением  $95 \text{ мм}^2$  используются для электроснабжения жилых домов и сечением  $25 \text{ мм}^2$  для нужд уличного освещения. Поэтому предварительно принимаем для выполнения кабельных вставок кабеля с соответствующими сечениями токоведущих жил со следующими параметрами:

- активное сопротивление жилы кабеля сечением  $95 \text{ мм}^2$  0,329 Ом/км;
- реактивное (индуктивное) сопротивление кабеля сечением  $95 \text{ мм}^2$  0,0602 Ом/км;
- активное сопротивление жилы кабеля сечением  $25 \text{ мм}^2$  1,25 Ом/км;
- реактивное (индуктивное) сопротивление кабеля сечением  $25 \text{ мм}^2$  0,0662 Ом/км.

Для точки к.з. I сопротивление линии электроснабжения, с учётом сопротивления трансформатора и токи к.з. составят:

$$R_{эснI} = R_{тр} + R_{95} \times l_1 = 5,6 + 0,329 \times 0,048 = 5,616 \text{ мОм};$$

$$X_{эснI} = X_{тр} + X_{95} \times l_1 = 17,12 + 0,0602 \times 0,048 = 17,123 \text{ мОм};$$

$$Z_{кэснI} = \sqrt{(R_{эснI})^2 + (X_{эснI})^2} = \sqrt{(5,616)^2 + (17,123)^2} = 18,021 \text{ мОм};$$

$$I_{к.з.эснI}^{(3)} = U_{л} / \sqrt{3} \times Z_{кэснI} = 400 / 1,73 \times 18,021 = 12,83 \text{ кА};$$

$$I_{\hat{e}.\hat{c}.\hat{y}.\hat{m}.\hat{i}}^{(1)} = \frac{U_{\hat{e}\hat{o}}}{Z_i + \frac{Z_o^{(1)}}{3}} = \frac{U_{\hat{e}\hat{o}}}{2\sqrt{(R_{95} \times l_1)^2 + (X_{95} \times l_1)^2} + \frac{Z_o^{(1)}}{3}} =$$

$$= \frac{230}{2 \times \sqrt{(0,329 \times 0,048)^2 + (0,0602 \times 0,048)^2} + 0,019} = 4,5 \text{ А}.$$

Для точки к.з. I сопротивление линии уличного освещения, с учётом сопротивления трансформатора и токи к.з. составят:

$$R_{yoI} = R_{тр} + R_{25} \times l_1 = 5,6 + 1,25 \times 0,048 = 5,66 \text{ мОм};$$

$$X_{yoI} = X_{тр} + X_{25} \times l_1 = 17,12 + 0,0662 \times 0,048 = 17,123 \text{ мОм}.$$

$$Z_{кyoI} = \sqrt{(R_{yoI})^2 + (X_{yoI})^2} = \sqrt{(5,66)^2 + (17,123)^2} = 18,034 \text{ мОм};$$

$$I_{к.з.yoI}^{(3)} = U_{л} / \sqrt{3} \times Z_{кyoI} = 400 / 1,73 \times 18,034 = 12,82 \text{ кА};$$

					4710028255-012-ЭС-ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$I_{\dot{e}, \dot{\varsigma}, \dot{o} \dot{i}}^{(1)} = \frac{U_{\dot{e} \dot{o}}}{Z_{\dot{i}} + \frac{Z_{\dot{o}}^{(1)}}{3}} = \frac{U_{\dot{e} \dot{o}}}{\sqrt{((R_{95} + R_{25}) \times l_1)^2 + (X_{25} + \tilde{O}_{95}) \times l_1)^2} + \frac{Z_{\dot{o}}^{(1)}}{3}} =$$

$$= \frac{230}{\sqrt{((0,329 + 1,25) \times 0,048)^2 + ((0,0602 + 0,0662) \times 0,048)^2} + 0,019} = 2,42 \text{ A}.$$

Для точки к.з. 2 сопротивление линии электрообеспечения, с учётом сопротивления трансформатора и токи к.з. составят:

$$R_{\text{эсн}2} = R_{\text{тр}} + R_{95} \times l_1 + R_{95} \times l_2 = 5,6 + 0,329 \times 0,048 + 0,329 \times 0,5 = 5,781 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{эсн}2} = X_{\text{тр}} + X_{95} \times l_1 + X_{95} \times l_2 = 17,12 + 0,0602 \times 0,048 + 0,0602 \times 0,5 = 17,15 \text{ мОм};$$

$$Z_{\text{кэсн}2} = \sqrt{(R_{\text{эсн}2})^2 + (X_{\text{эсн}2})^2} = \sqrt{(5,781)^2 + (17,15)^2} = 18,098 \text{ мОм};$$

$$I_{\text{к.з.эсн}1}^{(3)} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} \times Z_{\text{кэсн}1} = 400 / 1,73 \times 18,098 = 12,78 \text{ кА};$$

$$I_{\dot{e}, \dot{\varsigma}, \dot{y} \dot{n} \dot{i}}^{(1)} = \frac{U_{\dot{e} \dot{o}}}{Z_{\dot{i}} + \frac{Z_{\dot{o}}^{(1)}}{3}} = \frac{U_{\dot{e} \dot{o}}}{2\sqrt{(R_{95} \times (l_1 + l_2))^2 + (X_{95} \times (l_1 + l_2))^2} + \frac{Z_{\dot{o}}^{(1)}}{3}} =$$

$$= \frac{230}{2 \times \sqrt{(0,329 \times (0,048 + 0,5))^2 + (0,0602 \times (0,048 + 0,5))^2} + 0,019} = 1,14 \text{ A}.$$

Для точки к.з. 2 сопротивление линии уличного освещения, с учётом сопротивления трансформатора и токи к.з. составят:

$$R_{\text{уо}2} = R_{\text{тр}} + R_1 \times l_1 + R_1 \times l_2 = 5,6 + 1,25 \times 0,048 + 1,25 \times 0,5 = 6,241 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{уо}2} = X_{\text{тр}} + X_1 \times l_1 + X_1 \times l_2 = 17,12 + 0,0662 \times 0,048 + 0,0662 \times 0,5 = 17,16 \text{ мОм};$$

$$Z_{\text{к уо}2} = \sqrt{(R_{\text{уо}2})^2 + (X_{\text{уо}2})^2} = \sqrt{(6,241)^2 + (17,16)^2} = 18,26 \text{ мОм};$$

$$I_{\text{к.з.уо}2}^{(3)} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} \times Z_{\text{к уо}2} = 400 / 1,73 \times 18,26 = 12,66 \text{ кА};$$

$$I_{\dot{e}, \dot{\varsigma}, \dot{o} \dot{i} 2}^{(1)} = \frac{U_{\dot{e} \dot{o}}}{Z_{\dot{i}} + \frac{Z_{\dot{o}}^{(1)}}{3}} = \frac{U_{\dot{e} \dot{o}}}{\sqrt{(R_{25} \times (l_1 + l_2))^2 + (X_{25} \times (l_1 + l_2))^2} + \sqrt{(R_{95} \times (l_1 + l_2))^2 + (X_{95} \times (l_1 + l_2))^2} + \frac{Z_{\dot{o}}^{(1)}}{3}} =$$

$$= \frac{230}{\sqrt{(1,25 \times (0,048 + 0,5))^2 + (0,0662 \times (0,048 + 0,5))^2} + \sqrt{(0,329 \times (0,048 + 0,5))^2 + (0,0602 \times (0,048 + 0,5))^2} + 0,019} = 258,8 \text{ A}.$$

В разделе 2, п.2.6. настоящей Пояснительной записки были проведены расчёты и предварительно предложены к установке аппараты защиты проектируемых кабельных линий. В частности для защиты линии электроснабжения жилых домов принят плавкий предохранитель марки ППНИ-35 габарит 1 с номинальным током вставки 160А. Для защиты линии уличного освещения плавкий предохранитель марки ППНИ-33 габарит 0 с номинальным током вставки 40А. Проведённые расчёты токов однофазного короткого замыкания для этих линий подтвердили правильность выбора номиналов вставок, а именно:

$$\frac{I_{кз.эсн 2}^{(1)}}{I_{вст.ном.}} = \frac{1140}{160} = 7,125 > 3, \quad \frac{I_{кз.уо 2}^{(1)}}{I_{вст.ном.}} = \frac{258,8}{40} = 6,47 > 3.$$

Приведённые соотношения соответствуют требованиям п.1.7.79. ПУЭ, т.е. в электроустановках до 1кВ с глухозаземлённой нейтралью с целью обеспечения автоматического отключения аварийного участка проводимость фазных и нулевых защитных проводников должна быть выбрана такой, чтобы при замыкании на корпус или нулевой защитный проводник возникал ток КЗ, превышающий не менее чем в 3 раза номинальный ток плавкого элемента ближайшего предохранителя.

Анализ время-токовых характеристик предохранителей ППНИ показал, что при полученных расчётных значениях токов однофазного короткого замыкания, предохранитель защиты линии электроснабжения жилых домов отработает за время не превышающее в точке к.з. 1  $t_1=0,01$ сек., а в точке к.з. 2  $t_1=0,4$ сек., на линии уличного освещения точке к.з. 1  $t_1=0,01$ сек., а в точке к.з. 2  $t_1=0,3$ сек. Указанные значения соответствуют требованиям по срабатыванию защитного отключения приведенным в таблице 1.7.1 п.1.7.79 седьмого издания ПУЭ. Для системы TN при номинальном фазном напряжении 220В время отключения не должно превышать 0,4сек.

#### 4.2.4. Расчёты и выбор кабелей для строительства врезки в ВЛ-0,4кВ №1

##### 1. Расчетные токи нагрузки на РУ-0,4 кВ КТП «Наплатинская»

Как показали расчёты в п.2.6, нагрузка на шины РУ-0,4кВ КТП «Наплатинская» от вл-0,4кВ №1 будет составлять 77,6кВА. При этом, расчётные токи на проектируемые кабельные линии (врезки) составит:

- для линии электроснабжения жилых домов  $I_{расч. эсн.} = 114,4$ А;
- для линии уличного освещения  $I_{расч. уо.} = 31,5$ А.

Учитывая тот факт, что предварительно сечения кабелей для выполнения врезок выбраны 95 мм<sup>2</sup> и 25мм<sup>2</sup>, проводим дальнейшие изыскания. В соответствии с техническим заданием, марка кабеля, предлагаемого к применению для электроснабжения жилых домов, АСБ2л 4×95мм<sup>2</sup> на 1кВ. Согласно ПУЭ таблица №. 1.3.16 допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной пропитанной маслосканифольной и не стекающими массами изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемых в земле составляет  $I_{д.т.} = 240$  А при прокладке в земле.

$I_{д.т.} > I_p$ ,  $240А > 114,4А$ , первое условие для кабеля этой врезки выполнено.

Для строительства врезки кабельной линии на уличное освещение выбираем кабель марки АВБШв 3×25мм<sup>2</sup>. . Согласно ПУЭ таблица №. 1.3.7 допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с пластмассовой изоляцией в свинцовой или полихлорвиниловой оболочке, бронированных, прокладываемых в земле составляет  $I_{д.т.} = 115$  А при прокладке в земле.

$I_{д.т.} > I_p$ ,  $115А > 31,5А$ , первое условие для кабеля этой врезки также выполнено.

					4710028255-012-ЭС-ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. Проверка сечения кабеля АСБ2л 4×95мм<sup>2</sup> по экономической плотности тока. Экономически целесообразное сечение  $S_{эк}$ , мм<sup>2</sup>, определяется из соотношения (ПУЭ п.1.3.25):

$$\text{- для ЭСН жилых домов } S_{эк} = \frac{I_{расч.}}{J_{эк}} = \frac{114,4}{1,2} = 93,3 \text{ мм}^2,$$

$$\text{- для уличного освещения } S_{эк} = \frac{I_{расч.}}{J_{эк}} = \frac{31,5}{1,6} = 19,7 \text{ мм}^2,$$

где :  $I_p$  – расчётный ток в час максимума энергосистемы, А;

$J_{эк}$  – нормированное значение экономической плотности тока, А/мм<sup>2</sup>, для заданных условий работы, выбираемое по табл. 1.3.36 ПУЭ и равное 1,2 А/мм<sup>2</sup> и 1,6А/мм<sup>2</sup>.

Сечение, полученное в результате указанного расчёта, округляется до ближайшего стандартного сечения. Расчётный ток принимается для нормального режима работы, т.е. увеличение тока в аварийных и ремонтных режимах сети не учитывается.

Для линии ЭСН жилых домов  $S_{выб} > S_{эк}$ , в данном случае  $95 \text{ мм}^2 > 93,3 \text{ мм}^2$ , второе условие выполнено.

Для линии уличного освещения  $S_{выб} > S_{эк}$ , в данном случае  $25 \text{ мм}^2 > 19,7 \text{ мм}^2$ , второе условие также выполнено.

3. Проверка сечения кабелей на термическую устойчивость к действию токов короткого замыкания в точке к.з. I (как с наиболее тяжелыми условиями аварийной нагрузки):

$$S_{min} = \frac{I_{кз}^{(3)}}{C} \cdot \sqrt{t_l},$$

где:  $S_{min}$  - минимально допустимое сечение жилы кабеля, мм<sup>2</sup> ;

$I_{кз}^{(3)}$  - максимальный ток 3-фазного к.з., А в точке к.з. №1 КВЛЭП ;

$t_l$  - время срабатывания защиты для обеих линий, 0,01 сек;

$C$  - коэффициент для кабеля с алюминиевой жилой до 10 кВ (АСБ2л) принимается равным 90 и 65 для кабеля с алюминиевой жилой и поливинилхлоридной изоляцией (АВБбШв) .

$$S_{min} = \frac{12820}{90} \times \sqrt{0,01} = 14,3 \text{ мм}^2 ;$$

$$S_{min} = \frac{12820}{65} \times \sqrt{0,01} = 19,7 \text{ мм}^2$$

$S_{выб} > S_{min}$ ,  $95 \text{ мм}^2 > 14,3 \text{ мм}^2$  и  $25 \text{ мм}^2 > 19,7 \text{ мм}^2$ , третье условие выполнено.

Выбранные для прокладки кабеля термически устойчивы к действию токов короткого замыкания.

4. Проверка по потере напряжения

Потеря напряжения в сети трехфазного тока одна нагрузка в конце линии (линия ЭСН жилых домов):

$$\Delta U = \frac{1}{U_i \times \cos \phi} \times (R_0 \times \cos \phi + X_0 \times \sin \phi) \times \sum_1^n P_m \times l_m ;$$

					4710028255-012-ЭС-ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где

$\Delta U$  - потеря напряжения, %;

$U_n$  - номинальное линейное напряжение, кВ;

$P_m, Q_m$  – активная, кВт, и реактивная, кВАр, расчётные мощности в линии на участке  $m$ ;

$R_0, X_0$  – активное и реактивное сопротивление проводников на единицу длины линии, Ом/км;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности на вторичной обмотке питающего трансформатора;

$\sin \varphi$  – синус, соответствующий  $\cos \varphi$ ;

$l_m$  – длина линии на участке  $m$ , км.

$l$  - длина линии, км.

Подставляя численные значения получаем:

$$\Delta U = \frac{1}{0,4} \times (0,329 \times 0,92 + 0,0602 \times 0,39) \times 75,5 \times 0,048 = 3\hat{A};$$

$$\Delta U = \frac{3}{400} \times 100 = 0,75\%$$

С учётом расчётов проведенных в проекте реконструкции ВЛ-0,4кВ шифр ГС-010424-043-ЭС.Т1.Р сумма потерь напряжения на конце линии ЭСН жилых домов составит:  $\Delta U_{\text{общ.}} = 1,52 + 0,75 = 2,27\%$ .

Расчёт для линии уличного освещения проведем с учётом того, что эта линия получает однофазное питание:

$$\begin{aligned} \Delta U\% &= (\sqrt{3} \times 10^2 / U_{\text{ном.}}) \times I_{\text{расч.УО}} \times l \times (R_0 \times \cos \varphi + X_0 \times \sin \varphi) = \\ &= (1,73 \times 10^2 / 230) \times 31,5 \times 0,048 (1,25 \times 0,92 + 0,0662 \times 0,39) = 1,33\% \end{aligned}$$

В результате:  $2,27\% < 5\%$  и  $1,33\% < 5\%$  то есть потери в линиях не превышают 5%, четвертое условие выполнено. В итоге получаем окончательные сечения кабелей питающих ВЛ-0,4 кВ №1 от КТП «Наплатинская» 95 мм<sup>2</sup> для линии ЭСН жилых домов и 25 мм<sup>2</sup> для линии уличного освещения. И в данном случае определяющим для выбора явилось третье условие.

					4710028255-012-ЭС-ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		