

Кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»

**ОТЧЕТ**  
по производственной практике

Срок проведения практики с 5.02.2024 по 19.03.2024

Место проведения практики: «Жигулевская дистанция электроснабжения»

Руководитель практики от кафедры:  
Доцент, Сафронова Ирина Анатольевна

Выполнил: Отводенков П.С.  
Группа: СОДП-94

Самара 2024 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

	С.
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	3
1 РАСЧЕТ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....	4
1.1 Определение мощности расчётной тяговой подстанции .....	4
1.2 Определение количества понизительных трансформаторов.....	13
1.3 Расчет площади сечения проводов контактной сети для двух схем питания	18
1.4 Проверка выбранной площади сечения проводов контактной сети на нагревание .....	22
2 ПРОЕКТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ .....	25
2.1 Определение нормативных нагрузок на провода контактной сети .....	25
2.2 Расчет натяжения проводов .....	31
2.3 Определение допустимых длин пролетов .....	32
2.4 Расчет и подбор опор контактной сети.....	35
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	45

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тип участка дороги – магистральная;

Число путей – 2;

Тип рельсов – Р75.

Тип локомотива в нечётном направлении – сцепка из двух электровозов 2ЭС6 «Синара»;

Тип локомотива в чётном направлении – 3ЭС6 «Синара»;

Номинальное напряжение на шинах тяговой подстанции – 3,3 кВ.

Расчётная ТП – Услава – 63 км;

Смежные ТП – Переволоки – 52 км, Отвага – 85 км.

Масса поезда, нечётного направления – 6300 т.

Масса поезда, чётного направления – 6300 т.

Интервал - 10 минут для обоих направлений;

Грузопоток нечётного направления - 50,0 млн. т·км/км

Грузопоток чётного направления - 50,0 млн. т·км/км

Трансформаторная мощность районных потребителей - 4,6 МВ·А

Число суток в вес/лет период - 260 суток

Температура в период повыш. инт. движ. - 26 °С

Продолжительность периода повыш. инт. движ. – 3,0 ч.

Результаты тяговых расчетов в программном комплексе КОРТЭС приведены в Приложении А.

# 1 РАСЧЕТ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

## 1.1 Определение мощности расчётной тяговой подстанции

Выполнение первой части дипломного проекта начинается с расчёта мощности подстанции, мощности её понизительных трансформаторов. Трансформаторы выбираются по ГОСТ 14209-85, согласно которому при сроке службы 25 лет средняя относительная интенсивность износа его изоляции не должна превышать единицы, а температура наиболее нагретой точки обмотки и верхних слоёв масла не должна быть больше нормативных.

При расчёте относительной интенсивности износа изоляции трансформатора принимается, что размеры движения и расход электроэнергии на тягу поездов в осенне-зимний период не выше, чем в весенне-летний. Расчёт ведётся в предположении, что износ изоляции обмоток происходит только в период восстановления нормального движения после «окна». При этом учитываются три режима движения поездов, определяющих температуру обмоток и масла. Режим нормального движения поездов, режим движения поездов после «окна» и режим наибольшего размера движения поездов на участке.

Для каждого из этих режимов определены токовые нагрузки подстанций; средний и эффективный ток.

Указав расположение тяговых подстанций на участке, выбрав из них расчетную фидерную зону, необходимо найти средние и эффективные токи поездов, отнесенных к фидерам расчетной подстанции.

Для этого по разложенном графике поездного тока при двустороннем питании или непосредственно по графику поездного тока при одностороннем питании находятся средние значения и квадрат эффективного значения тока каждого фидера.

Для этого график поездного тока (разложенного или неразложенного)

необходимо разбить на отрезки, в пределах которых ток изменяется не более чем на 80–100 А для участков постоянного тока. После чего среднее значение поездного тока и среднее значение его квадрата (квадрат эффективного тока) могут быть определены по формулам:

$$I = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{n_0} \bar{I}_{i\text{cp}} \cdot t_i ; \quad (1.1)$$

$$I^2 = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{n_0} \bar{I}_{i\text{cp}}^2 \cdot t_i , \quad (1.2)$$

где  $n_0$  – количество отрезков на графике поездного тока;

$\bar{I}_{i\text{cp}}$  – среднее значение тока поезда за рассматриваемый промежуток времени  $t_i$ ;

$t$  – время хода поезда по фидерной зоне.

Среднее значение тока для не разложенного графика (1.1).

$$\begin{aligned} I_1 = & \frac{1}{8,74} \cdot \left( \frac{6804 + 6804}{2} \cdot 0,50 + \frac{6804 + 6804}{2} \cdot 0,83 + \frac{6804 + 6804}{2} \cdot 0,84 \right. \\ & + \frac{6804 + 6804}{2} \cdot 0,88 + \frac{6804 + 6804}{2} \cdot 0,89 + \frac{6804 + 6804}{2} \cdot 0,95 \\ & + \frac{6804 + 268}{2} \cdot 0,94 + \frac{268 + 100}{2} \cdot 0,78 + \frac{100 + 100}{2} \cdot 0,70 + \frac{100 + 100}{2} \\ & \cdot 0,71 + \frac{100 + 100}{2} \cdot 0,71 + \left. \frac{100 + 100}{2} \cdot 0,7 = 4237 \text{ А} \right) \end{aligned}$$

Эффективное значение тока для не разложенного графика (1.2).

$$\begin{aligned} I_{\text{э1}}^2 = & \frac{1}{8,74} \cdot \left( \left( \frac{6804 + 6804}{2} \right)^2 \cdot 0,50 + \left( \frac{6804 + 6804}{2} \right)^2 \cdot 0,83 \right. \\ & + \left( \frac{6804 + 6804}{2} \right)^2 \cdot 0,84 + \left( \frac{6804 + 6804}{2} \right)^2 \cdot 0,88 + \left( \frac{6804 + 6804}{2} \right)^2 \cdot 0,89 + \\ & \left. \left( \frac{6804 + 268}{2} \right)^2 \cdot 0,94 + \left( \frac{268 + 100}{2} \right)^2 \cdot 0,78 + \left( \frac{100 + 100}{2} \right)^2 \cdot 0,70 + \left( \frac{100 + 100}{2} \right)^2 \cdot 0,71 + \right. \\ & \left. \left( \frac{100 + 100}{2} \right)^2 \cdot 0,71 + \left( \frac{100 + 100}{2} \right)^2 \cdot 0,7 = 4237 \text{ А} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{6804 + 6804}{2}\right)^2 \cdot 0,95 + \left(\frac{6804 + 268}{2}\right)^2 \cdot 0,94 + \left(\frac{268 + 100}{2}\right)^2 \cdot 0,78 \\
& + \left(\frac{100 + 100}{2}\right)^2 \cdot 0,70 + \left(\frac{100 + 100}{2}\right)^2 \cdot 0,71 + \left(\frac{100 + 100}{2}\right)^2 \cdot 0,71 \\
& + \left(\frac{100 + 100}{2}\right)^2 \cdot 0,70 = 27255527 \text{ A}^2
\end{aligned}$$

Аналогично рассчитаем значения токов для оставшихся трех фидеров и для разложенного графика поездного тока, результаты сведем в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 - Результаты расчета фидерных зон

Фидерная зона	Средний ток, А		Квадрат эфф. тока, А <sup>2</sup>		Время хода
	Неразложенный график	Разложенный график	Неразложенный график	Разложенный график	Под током
Ф1	4237	1256	27255527	2861365	8,74
Ф2	414	294	488998	413762	7,67
Ф3	482	71	753976	7555	15,95
Ф4	3880	2087	17461591	6261988	18,55

Зная среднее и эффективное значения поездного тока, отнесенного к фидеру, можно найти среднее и эффективные токи фидера от всех поездов. Для этого воспользуемся формулами, которые при однотипных поездах имеют вид:

$$\bar{I}_\phi = n_\phi \cdot \frac{N}{N_0} \cdot \bar{I}. \quad (1.3)$$

Для эффективных токов при двустороннем питании:

$$I^2_{\phi э} = \frac{4}{3} \cdot n_\phi \cdot \gamma \cdot I_s^2 + \left(n_\phi - \frac{4}{3}\right) \cdot n_\phi \cdot \gamma \cdot (\bar{I})^2, \quad (1.4)$$

где  $n_\phi$  – наибольшее число поездов в фидерной зоне, равное:

$$n_{\phi} = \frac{t}{\Theta_0}, \quad (1.5)$$

где  $\Theta_0=10$  мин. – заданный минимальный интервал между поездами;

$t$  – время хода по фидерной зоне;

$N$  – число пар поездов в сутки при нормальном режиме;

$N_0$  – пропускная способность участка дороги в сутки.

$$N_0 = 1440 / \Theta_0, \quad (1.6)$$

где 1440 – число минут в сутках.

$$N_0 = 1440 / 10 = 144$$

$$N = \frac{M \cdot (1 + K_T) \cdot K_H}{365 \cdot Q}, \quad (1.7)$$

где  $M$  – грузопоток, т км/км;

$K_T = 0,45$ - коэффициент тары;

$Q$  – масса поезда, т;

$K_H = 1,1$ - коэффициент годовой не равномерности движения.

$$N_{\text{нечет}} = \frac{50,0 \cdot (1 + 0,45) \cdot 1,3 \cdot 10^6}{365 \cdot 6300} = 41;$$

$$N_{\text{чет}} = \frac{50,0 \cdot (1 + 0,45) \cdot 1,3 \cdot 10^6}{365 \cdot 6300} = 41.$$

Коэффициент использования пропускной способности  $\gamma = \frac{N}{N_0}$ . Его следует

брать каждый раз соответствующим расчетному режиму. Для режима

наибольшей пропускной способности  $\gamma_{\max} = \frac{N}{N_0} = 1$ , для режима после окна

$$\gamma_{\text{сг}} = \frac{N}{N_0} = 0,9.$$

Для нормального пропускного режима.

Для нечетного пути:

$$\gamma_{\text{нечет}} = \frac{N_{\text{нечет}}}{N_0} = \frac{41}{144} = 0,28.$$

Для четного пути:

$$\gamma_{\text{чет}} = \frac{N_{\text{чет}}}{N_0} = \frac{41}{144} = 0,28.$$

Найдем наибольшее число поездов в фидерной зоне по формуле (1.5):

$$n_{\phi 1} = \frac{8,74}{10} = 0,87;$$

$$n_{\phi 2} = \frac{7,67}{10} = 0,77;$$

$$n_{\phi 3} = \frac{15,95}{10} = 1,59;$$

$$n_{\phi 4} = \frac{18,55}{10} = 1,86.$$

Найдем среднее значение поездного тока по формуле (1.3)

Для режима наибольшей пропускной способности:

$$I_{\phi 1} = 1 \cdot 0,87 \cdot 1256 = 1097 \text{ A};$$

$$I_{\phi 2} = 1 \cdot 0,77 \cdot 294 = 226 \text{ A};$$

$$I_{\phi 3} = 1 \cdot 1,59 \cdot 71 = 113 \text{ A};$$

$$I_{\phi 4} = 1 \cdot 1,86 \cdot 2087 = 3873 \text{ A}.$$

Для режима после окна:

$$I_{\phi 1} = 0,9 \cdot 0,87 \cdot 1256 = 988 \text{ A};$$

$$I_{\phi 2} = 0,9 \cdot 0,77 \cdot 294 = 203 \text{ A};$$

$$I_{\phi 3} = 0,9 \cdot 1,59 \cdot 71 = 102 \text{ A};$$

$$I_{\phi 4} = 0,9 \cdot 1,86 \cdot 2087 = 3485 \text{ A}.$$

Для нормального режима:

$$I_{\phi 1} = 0,28 \cdot 0,87 \cdot 1256 = 312 \text{ A};$$

$$I_{\phi 2} = 0,28 \cdot 0,77 \cdot 294 = 64 \text{ A};$$

$$I_{\phi 3} = 0,28 \cdot 1,59 \cdot 71 = 32 \text{ A};$$

$$I_{\phi 4} = 0,28 \cdot 1,86 \cdot 2087 = 1102 \text{ A}.$$

Найдем эффективные токи по формуле (1.4).

Для режима наибольшей пропускной способности:

$$I_{\phi \text{э}1}^2 = \frac{4}{3} \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot 2861365 + \left(0,87 - \frac{4}{3}\right) \cdot 0,87 \cdot 1^2 \cdot 1256^2 = 2701866,68 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi \text{э}2}^2 = \frac{4}{3} \cdot 0,77 \cdot 1 \cdot 413762 + \left(0,77 - \frac{4}{3}\right) \cdot 0,77 \cdot 1^2 \cdot 294^2 = 385663,06 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi \text{э}3}^2 = \frac{4}{3} \cdot 1,59 \cdot 1 \cdot 7555 + \left(1,59 - \frac{4}{3}\right) \cdot 1,59 \cdot 1^2 \cdot 71^2 = 18152,77 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi \text{э}4}^2 = \frac{4}{3} \cdot 1,86 \cdot 1 \cdot 6261988 + \left(1,86 - \frac{4}{3}\right) \cdot 1,86 \cdot 1^2 \cdot 2087^2 = 19712306,89 \text{ A}^2.$$

Для режима после окна:

$$I_{\phi\varepsilon 1}^2 = \frac{4}{3} \cdot 0,87 \cdot 0,9 \cdot 2861365 + \left(0,87 - \frac{4}{3}\right) \cdot 0,87 \cdot 0,9^2 \cdot 1256^2 = 2488637,51 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi\varepsilon 2}^2 = \frac{4}{3} \cdot 0,77 \cdot 0,9 \cdot 413762 + \left(0,77 - \frac{4}{3}\right) \cdot 0,77 \cdot 0,9^2 \cdot 294^2 = 350481,96 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi\varepsilon 3}^2 = \frac{4}{3} \cdot 1,59 \cdot 0,9 \cdot 7555 + \left(1,59 - \frac{4}{3}\right) \cdot 1,59 \cdot 0,9^2 \cdot 71^2 = 16149,61 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi\varepsilon 4}^2 = \frac{4}{3} \cdot 1,86 \cdot 0,9 \cdot 6261988 + \left(1,86 - \frac{4}{3}\right) \cdot 1,86 \cdot 0,9^2 \cdot 2087^2 = 17361237,1 \text{ A}^2.$$

Для нормального режима:

$$I_{\phi\varepsilon 1}^2 = \frac{4}{3} \cdot 0,87 \cdot 0,28 \cdot 2861365 + \left(0,87 - \frac{4}{3}\right) \cdot 0,87 \cdot 0,28^2 \cdot 1256^2 = 897902 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi\varepsilon 2}^2 = \frac{4}{3} \cdot 0,77 \cdot 0,28 \cdot 413762 + \left(0,77 - \frac{4}{3}\right) \cdot 0,77 \cdot 0,28^2 \cdot 294^2 = 117431,21 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi\varepsilon 3}^2 = \frac{4}{3} \cdot 1,59 \cdot 0,28 \cdot 7555 + \left(1,59 - \frac{4}{3}\right) \cdot 1,59 \cdot 0,28^2 \cdot 71^2 = 4741,82 \text{ A}^2;$$

$$I_{\phi\varepsilon 4}^2 = \frac{4}{3} \cdot 1,86 \cdot 0,28 \cdot 6261988 + \left(1,86 - \frac{4}{3}\right) \cdot 1,86 \cdot 0,28^2 \cdot 2087^2 = 4751423 \text{ A}^2.$$

Для подстанций постоянного тока, где нагрузки фаз понизительного трансформатора одинаковы определим сначала среднюю нагрузку подстанции по постоянному току для трёх режимов  $\gamma_0$ ,  $\gamma_{сг}$  и  $\gamma_{наиб.}$  по формуле:

$$\bar{I}_n = \bar{I}_{\phi 1} + \bar{I}_{\phi 2} + \bar{I}_{\phi 3} + \bar{I}_{\phi 4} = \sum_{k=1}^M \bar{I}_{\phi k}. \quad (1.8)$$

Для режима наибольшей пропускной способности:

$$\bar{I}_n = 1097 + 226 + 113 + 3873 = 5309;$$

Для режима после окна:

$$\bar{I}_n = 988 + 203 + 102 + 3485 = 4778;$$

Для нормального режима:

$$\bar{I}_n = 312 + 64 + 32 + 1102 = 1511.$$

Затем определим квадрат эффективного тока подстанций (по постоянному току) для указанных выше трёх режимов по формуле:

$$I_{\text{эн}}^2 = \left( \sum_{k=1}^M \bar{I}_{\text{фк}} \right)^2 + \sum_{k=1}^M (I_{\text{фкэ}}^2 - \bar{I}_{\text{фк}}^2). \quad (1.9)$$

Для режима наибольшей пропускной способности:

$$I_{\text{эф}}^2 = 5309^2 + (2701866,68 - 1204479 + 385663,06 - 50979 + 18152,77 - 12736 + 19712306,89 - 14997863) = 34735659,31;$$

Для режима после окна:

$$I_{\text{эф}}^2 = 4778^2 + (2488637,51 - 975628 + 350481,96 - 41293 + 16149,61 - 10316 + 17361237,11 - 12148269) = 29869818,82;$$

Для нормального режима:

$$I_{\text{эф}}^2 = 1511^2 + (2488637,51 - 975628 + 350481,96 - 41293 + 16149,61 - 10316 + 17361237,11 - 12148269) = 6737020,35;$$

Для перехода к эффективным токам силового понизительного

трансформатора определим эффективную потребляемую мощность для трёх режимов по формуле:

$$S_{\text{э}} = I_{\text{э}} \cdot U_{\text{ш}} \cdot \eta / \cos \varphi, \quad (1.10)$$

где  $I_{\text{эп}}$  - эффективный ток нагрузки подстанции по постоянному току,  
 $U_{\text{ш}}$  - номинальное напряжение на шинах постоянного тока, 3,6кВ;  
 $\eta$  - к.п.д. преобразовательного агрегата, примем равным 0,98;  
 $\cos \varphi$  - коэффициент мощности преобразованного агрегата, примем равным 0,96.

Для режима наибольшей пропускной способности:

$$S_{\text{э}} = \frac{5893,70 \cdot 3,6 \cdot 0,98}{0,96} = 21659,33 \text{ кВА};$$

Для режима после окна:

$$S_{\text{э}} = \frac{5465,33 \cdot 3,6 \cdot 0,98}{0,96} = 20085,08 \text{ кВА};$$

Для нормального режима:

$$S_{\text{э}} = \frac{2595,58 \cdot 3,6 \cdot 0,98}{0,96} = 9538,75 \text{ кВА}.$$

Далее определим эффективный ток обмотки понизительного трансформатора для трех рассматриваемых режимов  $I_{\text{эо}}$ ,  $I_{\text{эсг}}$  и  $I_{\text{энаиб}}$  по формуле:

$$I_{\text{э}} = \frac{S_{\text{э}}}{3 \cdot U}, \quad (1.11)$$

где  $U$  - напряжение на вторичной обмотке силового понизительного трансформатора при схеме соединения обмоток  $Y/\Delta$ , равно 10,5кВ.

Для режима наибольшей пропускной способности:

$$I_3 = \frac{21659,33}{3 \cdot 10,5} = 688 \text{ А}$$

Для режима после окна:

$$I_3 = \frac{20085,08}{3 \cdot 10,5} = 638 \text{ А}$$

Для нормального режима:

$$I_3 = \frac{9538,75}{3 \cdot 10,5} = 303 \text{ А}$$

После расчета величин  $I_{3 \text{ наиб}}$ ,  $I_{3 \text{ эс}}$  и  $I_{3 \text{ о}}$  следует определить необходимую трансформаторную мощность для питания тяговой нагрузки.

## 1.2 Определение количества понизительных трансформаторов

Выберем для проверки установленный на подстанции Услава трансформатор мощностью  $S_n=10$  МВА.

$$S_{HT} = \frac{S_n}{K_y} - S_p, \quad (1.12)$$

где  $K_y$  – коэффициент участия районной нагрузки в максимуме;

$S_p$  – мощность районной нагрузки, МВА.

$$S_{HT} = \frac{10}{0,97} - 4,6 = 5,71 \text{ МВА}$$

Найдем часть номинального тока, приходящаяся на тягу поездов по формуле:

$$I_{HT} = \frac{S_{HT}}{3U_{ш}}, \quad (1.13)$$

где  $U_{ш}$  – напряжение на вторичной обмотке силового понизительного трансформатора, равное 10,5 кВ.

$$I_{HT} = \frac{5,71 \cdot 10^3}{3 \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 181,25 \text{ А.}$$

Для расчета средней интенсивности износа изоляции обмотки трансформатора определим отношения:

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= \frac{I_{эо}}{I_{1HT}} \\ k_{сг} &= \frac{I_{эсг}}{I_{1HT}} \\ k_{наиб} &= \frac{I_{энаиб}}{I_{1HT}} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

$$k_0 = \frac{I_{эо}}{I_{1HT}} = \frac{303}{181,25} = 1,67;$$

$$k_{сг} = \frac{I_{эсг}}{I_{1HT}} = \frac{638}{181,25} = 3,52;$$

$$k_{наиб} = \frac{I_{энаиб}}{I_{1HT}} = \frac{688}{181,25} = 3,79.$$

Т.к.  $k_{\max} < 1,5$  ( $3,79 < 1,5$ ) то существующие трансформаторы не могут обеспечить пропуск поездов с заданными массами. Следующие по номинальной мощности трансформаторы на 16 МВА также проверку не прошли. Примем для расчёта трансформатор ТДТН-25 МВА.

$$S_{\text{нт}} = \frac{25}{0,97} - 4,6 = 21,17 \text{ МВА}$$

Тогда:

$$I_{\text{нт}} = \frac{21,17 \cdot 10^3}{3 \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 672,16 \text{ А.}$$

В этом случае отношения, определяемые по формуле 1.14 будут равны:

$$k_0 = \frac{I_{\text{эо}}}{I_{\text{нт}}} = \frac{303}{672,16} = 0,45;$$

$$k_{\text{сг}} = \frac{I_{\text{эсг}}}{I_{\text{нт}}} = \frac{638}{672,16} = 0,95;$$

$$k_{\text{наиб}} = \frac{I_{\text{энаиб}}}{I_{\text{нт}}} = \frac{688}{672,16} = 1,02.$$

Т.к.  $k_{\max} < 1,5$  ( $1,02 < 1,5$ ) то продолжаем расчет.

Найдем среднюю интенсивность износа изоляции обмотки трансформатора в сутки предоставления окна:

$$\bar{\chi} = A_{\text{сг}} L_{\text{обнаиб}} L_{\text{тсг}} T_{\text{вос}} / 24;$$

$$A_{\text{сг}} = e^{-\alpha(\Theta_{\text{оном}} - \Theta_{\text{сг}})},$$

(1.15)

где  $\Theta_{\text{ном}}$  – номинальная температура наиболее нагретой части обмотки, равная  $98^{\circ}\text{C}$ ;

$\Theta_{\text{сст}}$  – температура окружающей среды в период восстановления нормального движения поездов, задается в зависимости от района;

$\alpha$  – коэффициент равный  $0,115 \text{ 1}^{\circ}\text{C}$ .

$$L_{\text{обнаиб}} = \gamma_{\text{сст}} \cdot e^{\alpha(\alpha \cdot k_{\text{наиб}}^2 + b)};$$

$$L_{\text{мсг}} = e^{\alpha(g((1-\eta)k_{\text{сст}}^2 + k_0^2) + h)}.$$
(1.16)

В последнем выражении:

$$\eta = e^{-\frac{T_{\text{вост}} + t_0}{\tau_m}}.$$
(1.17)

В формулах (1.16) величины  $b$ ,  $a$ ,  $g$  и  $h$  постоянные, аппроксимирующие зависимости разности температур «обмотки – масло» и «масло - окружающая среда» ( $b = 2,5$ ,  $a = 20,5$ ,  $g = 39,7$  и  $h = 15,3^{\circ}\text{C}$ );

$t_0$  – среднее время хода по фидерной зоне поездов основного типа в четном и нечетном направлениях:

$\tau_m$  – постоянная времени масла её можно принять  $2,5\text{ч}$  для трансформаторов мощностью до  $32\text{МВА}$ .

$$A_{\text{сст}} = e^{-0,115 \cdot (98 - 26)} = 0,00025;$$

$$\eta = e^{-\frac{3 - 0,137}{2,5}} = 0,3181;$$

$$L_{\text{обнаиб}} = 0,9 \cdot e^{0,115 \cdot (20,5 \cdot 1,02^2 + 2,5)} = 14,14;$$

$$L_{\text{мсг}} = e^{0,115 \cdot (39,7 \cdot ((1 - 0,3181) \cdot 0,95^2 + 0,45^2) + 15,3)} = 226,26;$$

$$\bar{X} = 0,00025 \cdot 14,14 \cdot 226,26 \cdot \frac{3}{24} = 0,1014.$$

По полученной средней интенсивности износа  $\bar{\chi}$  произведем пересчет номинального тока. Найдем такой расчетный номинальный ток, при котором относительная интенсивность износа изоляции будет нормальной, по формуле:

$$I_{\text{оном}} = I_{\text{1НТ}} \cdot \sqrt{\frac{\ln \bar{X} + \ln \frac{365}{n_{\text{сг}} \cdot \gamma} + 9,22 - 0,115\Theta_{\text{сг}}}{\ln \frac{365}{n_{\text{сг}} \cdot \gamma} + 9,22 - 0,115\Theta_{\text{сг}}}}, \quad (1.18)$$

где  $n_{\text{сг}}$  – число суток с предоставлением окон за год, в курсовом проекте можно принять равным  $2/3$  числа суток в весенне-летний период.

$$I_{\text{оном}} = 672,16 \cdot \sqrt{\frac{\ln 0,1014 + \ln \frac{365}{173,33 \cdot 0,9} + 9,22 - 0,115 \cdot 26}{\ln \frac{365}{173,33 \cdot 0,9} + 9,22 - 0,115 \cdot 26}} = 552,96 \text{ А.}$$

Т.к. выполняется условие  $I_{\text{оном}} \leq I_{\text{НТ}}$  ( $552,96 < 672,16$ ), то продолжаем расчет.

Выбранные по износу изоляции трансформаторы должны быть проверены по наибольшему допустимому току и наибольшим допустимым температурам обмотки и масла.

Наибольшая температура масла определим по формуле:

$$\Theta_{\text{мнaиб}} = \Theta_{\text{сг}} + g(k_0^2 \cdot \eta + (1 - \eta) \cdot k_{\text{сг}}^2) + h ; \quad (1.19)$$

$$\Theta_{\text{мнaиб}} = 26 + 39,7 \cdot (0,45^2 \cdot 0,3181 + (1 - 0,3181) \cdot 0,95^2) + 15,3 = 68,22^\circ \text{ С}$$

Наибольшая температура обмотки определим по формуле:

$$\Theta_{обнаиб} = \Theta_{мнаиб} + a \cdot k^2_{max} + b ; \quad (1.20)$$

$$\Theta_{обнаиб} = 68,22 + 20,5 \cdot 1,02^2 + 2,5 = 92,17^\circ \text{C}$$

Т.к.  $\Theta_{мнаиб} < 95^\circ \text{C}$  и  $\Theta_{обнаиб} < 140^\circ \text{C}$ , то принятые к установке трансформаторы выбраны верно.

На тяговых подстанциях обычно устанавливают два силовых понижающих трансформатора одинаковой мощности. Учитывая это и зная трансформаторную мощность, можем сделать вывод, что установленный на тяговой подстанции Услава силовой двухобмоточный трансформатор типа ТДТН-25000/110 У1 прошёл проверку.

Таблица 1.2 - Характеристики трансформатора ТДТН-25000/110

S <sub>н</sub> , МВ·А	Номинальное напряжение обмоток, кВ			U <sub>к в-н</sub> , %	U <sub>к в-с</sub> , %	U <sub>к с-н</sub> , %	Потери, кВт		I <sub>х</sub> , %	Схема и группа соединения обмоток
	ВН	СН	НН				P <sub>к.з.</sub>	P <sub>хх</sub>		
25	115	38,5	11	17,5	10,5	6,5	140	25	0,3	Y <sub>н</sub> /Y <sub>н</sub> /Д-0-11

### 1.3 Расчет площади сечения проводов контактной сети для двух схем питания

Площадь сечения проводов контактной сети определяется экономическим расчетом с последующей проверкой на нагревание.

Расход электрической энергии на движение одного поезда для участков переменного тока определяется по не разложенному графику по формулам:

$$A = \frac{U_{cp}}{60} \sum_{i=1}^{n_0} I_{cp} \cdot t_i, \quad (1.21)$$

где  $U_{cp}$  - среднее расчетное напряжение в контактной сети, 3 кВ.

По результатам расчетов видно, что наиболее нагружены фидерные зоны 3 и 4.

$$A_{\text{нечет}} = \frac{3}{60} \cdot 482 \cdot 15,95 = 384,13 \text{ кВтч};$$

$$A_{\text{чет}} = \frac{3}{60} \cdot 3880 \cdot 18,55 = 3599,31 \text{ кВтч};$$

$$A_{\text{Тнечет}} = A_{\text{нечет}} \cdot N_{\text{нечет}} = 384,13 \cdot 41 = 15744,49 \text{ кВтч};$$

$$A_{\text{Тчет}} = A_{\text{чет}} \cdot N_{\text{чет}} = 3599,31 \cdot 41 = 147525,51 \text{ кВтч};$$

$$A_{\text{T}} = A_{\text{Тнечет}} + A_{\text{Тчет}} = 15744,49 + 147525,51 = 163270,00 \text{ кВтч}.$$

Узловая схема питания путей:

$$\Delta A_{\text{сум}} = \frac{r_{\text{экв}} \cdot l \cdot 10^{-3}}{12 \cdot U^2 \cdot T} \left\{ 3,24 \cdot T \left[ \frac{N_{\text{чет}} \cdot A_{\text{чет}}^2}{t_{\text{мчет}}} + \frac{N_{\text{неч}} \cdot A_{\text{неч}}^2}{t_{\text{мнеч}}} \right] + \frac{3}{4} A_{\text{T}}^2 - \frac{(n-2)^3 - 2(2n-1)}{2n^3} (A_{\text{Tчет}}^2 + A_{\text{Tнеч}}^2) \right\}. \quad (1.22)$$

Параллельная схема питания:

$$\Delta A_{\text{сум}} = \frac{r_{\text{экв}} \cdot l \cdot 10^{-3}}{12 \cdot U^2 \cdot T} \left\{ 2,16 \cdot T \left[ \frac{N_{\text{чет}} \cdot A_{\text{чет}}^2}{t_{\text{мчет}}} + \frac{N_{\text{неч}} \cdot A_{\text{неч}}^2}{t_{\text{мнеч}}} \right] + A_{\text{T}}^2 - \frac{2(n^2 - n) + 1}{n^3} (A_{\text{Tчет}}^2 + A_{\text{Tнеч}}^2) \right\}, \quad (1.23)$$

где  $N_{\text{чет}}$ ,  $N_{\text{нечет}}$  - среднесуточные размеры движения по четному и нечетному пути;

$A_{\text{чет}}$ ,  $A_{\text{нечет}}$  - расход энергии на движение одного поезда по четному и нечетному пути;

$n$  - наибольшее число пар поездов, могущих одновременно занимать фидерную зону, вычисляется как средняя величина от поездов по обоим путям:

$$n = \frac{n_{\phi 1} + n_{\phi 2}}{2} = \frac{1,59 + 1,86}{2} = 1,73.$$

$r_{\text{ЭКВ}}$  - сопротивление всех проводов обеих путей, Ом/км;

$A_T$  - расход энергии на движение всех поездов за период  $T=24$  часа по обоим путям фидерной зоны, кВтч;

$t_{\text{чет}}$ ,  $t_{\text{нечет}}$  - время потребления тока поездом на четном и нечетном пути соответственно, час.

Найдем  $\Delta A_{\text{сут}}$  – потери энергии в контактной сети фидерной зоны за сутки, - при использовании узловой схемы питания:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{сут узл}} &= \frac{r_{\text{ЭКВ}} \cdot l \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 3^2 \cdot 24} \cdot (3,24 \cdot 24 \cdot \left( \frac{41 \cdot 384,13^2}{0,27} + \frac{41 \cdot 3599,31^2}{0,31} \right) + \frac{3}{4} \cdot 163270,00^2 \\ &+ \frac{(1,73 - 2)^3 - 2 \cdot (2 \cdot 1,73 - 1)}{2 \cdot 1,73^3} \cdot (15744,49^2 + 147525,51^2) \\ &= 55837,42 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l \text{ кВтч} \end{aligned}$$

- при использовании параллельной схемы питания:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{сут пар}} &= \frac{r_{\text{ЭКВ}} \cdot l \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 3^2 \cdot 24} \cdot (2,16 \cdot 24 \cdot \left( \frac{41 \cdot 384,13^2}{0,27} + \frac{41 \cdot 3599,31^2}{0,31} \right) + 163270,00^2 \\ &+ \frac{2 \cdot (1,73^2 - 1,73) + 1}{1,73^3} \cdot (15744,49^2 + 147525,51^2) = 39288,19 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l \text{ кВтч} \end{aligned}$$

Величина удельных потерь энергии находится по формуле:

$$\Delta A_{\text{год}} = 365 \cdot \Delta A_{\text{сут}}. \quad (1.24)$$

Для узловой схемы питания:

$$\Delta A_{\text{год}} = 365 \cdot 55837,42 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l = 20380659,05 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l \text{ кВтч.}$$

Для параллельной схемы питания:

$$\Delta A_{\text{год}} = 365 \cdot 39288,19 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l = 14340187,83 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l \text{ кВтч.}$$

Величина удельных потерь энергии:

$$B_0 = \frac{\Delta A_{\text{год}}}{r_{\text{ЭКВ}} \cdot l}, \quad (1.25)$$

где  $B_0$  - годовые удельные потери в проводах контактной сети рассматриваемой фидерной зоны, кВтч/Ом·год;

$r_{\text{ЭКВ}}$  - сопротивление омическое или активное параллельно соединенных проводов контактной сети одного пути (при узловой схеме сопротивление всех проводов всех путей, как параллельно соединенных), Ом/км;

$l$  - длина фидерной зоны, км;

$\Delta A_{\text{год}}$  - годовые потери энергии в проводах фидерной зоны, кВтч.

Для узловой схемы питания:

$$B_0 = \frac{20380659,05 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l}{r_{\text{ЭКВ}} \cdot l} = 20380659,05 \frac{\text{кВтч}}{\text{Ом} \cdot \text{год}}.$$

Для параллельной схемы питания:

$$B_0 = \frac{14340187,83 \cdot r_{\text{ЭКВ}} \cdot l}{r_{\text{ЭКВ}} \cdot l} = 14340187,83 \frac{\text{кВтч}}{\text{Ом} \cdot \text{год}}.$$

Расчет экономической площади сечения проводов контактной сети в медном эквиваленте для одной фидерной зоны двухстороннего питания, при сроке окупаемости 8 лет, можно провести по формуле:

$$S_{\text{мэ}} = 0,35 \div 0,55 \sqrt{B_0} \text{ мм}^2. \quad (1.26)$$

Для узловой схемы питания:

$$S_{мэ} = \frac{0,35 \cdot \sqrt{20380659,05}}{2} = 790 \text{ мм}^2$$

Для параллельной схемы питания:

$$S_{мэ} = \frac{0,35 \cdot \sqrt{14340187,83}}{2} = 663 \text{ мм}^2$$

Выберем тип контактной подвески с указанием допустимой нагрузки по току, а также найдем электрическое сопротивление.

Таблица 1.3 - Типы контактных подвесок для различных схем питания

Схема питания	Тип конт.подвески	S, мм <sup>2</sup>	Iдоп, А	Rтс, Ом/км
Узловая схема	-	-	-	-
Параллельная схема	М 120 + 2МФ 150 + 3 А 185 (Р 75)	746,4	3690	0,035

#### 1.4 Проверка выбранной площади сечения проводов контактной сети на нагревание

Проверка на нагревание проводов, как при постоянном, так и при переменном токе производится сравнением наибольших эффективных рабочих нагрузок фидеров с допустимыми для данного типа подвески.

Определение величины эффективного тока фидера выполняется для одного пути наиболее нагруженной фидерной зоны при раздельном питании путей по формуле:

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2}{T^2 \cdot U^2} \left[ 1,1 \frac{T}{\sum_{i=1}^n t_m} + \left( 1 - \frac{N\theta_0}{\sum_{i=1}^n t} \right) \right], \quad (1.27)$$

где  $A_T$  - расход электроэнергии на движение всех поездов за период  $T=24$  часа на наиболее нагруженном пути расчетной фидерной зоны от расчетной подстанции в кВт·ч или кВА·ч для участков переменного тока, в период наибольшей перегрузки;

$U$  - среднее расчетное напряжение в контактной сети 3000 В;

$\sum_{i=1}^n t$  - суммарное полное время хода всех поездов по фидерной зоне, ч;

$\sum_{i=1}^n t_m$  - тоже под током, ч;

$\Theta_0$  - наименьший межпоездной интервал, ч;

$n$  - количество поездов, проходящее за сутки по наиболее нагруженному пути фидерной зоны в нормальном режиме.

$$I_{\text{эф4}}^2 = \frac{147525,51}{24^2 \cdot 3^2} \cdot \left( 1,1 \cdot \frac{24}{12,68} + \left( 1 - \frac{41 \cdot 0,17}{12,68} \right) \right) = 10679884 \text{ A}^2.$$

$$I_{\text{эф1}}^2 = 4753441,41 \text{ A}^2;$$

$$I_{\text{эф2}}^2 = 38725,13 \text{ A}^2;$$

$$I_{\text{эф3}}^2 = 133714,27 \text{ A}^2.$$

Из полученных результатов для каждого фидера  $\sqrt{I_{\text{эф}\phi 1}^2} = 2180,24 \text{ A}$ ,  
 $\sqrt{I_{\text{эф}\phi 2}^2} = 196,79 \text{ A}$ ,  $\sqrt{I_{\text{эф}\phi 3}^2} = 365,67 \text{ A}$ ,  $\sqrt{I_{\text{эф}\phi 4}^2} = 3268,01 \text{ A}$ , видно, что принимаемая подвеска прошла проверку по допустимому току, значение которого, для рассматриваемой подвески, которое равно 3690 А.

Основные параметры устройств системы тягового электроснабжения зависят от величины и характера изменения тяговой нагрузки, применяемых схем питания тяговой сети, а также от наличия средств, повышающих качество электроэнергии и снижающих потери мощности и электроэнергии. При этом основная сложность расчета обусловлена учетом специфики тяговой нагрузки.

В результате расчетов установлено, что наиболее выгодной по всем параметрам является параллельная схема питания. При её реализации на участке, исходя из заданных нагрузок выбрана контактная подвеска М 120 + 2МФ 150 + 3 А 185 (Р 75). Также она прошла проверку по условиям нагрева. Для узловой схемы питания подвеску подобрать не удалось.

Существующие силовые трансформаторы ТДТН-110/35/10 номинальной мощностью 10 МВА проверку не прошли. Были выбраны трансформаторы типа ТДТН-110/35/10 номинальной мощностью 25 МВА

Графики поездного тока и времени хода поезда в чётном и нечётном направлениях представлены в Приложении Б.

## 2 ПРОЕКТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

### 2.1 Определение нормативных нагрузок на провода контактной сети

Нагрузки определяются с учетом защищенности от ветра и насыпи для следующих режимов: без дополнительных влияний; при ветре наибольшей интенсивности; при гололеде с ветром.

Нагрузка от силы тяжести одного метра контактной подвески без дополнительных влияний

$$g = g_H + n_K(g_R + g_c), \quad (2.1)$$

где  $g_H, g_K, g_C$  – соответственно нагрузка от силы тяжести НТ, КП и зажимов и струн, даН/м, [8];

$$g_c = 0,1 \text{ даН/м};$$

$n$  – число контактных проводов;

Для главных путей:

$$g = 1,037 + 2 \cdot (0,873 + 0,1) = 2,983 \text{ даН/м.}$$

Нагрузка от силы тяжести гололеда на один метр длины провода

$$g_{гд} = 2,77 \cdot b \cdot (a + b) \cdot 10^{-4} \quad (2.2)$$

Расчетное значение толщины стенки гололеда

$$b = b_H \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (2.3)$$

где  $b_H$  – нормативная величина стенки гололеда. Берется из /10/

Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  определяются по методике, /9/.

$d$  – диаметр провода, м.

Для контактного провода:  $b_K = 0,5b$ ;

$$d = 0,5 \cdot (A + H) \quad (2.4)$$

КП главные пути (2МФ100 А=11,8 мм Н=12,81 мм):

$$d = 0,5 \cdot (11,8 + 12,81) = 12,305 \text{ мм.}$$

$$K_1 = K_1'' - (K_1'' - K_1') \cdot (d_1'' - d_p) / (d_1'' - d_1') ; \quad (2.5)$$

$$K_2 = K_2'' - (K_2'' - K_2') \cdot (h'' - h_p) / (h'' - h') . \quad (2.6)$$

Определим  $K_1$ - коэффициент, учитывающий диаметр провода и  $K_2$ - коэффициент, учитывающий высоту расположения провода:

$$K_1' = 1,1 \text{ для } d' = 5 ; K_1'' = 0,9 \text{ для } d'' = 20 \text{ мм;}$$

$$K_2' = 0,8 \text{ для } h' = 5 ; K_2'' = 1,2 \text{ для } h'' = 20 \text{ м;}$$

$h$ - высота подвеса провода от поверхности земли.

Главные пути:

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 14}{20 - 5} = 0,98;$$

$$\text{НТ: } K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 9}{20 - 5} = 0,91;$$

$$b = 20 \cdot 0,98 \cdot 0,91 = 18,84 \text{ мм}$$

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 12,305}{20 - 5} = 1;$$

КП:

$$K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 7}{20 - 5} = 0,85;$$

$$b = 20 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 0,5 = 8,56 \text{ мм}$$

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 17,5}{20 - 5} = 0,93;$$

УП:

$$K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 10,9}{20 - 5} = 0,96; ;$$

$$b = 20 \cdot 0,93 \cdot 0,91 = 16,93 \text{ мм}$$

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 9,6}{20 - 5} = 1,04;$$

ПЭ:

$$K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 9,6}{20 - 5} = 0,92;$$

$$b = 20 \cdot 1,04 \cdot 0,925 = 19,45 \text{ мм}$$

Насыпь 7 м:

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 12,6}{20 - 5} = 1;$$

НТ:

$$K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 16}{20 - 5} = 1,09;$$

$$b = 20 \cdot 0,98 \cdot 1,09 = 21,84 \text{ мм}$$

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 12,31}{20 - 5} = 1,00;$$

КП:

$$K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 14}{20 - 5} = 1,04;$$

$$b = 20 \cdot 1,00 \cdot 1,04 \cdot 0,5 = 10,43 \text{ мм}$$

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 17,5}{20 - 5} = 0,93;$$

УП:

$$K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 17,9}{20 - 5} = 1,14; ;$$

$$b = 20 \cdot 0,93 \cdot 1,14 = 21,35 \text{ мм}$$

$$K_1 = 0,9 - (0,9 - 1,1) \frac{20 - 9,6}{20 - 5} = 1,04;$$

ПЭ:

$$K_2 = 1,2 - (1,2 - 0,8) \frac{20 - 16,6}{20 - 5} = 1,11;$$

$$b = 20 \cdot 1,04 \cdot 1,11 = 23,04 \text{ мм}$$

Нагрузка от силы тяжести гололеда на один метр длины провода:

Главные пути на станции:

$$HT: \quad g_{гл} = 27,7 \cdot 18,89 \cdot (14 + 8,89) \cdot 10^{-4} = 1,54 \text{ даН/м};$$

$$КП: \quad g_{гл} = 27,7 \cdot 8,56 \cdot (12,31 + 8,56) \cdot 10^{-4} = 0,494 \text{ даН/м};$$

$$УП: \quad g_{гл} = 27,7 \cdot 17,87 \cdot (17,5 + 17,87) \cdot 10^{-4} = 1,751 \text{ даН/м.}$$

$$ПЭ: \quad g_{гл} = 27,7 \cdot 19,17 \cdot (9,6 + 19,17) \cdot 10^{-4} = 1,527 \text{ даН/м};$$

Таким же образом рассчитаем нагрузки от силы тяжести гололеда на один метр длины провода для второстепенных путей станции и участка на насыпи. Результаты расчётов сведём в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Нагрузка от силы тяжести гололеда на один метр длины провода

Участок Провод	Главные пути	Насыпь	
		7м	3м
HT	1,540	2,083	1,9
КП	0,494	0,657	0,53
УП	1,751	2,298	2,136
ПЭ	1,527	2,084	1,87

Суммарная сила тяжести одного метра контактной подвески с гололедом определится:

$$g_{ГЛ} = g_0 + g_{ГН} + n \cdot g_{ГК}, \quad (2.7)$$

где  $g_{ГН}, g_{ГК}$  -соответственно нагрузка от силы тяжести подвески, гололеда на несущем тросе и гололеда на контактном проводе.

Главные пути:

$$g_{ГЛ} = 2,78 + 1,54 + 2 \cdot 0,494 = 5,3 \text{ даН/м.}$$

Насыпь 7 м:  $g_{ГЛ} = 6,18 \text{ даН/м;}$

3 м:  $g_{ГЛ} = 4,58 \text{ даН/м.}$

Ветровая нагрузка на провод без гололеда :

$$P_V = 0,615 \cdot V_p^2 \cdot C_x \cdot d, \quad (2.8)$$

где  $V_p$  - расчетная скорость ветра, м/с;

$C_x$  - аэродинамический коэффициент лобового сопротивления [9];

$d$  - диаметр провода, м. Для контактного провода вертикальный размер сечения  $H$ , мм.

Результаты расчётов сведём в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 - Ветровая нагрузка на провод без гололеда

Участок Провод	Перегон	Насыпь	
		7 м	3 м
НТ	1,312	2,294	2,06
КП	1,523	2,148	1,96
УП	1,749	3,186	2,875
ПЭ	0,959	1,748	1,563

Ветровая нагрузка на провод в режиме гололеда:

$$P_v = 0,615 \cdot V_{гл}^2 \cdot C_x \cdot (d + 2 \cdot b) \cdot 10^{-4}, \quad (2.9)$$

где  $V_{гл}$  – расчетная скорость при гололеде м/с,

$b$  – расчетное значение толщины стенки гололеда мм.

Результаты расчётов сведём в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Ветровая нагрузка на провод в режиме гололеда

Участок Провод	Перегон	Насыпь	
		7 м	3 м
НТ	1,830	3,688	2,8
КП	1,344	2,140	1,87
УП	1,916	3,946	2,47
ПЭ	1,725	3,650	2,57

Результирующая нагрузка на отдельный провод в режиме наименьших температур принимается равной  $=g_0$ .

Результирующая нагрузка в режиме ветра наибольшей интенсивности:

$$q_v = \sqrt{g^2 + P_v^2}, \quad (2.10)$$

в режиме гололеда с ветром:

$$q_{gl} = \sqrt{(g + g_{gl})^2 + P_{gl}^2}, \quad (2.11)$$

где  $g_{gl}$  - нагрузка от силы тяжести гололеда на 1 м длины провода НТ и КП, даН/м;

$P_{gl}$  - ветровая нагрузка на провод в режиме гололеда, даН/м;

$g$  - нагрузка от силы тяжести, даН/м;

$P_v$  - ветровая нагрузка на, даН/м.

Результаты расчётов сведём в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Результирующая нагрузка на отдельный провод в трёх режимах

Участок Провод	Режим	Перегон	Насыпь	
			7 м	3 м
НТ	q	0,834	0,834	0,834
	q <sub>v</sub>	1,554	2,441	1,874
	q <sub>гл</sub>	2,998	4,702	3,42
КП	q	0,873	0,873	0,873
	q <sub>v</sub>	1,756	2,319	2,14
	q <sub>гл</sub>	1,917	2,630	2,26
УП	q	0,492	0,492	0,492
	q <sub>v</sub>	1,817	3,186	2,89
	q <sub>гл</sub>	2,950	4,833	3,015
ДПР	q	0,191	0,191	0,191
	q <sub>v</sub>	0,978	1,758	1,48
	q <sub>гл</sub>	2,435	4,300	3,24

Результирующая нагрузка на несущий трос цепной подвески определяется без учета ветровой нагрузки на контактные провода, так как ее основная часть воспринимается фиксаторами.

## 2.2 Расчет натяжения проводов

Натяжение несущего троса ( $T_o$ ) при беспровесном положении контактного провода предварительно принимается:

Для медных проводов -  $(0,75 - 0,8) \cdot T_{dn}$ ;

Для М120 -  $T_{dn} = 2000$  даН;  $T_o = 0,77 \cdot 2000 = 1540$  даН.

Натяжение несущего троса при ветре наибольшей интенсивности  $T_B = 0,7 \cdot T_{dn}$  при медном проводе.

Для М120 -  $T_{dn} = 2000$  даН;  $T_B = 0,7 \cdot 2000 = 1400$  даН.

Действительные значения  $T_O$  и  $T_B$  определяются при механическом расчете контактной подвески.

### 2.3 Определение допустимых длин пролетов

Наибольшие длины пролетов устанавливаются в режиме ветра наибольшей интенсивности. При этом ветровые отклонения контактного провода на прямых участках пути не должны превышать 0,5 м, а на кривых – 0,45 м. Наибольшее расстояние между опорами для обеспечения надежного токосъема принимается равным не более 65 м.

Для прямых участков пути:

$$l_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{n \cdot K \left( b_{\text{кон}} - j_K + \sqrt{(b_{\text{кон}} - j_K)^2 - a^2} \right)}{P_K - P_{\text{Э}}}}. \quad (2.14)$$

Для кривых участков пути:

$$l_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2n \cdot K (b_{\text{кон}} - j_K + a)}{P_K - P_{\text{Э}} + \frac{n \cdot K}{R}}}, \quad (2.15)$$

где  $K$  - номинальное натяжение контактного провода, даН,

$n$  - количество контактных проводов;

$P_K$  - ветровая нагрузка на контактный провод, даН/м;

$P_{\text{Э}}$  - эквивалентная нагрузка, передающаяся с несущего троса на контактный провод, даН/м;

$R$  - радиус кривой пути, м;

$b_{\text{кдоп}}$  - наибольшее допустимое ветровое отклонение контактного провода, м,  
( $b_{\text{кдоп}} = 0,5$  – на прямых;  $b_{\text{кдоп}} = 0,45$  – на кривых);

$j_K$  - прогиб опоры под действием ветра на уровне крепления контактного провода, м;

$a$  - зигзаг на прямых участках 0,3 м, на кривых – 0,4 м.

Формула для определения удельной эквивалентной нагрузки имеет вид:

$$P_{\text{Э}} = \frac{P_K \cdot T - P_H \cdot K - \frac{8K \cdot T \left( \frac{h_H \cdot P_H}{g_V} + j_H - j_K \right)}{l^2}}{T + K + \frac{10,6 \cdot l_{\text{CP}} \cdot K \cdot T}{g_K \cdot l^2}}, \quad (2.16)$$

где  $P_H$  - ветровая нагрузка на несущий трос, даН/м;

$T$  - натяжение несущего троса в режиме ветра наибольшей интенсивности, даН;

$l$  - длина пролета, м;

$h_H$  - длина гирлянды подвесных изоляторов и крепительных деталей для несущего троса, м.;

$g_V$  - результирующая нагрузка на несущий трос, даН/м;

$g_K$  - нагрузка от силы тяжести контактного провода, даН/м;

$j_K$  - прогиб опоры под действием ветра на уровне крепления несущего троса, м ;

$l_{\text{CP}}$  - средняя длина струн в средней части пролета, м. Определяется по формуле:

$$l_{\text{CP}} = h_0 - \frac{0,115 \cdot g \cdot l^2}{T_0}, \quad (2.17)$$

где  $h_0$  - конструктивная высота цепной подвески, м [ 8 ] с. 67.

Главные пути :

$$l_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1000 \cdot \left(0,5 - 0,01 + \sqrt{(0,5 - 0,01)^2 - 0,3^2}\right)}{0,544}} = 113,55 \text{ м};$$

$$l_{CP} = 2 - \frac{0,115 \cdot 2,983 \cdot 113,55^2}{1540} = -0,872 \text{ м};$$

$$P_3 = \frac{0,544 \cdot 1400 - 0,521 \cdot 1000 \cdot 2 - \frac{8 \cdot 1400 \cdot 1000 \cdot 2}{113,55} \cdot \left(\frac{0,16 \cdot 0,2 \cdot 0,521}{3,028} + 0,015 - 0,01\right)}{1400 + 1000 \cdot 2 + \frac{10,6 \cdot (-0,872) \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 1400}{0,873 \cdot 2 \cdot 113,55^2}} = -0,265 \text{ даН/м};$$

$$l_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1000 \cdot \left(0,5 - 0,01 + \sqrt{(0,5 - 0,01)^2 - 0,3^2}\right)}{0,544 + 0,265}} = 93,14 \text{ м}.$$

$$\Delta l = l_1 - l_2 = 113,55 - 93,14 = 20,41 > 5 \text{ м}.$$

Так как длина пролета отличается от первоначальной более, чем на 5 м, то повторим расчёты, принимая полученное  $l_{\max}$  за начальное:

$$l_{CP} = 2 - \frac{0,115 \cdot 2,983 \cdot 93,14^2}{1540} = 0,07 \text{ м};$$

$$P_3 = \frac{0,544 \cdot 1400 - 0,521 \cdot 1000 \cdot 2 - \frac{8 \cdot 1400 \cdot 1000 \cdot 2}{93,14} \cdot \left(\frac{0,16 \cdot 0,2 \cdot 0,521}{3,028} + 0,015 - 0,01\right)}{1400 + 1000 \cdot 2 + \frac{10,6 \cdot 0,07 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 1400}{0,873 \cdot 2 \cdot 93,14^2}} = -0,174 \text{ даН/м};$$

$$l_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1000 \cdot \left(0,5 - 0,01 + \sqrt{(0,5 - 0,01)^2 - 0,3^2}\right)}{0,544 + 0,174}} = 97,87 \text{ м}.$$

$$\Delta l = l_1 - l_2 = 97,87 - 93,14 = 4,73 < 5 \text{ м}.$$

Таким же образом рассчитываются допустимые длины пролётов для остальных участков пути.

Результат расчетов всех участков пути сводим в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 - Максимальные длины пролетов

Участок пути	С $R_{\text{э}}=0$	С $R_{\text{э}}\neq 0$	Примем
Перегон прямой участок пути	84,78	87,93	65
Перегон, кривые $R=410-465$ м	57,1	54,3	35
Перегон, кривая $R=575$ м	55,5	57,6	40
Перегон, кривые $R=740-750$ м	58,8	62,3	40
Перегон кривые $R=3000-3600$ м	71,1	72,5	60
Перегон кривая $R=4300$ м	75,6	79	60

Поскольку контактная подвеска на перегоне является компенсированной, температурные изменения в проводах регулируются грузокомпенсаторами.

#### 2.4 Расчет и подбор опор контактной сети

Расчёт производится в следующей последовательности:

Составляется схема нагружения опоры (рис. 2.1).

Рассчитываются нагрузки от внешних воздействий в режимах: ветер наибольшей интенсивности; гололёд с ветром.

Определяется суммарный расчетный момент и по его значению подбирается тип опоры.

Величины нагрузок при различных режимах сводятся в табл. 2.8.

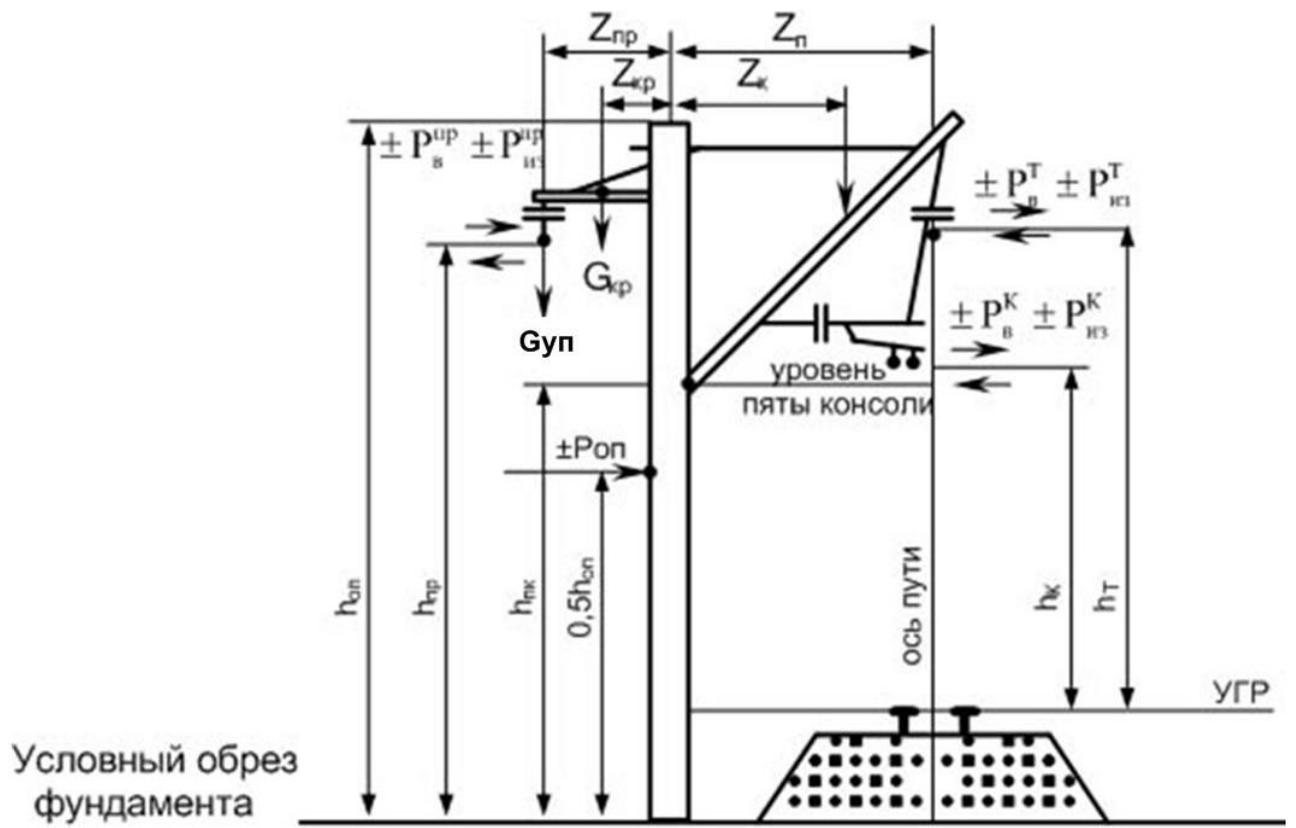


Рисунок 2.1 – Расчетная схема для расчета и выбора опор

Таблица 2.8 – Значение линейных нагрузок

Виды нагрузок	Размерность	Местоположение	Значения нагрузок при режимах	
			Гололеда с ветром	Ветер наибольшей интенсивности
Нагрузка от силы тяжести подвески	даН/м	Ст.	3,94	2,983
		Пер.	4,22	2,983
Ветровая нагрузка на НТ	даН/м	Ст.	0,43	0,52
		Пер.	0,56	0,69
Ветровая нагрузка на КП	даН/м	Ст.	0,27	0,44
		Пер.	0,36	0,58
Нагрузка от силы тяжести продольного электроснабжения (ПЭ)	даН/м	Ст.	0,51	0,145
		Пер.	0,67	0,145
Нагрузка от силы тяжести усиливающего провода УП	даН/м	Ст.	0,65	0,49
		Пер.	0,83	0,49
Ветровая нагрузка на УП	даН/м	Ст.	0,45	0,63
		Пер.	0,60	0,83
Нагрузка от силы тяжести консоли	даН	Ст.	100	60
		Пер.		
Нагрузка от силы тяжести кронштейна с изоляторами	даН	Ст.	70	40
		Пер.		

Вертикальная нагрузка от силы тяжести подвески в режиме  $x$ , даН/м:

$$G_{nx} = g_x l + G_H + G_\Phi, \quad (2.18)$$

$$G_{nx} = 3,94 \cdot 65 + 30 = 286,1$$

где  $g_x$  – нагрузка от силы тяжести подвески, даН/м;

$l$  – длина пролета, равная полусумме длин смежных пролетов, м;

$G_{II}$  – нагрузка от силы тяжести изоляторов, 15 даН;

$G_{\Phi}$  – нагрузка от силы тяжести половины фиксаторного узла, 15 даН.

Нагрузка от силы тяжести усиливающего провода, даН/м:

$$G_{np\ x} = g_{np\ x} l + G_{II}. \quad (2.19)$$

Вертикальные нагрузки от силы тяжести консоли и кронштейна ( $G_{кон}$ ;  $G_{кр}$ ) принимаются из справочника. При гололедном режиме следует учитывать нагрузку от силы тяжести гололеда.

Нагрузка на провода контактной сети от ветра, передающаяся на опорные устройства, даН:

$$P_{ex} = P_{ex}^i l, \quad (2.20)$$

$$P_{вх} = 0,81 \cdot 65 = 52,65 \text{ даН/м}$$

где  $P_{ex}^i$  – ветровая нагрузка на  $i$ -й провод, даН/м.

Усилие на опору от изменения направления провода на кривой, даН:

$$P_{кр\ x}^i = H_x^i \frac{Z}{R}, \quad (2.21)$$

где  $H_x^i$  – натяжение  $i$ -го провода в режиме  $x$ , даН;

$R$  – радиус кривой, м.

Усилие на опору, обусловленное изменением направления проводов при их отводах на анкеровку:

$$P_{анк}^i = H_x^i \frac{Z}{l}, \text{ даН} \quad (2.22)$$

$$P_{\text{анк}}^i = 1200 \cdot \frac{3,825}{65} = 70,615$$

где  $Z = \Gamma + 0,5$ ,  $\Gamma$  – габарит опоры (расстояние от оси пути до передней грани опоры), м;

$B$  – ширина опоры, м.

Усилие от зигзага контактных проводов, даН:

$$P_3 = K \frac{4 \cdot a}{l}, \quad (2.23)$$

$$P_3 = 2000 \cdot \frac{4 \cdot 0,3}{65} = 36,923$$

Суммарный изгибающий момент от внешних сил относительного обреза фундамента в режиме X, даН·м

$$M_{\text{ох}} = n_n G_{\text{нх}} Z_n + n_{\text{кон}} G_{\text{кон}} Z_{\text{кон}} - n_y G_y Z_y - n_{\text{кр}} G_{\text{кр}} Z_{\text{кр}} \pm \pm P_{\text{вх}}^H h_n \pm P_{\text{изх}}^H h_n \pm P_{\text{вх}}^K h_k \pm P_{\text{изх}}^K h_k \pm P_{\text{вх}}^y h_y \pm P_{\text{изх}}^y h_y \pm P_{\text{онх}} \cdot h_{\text{он}}, \quad (2.24)$$

$M_{\text{ох}}$

$$= 1 \cdot 273,8 \cdot 3,3 + 1 \cdot 100 \cdot 1,8 - 2 \cdot 172,9 \cdot 1,7 - 1 \cdot 70 \cdot 1,3 + 34,5 \cdot 9 + 36,9 \cdot 9 + 27,9 \cdot 7 + 185,9 \cdot 9,6 + 36,9 \cdot 9,6 = 3381$$

где  $Z_x, h_x$  – длина плеч нагрузок, м;

$h_n, h_{\text{кон}}, h_{\text{кр}}, h_y$  – соответственно число подвесок, консолей, кронштейнов и проводов;

$Z_{\text{кон}}$  – длина плеча нагрузки консоли, 1,8 м;

$Z_{\text{кр}}$  – длина плеча нагрузки кронштейна, 1,3 м;

$Z_{\text{пр}}$  – длина плеча нагрузки провода (УП), 1,7 м;

$h_n, h_k, h_{\text{пр}}$  – расстояние от условного обреза фундамента (УОФ) до несущего

троса, контактного провода и усиливающего провода соответственно,  $h_n=9\text{ м}$ ,  $h_k=7\text{ м}$ ,  $h_{np}=8,85$ ;  $h_{on}=9,6\text{ м}$ .

Результаты расчетов сводятся в таблицу 2.9.

В настоящее время в качестве опорных конструкций нашли широкое применение железобетонные стойки типа С и СС, а также металлические опоры типа МШ, МШК и МГК.

Согласно Техническому указанию №К-04/07 от 1.06.2007 г. «О применении металлических опор при строительстве и реконструкции контактной сети», рекомендуется применять металлические раздельные опоры, железобетонные опоры допускается применять в исключительных случаях при согласовании с Департаментом электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД».

При выборе несущей способности опор должны выполняться следующие условия  $M_o < M_n$  и  $M_{нт} < 0,5M_n$ , где  $M_n$  – нормативный момент опоры, кН·м.

Типы консолей и фиксаторов выбираются типа НТК и НК, согласно Альбома КС-160.4.1-09 «Консоли неизолированные наклонные. Фиксаторы. Схемы установки, типоразмеры и таблицы применения» (для постоянного тока) и КС-160.3.1-09 «Консоли неизолированные наклонные. Фиксаторы. Схемы установки, типоразмеры и таблицы применения» (для переменного тока)

Таблица 2.9 – Значение линейных нагрузок

Назначение опоры	Расчетный режим	Значения нагрузок на опоры, даН						
		$G_{\text{под}}$	$G_{\text{уп}}$	$G_{\text{пр}}$	$P_{\text{в}}^{\text{н}}$	$P_{\text{в}}^{\text{к}}$	$P_{\text{в}}^{\text{уп}}$	$P_{\text{в}}^{\text{пр}}$
Промежуточная опора на прямой	Гололед с ветром	264	76	80	48	37	61	36
	Ветер наибольшей интенсивности	177	43	40	36	48	59	29
Промежуточная опора на кривой	Гололед с ветром	367	89	97	64	50	74	65
	Ветер наибольшей интенсивности	177	41	40	53	69	78	45

Переходная опора на прямой	Гололед с ветром	281	80	84	51	40	65	36
	Ветер наибольшей интенсивности	188	43	41	36	51	63	31

Продолжение табл. 2.8

Переходная опора на кривой	Гололед с ветром	392	95	102	54	54	80	69
	Ветер наибольшей интенсивности	188	43	41	74	74	84	48
Анкерная опора на станции	Гололед с ветром	332	92	94	59	46	75	50
	Ветер наибольшей интенсивности	210	47	42	52	51	72	35
Анкерная опора на перегоне	Гололед с ветром	443	106	113	78	62	91	79
	Ветер наибольшей интенсивности	211	47	42	65	85	96	55

Таблица 2.10 – Величина изгибающего момента

№ п/п	Название опоры	Изгибающий момент, даН/м				Норм. момент, даН/м	Тип опоры
		$M_{стгсв}$	$M_{ствни}$	$M_{пергсв}$	$M_{первни}$		
1.	Промежуточная опора	2921	2676	3533	3003	80	МШК-10-80
2.	Переходная опора на кривой (внешняя сторона)	2921	2676	3353	3003	100	МШК-10-100
3.	Переходная опора на кривой (внутренняя сторона)	-1093	-1322	-1345	-1675	100	МШК-10-100
4.	Анкерная опора	3242	2940	3742	3313	100	МШК-10-100

Все выбранные опоры прошли проверку по изгибающему моменту.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Добрынин, Е.В. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Электроснабжение железных дорог» для студентов специальности 23.05.05 СОДП, специализация «Электроснабжение железных дорог» [Текст]/ Е.В Добрынин, Т.В. Бошкарева, С.А. Блинкова – Самара.: СамГУПС, 2021. – 35с.
2. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. трансп. [Текст] / К.Г. Марквардт.–М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Тер-Оганов, Э.В. Определение трансформаторной мощности тяговых подстанций. Учебное пособие. [Текст] / Э.В. Тер-Оганов, Г.С. Кузнецова, А.Н. Штин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. - 68 с.
4. Марквардт, К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. Справочное пособие. [Текст] / Марквардт К.Г. – М.:Транспорт, 1980. - 256 с.
5. Бесков, Б.А. Проектирование систем электроснабжения электрических железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. трансп. [Текст] / Б.А. Бесков Б, Б.Е. Геронимус, В.Н. Давыдов, М.Е. Крестьянов, Г.Г. Марквардт, Г.А. Минин. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 471 с.

Таблица П.А- Результаты тяговых расчетов в программном комплексе КОРТЭС

Нечётное направление			Чётное направление		
L, км	V, км/ч	Ia, А	L, км	V, км/ч	Ia, А
85	89	2278	52	88	174
84	89	2278	53	88	174
83	89	2278	54	88	404
82	88	1407	55	88	300
81	88	1407	56	88	273
80	87	100	57	88	236
79	89	100	58	88	150
78	88	100	59	88	99
77	85	100	60	88	89
76	82	100	61	86	75
75	86	100	62	80	75
74	85	100	63	69	75
73	84	100	64	58	3738
72	86	100	65	62	4654
71	86	100	66	64	4654
70	87	100	67	67	4654
69	86	100	68	68	4654
68	85	100	69	69	4654
67	85	100	70	69	4654
66	86	100	71	70	4654
65	87	100	72	70	4654
64	87	100	73	70	4654
63	85	100	74	70	4654
62	84	100	75	71	4677
61	85	100	76	73	5103
60	86	100	77	80	5103
59	67	268	78	80	5103
58	60	6804	79	86	5103
57	66	6804	80	89	3958
56	69	6804	81	89	3700
55	71	6804	82	89	3327
54	72	6804	83	89	1131
53	72	6804	84	89	1000
52	73	6804	85	89	994

Нечётное направление

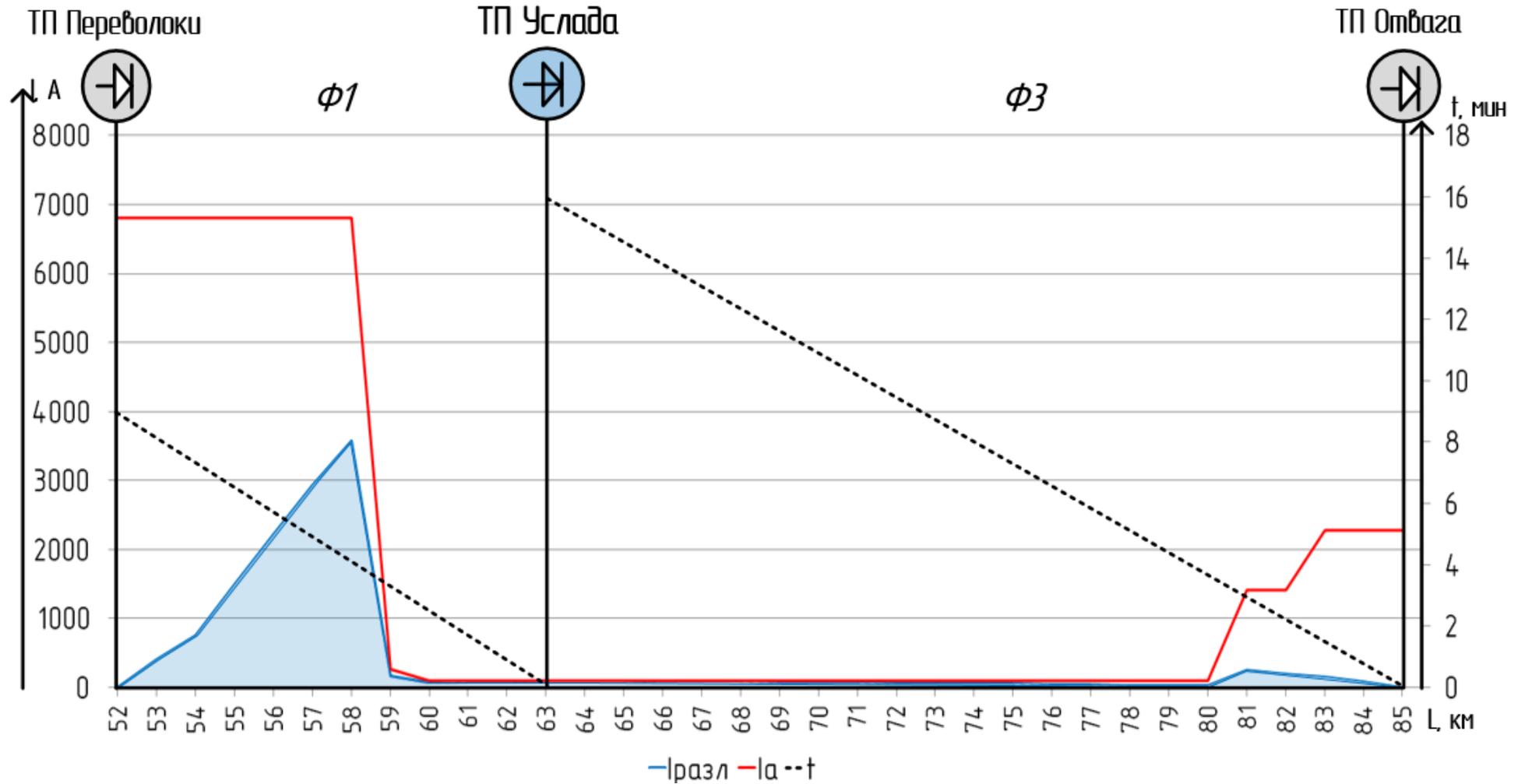


Рисунок П.Б1 – График поездного тока и времени хода поезда в нечётном направлении

### Четное направление

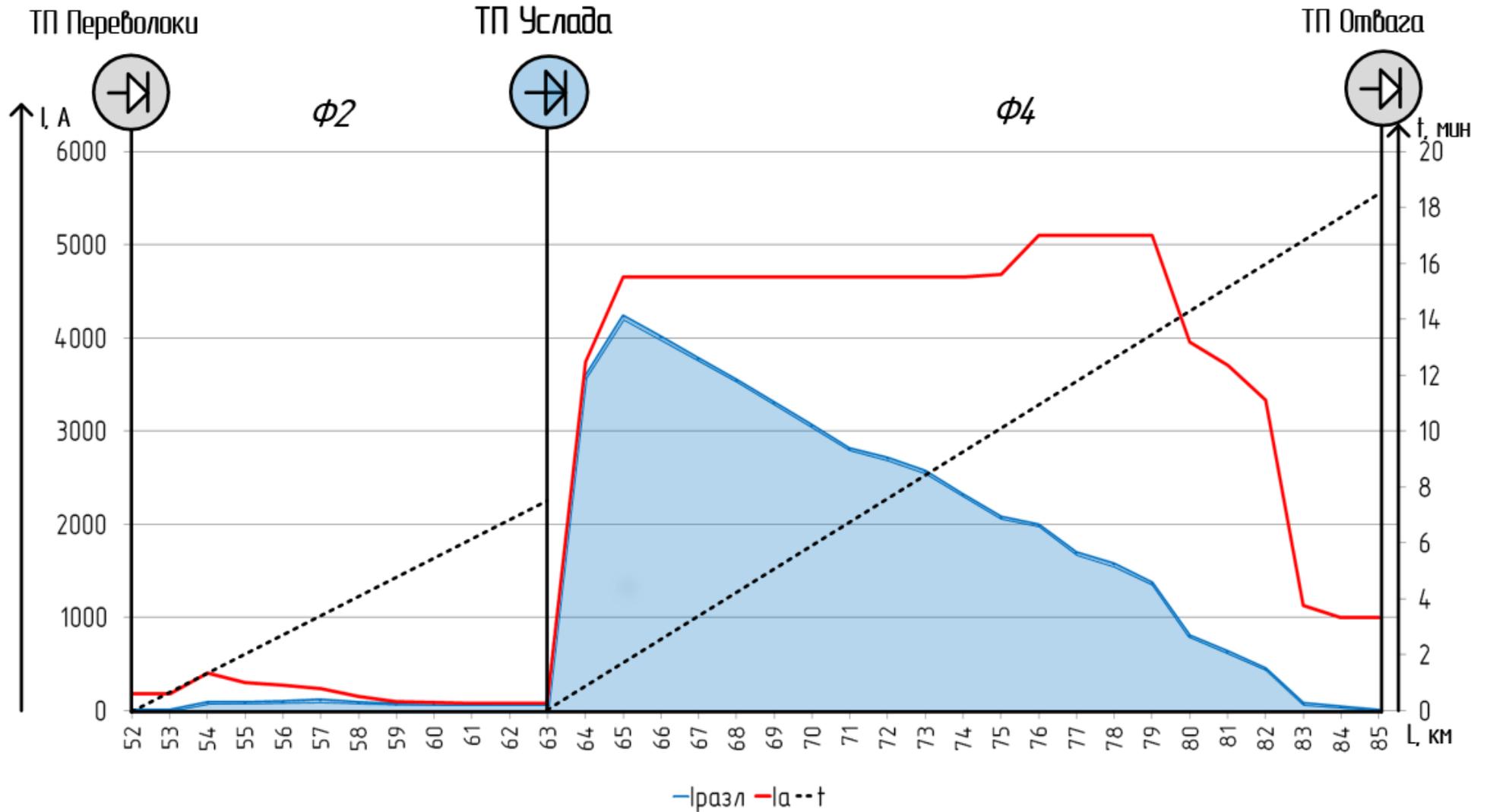


Рисунок П.Б2 – График поездного тока и времени хода поезда в чётном направлении