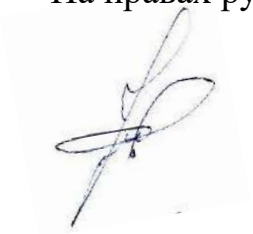
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Куликов Андрей Андреевич

«МЕТОДИКА ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТРАНСПОЗИЦИОННОЙ ГЕОМЕТРИИ ПОДВЕСА ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА»

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Бадер Михаил Петрович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1 ВОЗДУШНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 8

1.1 Несимметрия в высоковольтных линиях 8

1.2 Анализ негативного электромагнитного влияния тяговой сети на проводные линии 15

1.3 Исследование электрических влияний тяговой сети переменного тока 27,5 кВ на воздушную линию 26

1.4 Существующие методы борьбы с негативным электромагнитным влиянием 31

1.5 Выводы по разделу 1 37

2 МОНТАЖ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 38

2.1 Проблематика традиционного метода монтажа проводов воздушных линий. Технология монтажных работ и применяемого оборудования при существующих методах монтажа транспозиционной геометрии проводов 38

2.2 Решение проблемы традиционного метода монтажа проводов воздушных линий 44

2.2.1 Автоматизация ручного труда 44

2.2.2 Существующие методы теории автоматического регулирования, применимые для создания механизированного комплекса 48

2.3 Применение шестишаговой транспозиции для исключения электромагнитного влияния 53

2.4 Выводы по разделу 2 60

3 МОБИЛЬНЫЙ МЕХАНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС КАК СПОСОБ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ МОНТАЖА ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 61

3.1 Автоматизация монтажа воздушной линии с использованием механизированного комплекса 62

3.2 Шестишаговая транспозиция воздушной высоковольтной линии 69

3.3 Проработка серийных систем управления с гидравлическими приводами, работающих в автоматическом и полуавтоматическом режиме 78

3.4 Выводы по разделу 3 86

4 РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА 88

4.1 Устройство мобильного механизированного комплекса 88

4.1.1 Конструкция крутильной машины 91

4.1.2 Манипулятор для комплекса 110

4.2 Устройство межпролетного натяжения проводов 119

4.3 Устройство закрепления проводов 127

4.4 Электрический привод для комплекса 135

4.5 Структурная схема и алгоритм управления комплекса 150

4.6 Эффективность внедрения мобильного механизированного комплекса .. 154

4.7 Выводы по разделу 4 157

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 160

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 162

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Воздушная линия (ВЛ) электропередач выполняет важную роль в передаче электроэнергии на расстояния. Качество передаваемой энергии должно сохранятся на высоком уровне на протяжении всего срока эксплуатации. В случае ВЛ, расположенной вдоль путей железной дороги переменного тока, становится актуальной проблема негативного электромагнитного влияния контактной сети (КС) переменного тока на ВЛ. Особенно сильно это проявляется в условиях, когда монтаж ВЛ происходит на опорах контактной сети. Причиной такого расположения являются обстоятельства (вечная мерзлота, поймы рек, горная местность, расположение железной дороги переменного тока в черте города), ограничивающие монтаж дополнительных опор для ВЛ.

Наличие электромагнитных влияний обусловлено появлением электромагнитного поля вокруг контактного провода, которое индуцирует в смежном проводе токи и напряжение, приводящие к несимметрии электрических параметров линии [1].

Несимметрия в линии продольного электроснабжения способна привести как к небольшим отклонениям электроэнергии в фазах, так и к непоправимым последствиям, например, уничтожением жилого дома по причине возгорания электроприборов. В любом случае итогом становятся материальные затраты различной степени.

Дополнительно, в ходе анализа было установлено, что помимо несимметрии сам монтаж ВЛ ведется ручным методом, иногда в полуавтоматическом режиме. Существующий метод монтажа имеет большие временные и материальные затраты, а также высокую вероятность снижения качества по причине человеческой ошибки.

Таким образом, задача снижения несимметрии погонных электрических параметров по причине негативных электромагнитных влияний является

актуальной. Помимо влияний стоит также уделить внимание снижению человеческого фактора, временных и материальных затрат при монтаже ВЛ для повышения общего качество передаваемой электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями электромагнитных влияний в смежных линиях занимались отечественные авторы Бадер М. П., Герман Л. А., Тихонов П. Д., Хренов С. И., Гершенгорн А. И., Мельников Н.А., Шеренцис А. Н., Зильберман С. М., Красильникова Т. Г., Манусов В. З., Самородов Г. И., Жарков Ю. И., Фигурнов Е. П., Бочев А.С., Ожиганов Н. В., Бодров П. А., Семенов Ю. Г., Попова Н. А., Семенова Е. Ю., Иодко Ю. В., Устименко И. В.; зарубежные авторы Roman Hamar, Lenka Šroubová, Petr Kropík, Zhou Yi, Xu Yukui, Wang Dongdong, Liu Jigang, Wang Yajie, Jia Chuanzhao, Qiang Jing, Keyhan Sheshyekani, Javad Paknahad, Shadreck Mpanga, Wang Feng, Chen Chun, Sharin Ab Ghani, Mohd Shahril Ahmad Khiar, Imran Sutan Chairul, Nor Hidayah Rahim и др.

Вопрос автоматизации процессов на железной дороге рассматривали авторы Богданов Е.П., Е.П., Овечкин И. С., Китаева А. Т., Ларина И. В., Бикбулатов Р. И., Марченко А. С., Тазеев Н. Ф., Лундалин А.А., Пузина Е.Ю., Худоногов И.А., Гаврюшин С. С., Арбузов Е. В., Картовенко А.В., Юревич Е.И; зарубежные авторы Carden, L.; Maldonado, T.; Brace, C.; Myers, M., Sigurðardóttir, G.L., Son, H.; Bosché, F.; Kim, C., Cheng, T.; Mantripragada, U.; Teizer, J.; Vela, P.A. и др.

Объектом исследования являются воздушные линии, находящиеся под интенсивным электромагнитным влиянием контактной сети.

Предмет исследования – несимметрия погонных параметров воздушной линии, возникающая в результате негативных электромагнитных влияний, образующиеся в смежной с контактной сетью линии продольного электроснабжения.

Цель диссертационного исследования – снижение несимметрии электрических параметров воздушной линии продольного электроснабжения из-за электромагнитных влияний контактной сети.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи диссертационного исследования:**

- определить способы выравнивания электрических параметров в смежных линиях;
- провести теоретические и экспериментальные исследования метода снижения несимметрии электрических параметров, возникающей по причине электромагнитного влияния контактной сети;
- разработать методику монтажа воздушной линии, обеспечивающей выравнивание электрических параметров в линии, находящейся под интенсивным электромагнитным влиянием контактной сети.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработан метод монтажа проводов воздушной линии, обеспечивающий выравнивание в проводах-фазах погонных электрических параметров;
- проведено моделирование новой системы расположения проводов ВЛ в пространстве, находящейся под интенсивным электромагнитным влиянием контактной сети;
- определен эквивалент воздушной линии переменного тока, смонтированной по новой технологии транспозиции проводов;
- разработано устройство для осуществления методики монтажа в автоматизированном режиме для обеспечения высокой степени точности.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

- в ходе исследования было установлено, что разработанный метод монтажа воздушной линии позволяет снизить несимметрию электрических параметров до нуля;
- реализовать монтаж воздушной линии по новой методике позволит мобильный механизированный комплекс, работающий в автоматизированном режиме.

Методология и методы исследования.

В диссертационной работе использованы обобщение, системный анализ справочной и научно-технической литературы по направлению исследования. Для исследования и моделирования электромагнитных влияний был использован метод зеркальный изображений. Для моделирования и анализа полученных данных использовались следующие программы: Mathcad Prime 7.0, SolidWorks 2019, SolidWorks Simulations, NI Circuit Design Suite 14.3, Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту:

- способы снижения несимметрии погонных электрических параметров смежной линии, находящейся под интенсивным электромагнитным влиянием контактной сети;
- результаты исследования математического моделирования методики монтажа воздушной линии для выравнивания в проводах-фазах симметрии;
- автоматизация монтажного процесса воздушной линии новым методом с помощью мобильного механизированного комплекса.

Степень достоверности результатов.

Достоверность предложенных теоретических данных подтверждения сходимостью с экспериментальными значениями, полученными в ходе исследования. Дополнительно на метод монтажа воздушной линии и на устройство монтажа воздушной линии были получены патенты.

Апробация работы. Основные и промежуточные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (2021 год, МЦНС «Наука и просвещение», г. Пенза), Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы - 2021» (09–10 ноября 2021 года, ИПТ РАН, г. Санкт-Петербург).

1 ВОЗДУШНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На дорогах однофазного переменного тока питание тяговой сети осуществляется от трехфазной линии передачи электрической энергии через трансформаторы, обмотки которых соединены в ту или иную схему. Питание районных потребителей осуществляется либо специальными линиями электропередачи 10 – 35 кВ непосредственно от тяговой подстанции, либо от линий электропередач (ЛЭП) продольного электроснабжения, т. е. от линии передачи, подвешенной на опорах контактной сети, также получающей питание от тяговой подстанции. Система продольного электроснабжения представляет собой комплекс, включающий в себя источники электроснабжения, линии электропередачи, проложенные вдоль железных дорог, и трансформаторные подстанции, подключенные к этим линиям. Питание устройств сигнализации, централизации и безопасности (СЦБ) осуществляют по трехфазным трехпроводным линиям напряжением 6 (10) кВ от трехфазных источников питания частотой 50 Гц с изолированной нейтралью. Выбор напряжения для высоковольтной линии автоблокировки (ВЛ АБ) определяется нагрузкой и длиной линии.

1.1 Несимметрия в высоковольтных линиях

Напряжение несимметрии – напряжение на нейтрали в сети с изолированной нейтралью $\underline{U}_{\text{нс}}$, обусловленное несимметрией емкостей фаз относительно земли, определяется по формуле [1]

$$\underline{U}_{\text{нс}} = -\frac{U_{\text{ф}}\left(C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C\right)}{C_s}, \tag{1.1}$$

где C_A, C_B, C_C – емкости проводов фаз относительно земли;

$C_S == C_A + C_B + C_C$ – суммарная емкость проводов фаз относительно земли;

$U_ф$ – номинальное фазное напряжение сети, В;

a – оператор для векторов при построении в методе симметричных составляющих

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}},$$

где j – мнимая единица комплексного числа.

Степень несимметрии – относительное напряжение несимметрии (в относительных единицах или в процентах) по отношению к фазному напряжению сети, обусловленное неравенством емкостей фаз – $\underline{U}_0$. Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [2] степень несимметрии емкостей фаз сети относительно земли в сетях с компенсированной нейтралью $\underline{U}_0$ не должна превышать 0,75 %.

Напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_0$ – напряжение, которое появляется на нейтрали вследствие несимметрии емкостей фаз. В сети с изолированной нейтралью

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_{нс}}{1 - jd}. \tag{1.2}$$

Для дальнейших вычислений рассматривается отрезок линии электропередачи единичной длины – обычно 1 км. В соответствии с работой [1] для n заряженных тел связь между зарядами тел q_i и их потенциалами φ_i можно записать в виде

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & & \alpha_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & & \alpha_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_{nn} \end{pmatrix}, \tag{1.3}$$

где α_{ij} – собственные (при $i = j$) и взаимные (при $i \neq j$) потенциальные коэффициенты системы заряженных тел. Решение этой системы уравнений относительно вектора зарядов проводов получается в виде

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & & \beta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & & \beta_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_n \end{pmatrix}. \tag{1.4}$$

Здесь β_{ij} – коэффициенты статической индукции. Они имеют размерность емкости и $\beta_{ii} > 0$, а $\beta_{ij} < 0$ при $i \neq j$.

Для трех проводов фаз ВЛ (трех заряженных тел) это записывается как

$$\begin{aligned} q_1 &= \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3, \\ q_2 &= \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3, \\ q_3 &= \beta_{31}\varphi_1 + \beta_{32}\varphi_2 + \beta_{33}\varphi_3. \end{aligned} \tag{1.5}$$

Уравнения (1.5) для практических целей часто записывают через так называемые частичные емкости C_{ij} . Для трехфазной линии будем иметь

$$\begin{aligned} q_1 &= C_{11}(\varphi_1 - 0) + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{13}(\varphi_1 - \varphi_3), \\ q_2 &= C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}(\varphi_2 - 0) + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3), \\ q_3 &= C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1) + C_{32}(\varphi_3 - \varphi_2) + C_{33}(\varphi_3 - 0). \end{aligned} \tag{1.6}$$

Группируя члены в (1.6), получим

$$\begin{aligned} q_1 &= (C_{11} + C_{12} + C_{13})\varphi_1 - C_{12}\varphi_2 - C_{13}\varphi_3, \\ q_2 &= -C_{21}\varphi_1 + (C_{21} + C_{22} + C_{23})\varphi_2 - C_{23}\varphi_3, \\ q_3 &= -C_{31}\varphi_1 - C_{32}\varphi_2 + (C_{31} + C_{32} + C_{33})\varphi_3. \end{aligned} \tag{1.7}$$

Из сопоставления (1.4) и (1.7) следует

$$\beta_{ii} = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3}; (i = 1,2,3),$$
$$\beta_{ij} = -C_{ij} (i,j = 1,2,3; i \neq j), \quad (1.8)$$

и

$$C_{ii} = \beta_{i1} + \beta_{i2} + \beta_{i3}; (i = 1,2,3),$$
$$C_{ij} = -\beta_{ij} (i,j = 1,2,3; i \neq j). \quad (1.9)$$

Таким образом, емкости проводов фаз относительно земли на единицу длины

$$C_{11} = \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13},$$
$$C_{22} = \beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23}, \quad (1.10)$$
$$C_{33} = \beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33}.$$

Для вычисления собственных и взаимных потенциальных коэффициентов используется метод зеркальных отображений (рисунок 1.1).

При одинаковом радиусе проводов линии *ir* для всех фаз собственные и взаимные потенциальные коэффициенты рассчитываются по формулам

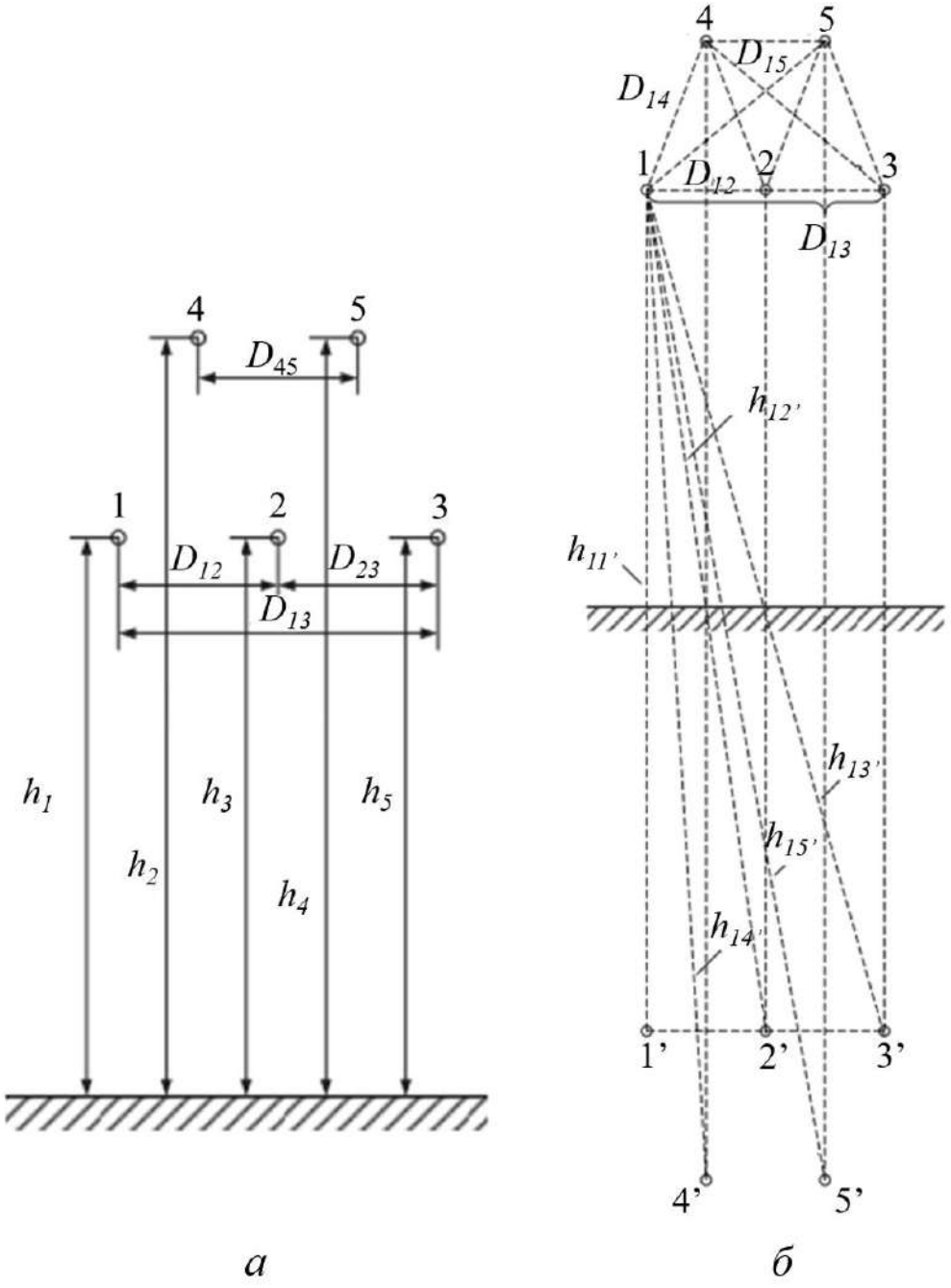
$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i},$$
$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{h_{ij}}{D_{ij}} \quad (1.11)$$

где h_i – высота, на которой подвешивается провод (которую приблизительно можно считать одинаковой на всем протяжении пролета ВЛ);

D_{ij} – расстояние между проводом *i* и проводом (тросом) *j*;

h_{ij} – расстояние между зеркальным отображением провода (троса) *j* и проводом *i*;

$\varepsilon_0 = 8{,}85 * 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая проницаемость.



а – расположение проводов фаз (1, 2 и 3) и тросов (4 и 5) на опоре; б – расстояния между фазой 1 и другими заряженными телами и их зеркальными отображениями (1', 2', 3', 4', 5')
$h_{1\text{-}5}$ – высота подвески проводов 1-5; D_{12} - расстояние между проводом 1 и проводом 2; D_{13} - расстояние между проводом 1 и проводом 3; D_{23} - расстояние между проводом 2 и проводом 3; D_{45} - расстояние между проводом 4 и проводом 5; D_{14} - расстояние между проводом 1 и тросом 4; D_{15} - расстояние между проводом 1 и тросом 5; $h_{11'}$ – расстояние между фазой 1 и зеркальным отображением фазы 1'; $h_{12'}$ – расстояние между фазой 1 и зеркальным отображением фазы 2'; $h_{13'}$ – расстояние между фазой 1 и зеркальным отображением фазы 3'; $h_{14'}$ – расстояние между фазой 1 и зеркальным отображением фазы 4'; $h_{15'}$ – расстояние между фазой 1 и зеркальным отображением фазы 5'

Рисунок 1.1 - Расстояния между заряженными телами ВЛ

Применяют несколько способов выравнивания емкостей фаз электрической сети относительно земли (рисунок 1.2).

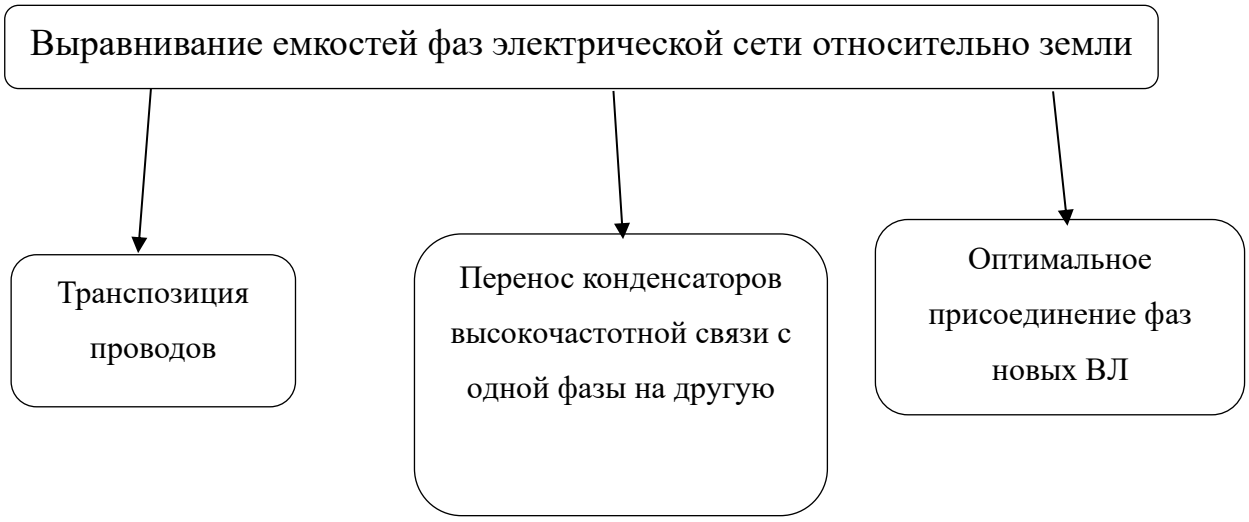


Рисунок 1.2 - Способы выравнивания емкостей фаз электрической сети относительно земли

Для выравнивания емкостей фаз путем транспозиции проводов необходимо определить среднюю величину емкостей фаз и найти на сколько действительные емкости отличаются от средней величины

$$C_{ср} = \frac{C_A + C_B + C_C}{3};$$
$$C_A - C_{ср} = \Delta C_A;$$
$$C_B - C_{ср} = \Delta C_B; \quad (1.12)$$
$$C_C - C_{ср} = \Delta C_C.$$

Совместное решение этой системы уравнений позволяет определить требуемые изменения емкостей фаз. Одни емкости следует увеличить, а другие уменьшить

$$\begin{aligned}\Delta C_A &= \frac{1}{3}(2C_A - C_B - C_C);\\ \Delta C_B &= \frac{1}{3}(2C_B - C_A - C_C);\\ \Delta C_C &= \frac{1}{3}(2C_C - C_A - C_B).\end{aligned} \tag{1.13}$$

Например, если C_B – наименьшая емкость, а ΔC_A и ΔC_C – превышения емкостей фаз *A* и *C* над емкостью фазы *B*, то имеем уравнения

$$\begin{aligned}\Delta C_{AB} &= \Delta C_A - \Delta C_B;\\ \Delta C_{CB} &= \Delta C_C - \Delta C_B;\\ \Delta C_A + \Delta C_B + \Delta C_B &= 0.\end{aligned} \tag{1.14}$$

Решение этой системы уравнений дает

$$\begin{aligned}\Delta C_A &= \frac{1}{3}(2\Delta C_{AB} - \Delta C_{CB});\\ \Delta C_B &= -\frac{1}{3}(2\Delta C_{AB} + \Delta C_{CB});\\ \Delta C_C &= \frac{1}{3}(2\Delta C_{CB} - \Delta C_{AB}).\end{aligned} \tag{1.15}$$

Из формулы (1.15) видно, что емкости фаз *A* и *C* должны быть уменьшены, а емкость фазы *B* – увеличена. Если C_1, C_2 и C_3 – удельные емкости проводов соответственно фаз *A*, *B* и *C* (мкФ/км), то для выравнивания емкостей следует поменять местами провода фаз *A* и *B* на длине

$$\Delta l_{A\leftrightarrow B} = \frac{2\Delta C_{AB} - \Delta C_{CB}}{3(C_1 - C_2)}, \tag{1.16}$$

и фаз *B* и *C* на длине

$$\Delta l_{B\leftrightarrow C} = \frac{2\Delta C_{CB} - \Delta C_{AB}}{3(C_3 - C_2)}. \quad (1.17)$$

Указанные формулы позволяют с достаточной для практики точностью проводить вычисления величин изменения емкостей фаз, а также длину линии, на которой необходимо провести замену проводов фаз.

1.2 Анализ негативного электромагнитного влияния тяговой сети на проводные линии

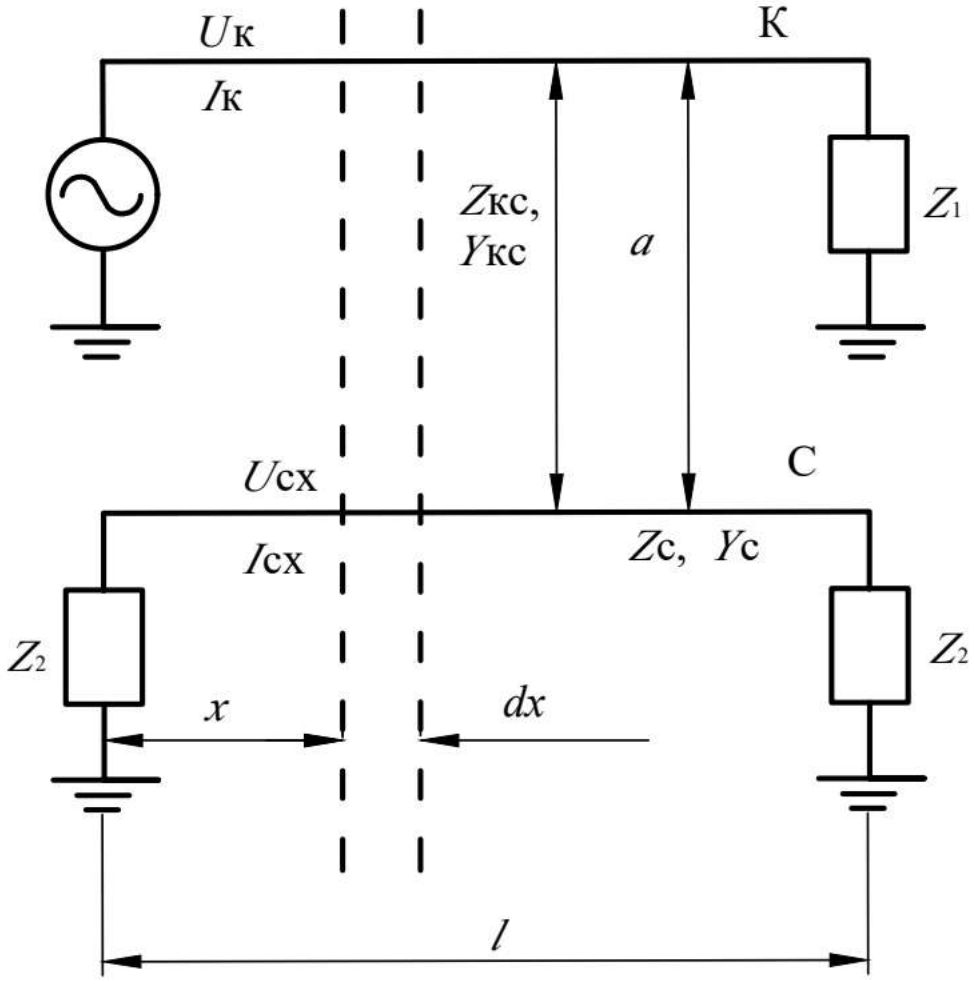
Любая электрическая цепь, содержащая переменные напряжения и токи, будет создавать переменные электромагнитные поля в окружающем пространстве, индуцируя напряжения и токи в другой цепи, расположенной в этом пространстве. Эти напряжения и токи в подверженных влиянию цепях могут достигать значений, представляющих опасность для здоровья и жизни обслуживающего персонала, целостности оборудования и установок, содержащихся в цепях, и изоляции проводов.

Напряжение воздействия тяговой сети равно рабочему напряжению переменного тока, а величина тока в земле эквивалентна рабочему току. Таким образом, тяговая сеть действует как однопроводная однофазная линия с током, возвращающимся через землю, и является почти полностью несимметричной, при этом оказывая сильное влияние на соседние цепи.

Восприимчивы к влиянию практически все проводные и кабельные линии с более низким уровнем передачи энергии, проложенные вблизи электрифицированных железных дорог.

Тяговую сеть, в которой ток течет по рельсам и земле, можно представить в виде двух цепей: первая цепь — тяговая сеть-земля, вторая цепь — рельсы-земля. Первая цепь (тяговая сеть-земля) представляет собой полностью несимметричную

однопроводную линию. Затуханием в контактной сети можно пренебречь, так как ее коэффициент распространения волны при рабочей частоте незначителен. На рисунке 1.3 показано влияние однопроводной линии, а именно тяговой сети на соседнюю однонопроводную линию. Обратным влиянием можно пренебречь, полагая, что оно оказывает на контактную сеть незначительный эффект.



К – контактная сеть; С – смежная линия; *U*к, *I*к – напряжение и ток контактной сети; U_{cx}, I_{cx} - напряжение и ток в смежной линии на расстоянии *x* от ее начала; Z_1, Z_2 – продольные сопротивления контактной сети и смежной линии; *Z*кс - сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью и смежной линией; *Y*кс - взаимная проводимость между контактной сетью и смежной линией; *Z*с – продольное сопротивление смежной линии, *Y*с – поперечная проводимость смежной линии; *x* – расстояние от начала смежной линии до рассматриваемого участка; *dx* – приращение рассматриваемого участка смежной линии; *l* – длина смежной линии; *a* – ширина сближения контактной сети и смежной линии

Рисунок 1.3 – Схема сближения контактной сети и смежной линии

Наведенные напряжения соседних линий относительно земли обычно намного меньше воздействующих напряжений. Чтобы в некоторой степени

упростить рассмотрение эффектов, необходимо считать, что сближение контактной сети происходит по всей длине соседних линий; сближение параллельное; это позволит рассматривать параметры связи неизменяющимися по всей длине.

Поскольку прилегающая линия имеет распределенные параметры и обладает продольным сопротивлением Z_C и поперечной проводимостью Y_C, то индуцируемое напряжение относительно земли U_{CX} и ток I_{CX} в этой линии будут меняться в зависимости от длины линии. Поэтому сначала необходимо найти приращения напряжения и тока в прилегающей электрической линии на единичном участке длины сближения *dx*.

Приращение напряжения определяется продольной электродвижущей силой (ЭДС), наводимой током контактной сети, и падением напряжения, возникающим на единичном участке при протекании наведенного тока в прилегающей электрической линии. С другой стороны, приращение тока на этом участке зависит от тока, наведенного в соседней линии под действием напряжения контактной сети, а также от тока, определяемого наведенным напряжением и поперечной проводимостью прилегающей линии. Согласно этому установившийся процесс на единичной части длины сближения описывается уравнением [1]

$$-\frac{d\dot{U}_{cx}}{dx} = z_{kc}\dot{I}_k + z_c\dot{I}_{cx};$$
$$-\frac{d\dot{I}_{cx}}{dx} = -y_{kc}\dot{U}_k + y_c\dot{U}_{cx}\,, \qquad (1.18)$$

где все напряжения и токи являются векторными величинами.

Индекс *k* указывает на принадлежность величины к КС, *c* – к смежной (прилегающей) линии, *kc* определяет параметры связи между линиями.

$\dot{U}_k, \dot{I}_k$- напряжение и ток КС;

$\dot{U}_{cx}, \dot{I}_{cx}$ - индуктированные напряжение относительно земли и ток в прилегающей линии на расстоянии *x* от ее начала;

$z_c = r_c + jwL_c$- полное сопротивление прилегающей линии, где r_c - ее активное сопротивление, L_c - индуктивность, w – угловая частота;

$y_c = g_c + jwC_c$ - полная проводимость прилегающей линии, где g_c - проводимость изоляции, $C_c = C_{co} + C_{kc}$- емкость прилегающей линии относительно земли и КС, C_{co}- емкость прилегающей линии относительно земли; обычно $g_c << wC_c$ и тогда $y_c \approx jwC_c$;

$z_{kc} = jwM_{kc}$- сопротивление взаимоиндукции между КС и прилегающей линией (параметр магнитной связи), где M_{kc} - коэффициент взаимоиндукции между этими однопроводными линиями;

$y_{kc} = g_{kc} + jwC_{kc}$- взаимная проводимость между КС и прилегающей линией (параметр электрической связи), где g_{kc}- активная приводимость, C_{kc}- емкость между этими линиями; обычно $g_{kc} << wC_{kc}$, тогда $y_{kc} \approx jwC_{kc}$.

Все указанные параметры сведены к единице длины линии (на 1 км). Уравнения (1.18) представляют собой систему обыкновенных линейных неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка. После решения этой системы получается

$$\dot{U}_{cx} = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} + k_1\dot{U}_k;$$
$$\dot{I}_{cx} = -\frac{1}{Z_{CB}}(Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}) - k_1\dot{I}_k, \quad (1.19)$$

где $\gamma = \sqrt{z_c y_c}$- коэффициент распространения волны в смежной линии; $z_{CB} = \sqrt{\frac{z_c}{y_c}}$ - волновое сопротивление смежной линии. В уравнениях (1.19) приняты обозначения:

$$k_1 = \frac{z_{kc}}{z_c} = \frac{jwM_{kc}}{r_c + jwL_c}; k_2 = \frac{y_{kc}}{y_c} = \frac{C_{kc}}{C_{kc} + C_{co}}. \quad (1.20)$$

Постоянные интегрирования A и B в уравнениях (1.20) находятся из граничных условий. Если смежная линия замкнута по концам на некоторые

сопротивления, то в начале линии при $x = 0$ индуктированные напряжение относительно земли и ток будут иметь значения

$$\dot{U}_{cx} = \dot{U}_{co} \text{ и } \dot{I}_{cx} = \dot{I}_{co}.$$

Тогда из уравнений (2) следует при $x = 0$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{co} &= A + B + k_2\dot{U}_k; \\ \dot{I}_{co} &= -\frac{1}{Z_{CB}}(A - B) - k_1\dot{I}_k. \end{aligned} \tag{1.21}$$

Отсюда определяются значения констант A и B, после чего необходимо подставить их в уравнения (1.20), а затем сделать ряд преобразований и обратиться к гиперболической функции, получая в итоге напряжение относительно земли и тока в точке x, наведенного в прилегающей линии по причине электромагнитного влияния КС

$$\begin{aligned} \dot{U}_{cx} &= \left(\dot{U}_{co} - k_2\dot{U}_k\right)ch\gamma x - Z_{CB}\left(\dot{I}_{co} + k_1\dot{I}_k\right)sh\gamma x + k_2\dot{U}_k; \\ \dot{I}_{cx} &= -\frac{\dot{U}_{co} - k_2\dot{U}_k}{Z_{CB}}sh\gamma x + \left(\dot{I}_{co} + k_1\dot{I}_k\right)ch\gamma x - k_1\dot{I}_k. \end{aligned} \tag{1.22}$$

Вследствие воздействия единого электромагнитного поля, образующегося вокруг провода КС, в прилегающих линиях возникают наведенные, т.е. индуцированные напряжения и токи. Однако, чтобы облегчить анализ и расчет эффектов, влияние электромагнитного поля обычно делят на две части — электрические влияния и магнитные влияния. И соответственно рассмотрение этих полей происходит отдельно. *Электрическое* воздействие проявляется наведением электрического потенциала в прилегающей линии относительно земли под действием электрического поля, которое создается при наличии напряжения в КС.

Магнитное влияние проявляется, когда возникает продольная ЭДС в прилегающей линии, наводимая магнитным полем. Магнитное поле появляется вследствие протекания тока по проводам КС.

Если в контактной сети есть напряжение, но ток не протекает из-за отсутствия нагрузки, можно рассматривать только электрические эффекты взаимного влияния. Тогда в уравнениях (1.22) следует принять $\dot{I}_k = 0$. При рассмотрении распределения напряжений и токов по длине прилегающей линий во время электрического воздействия индексом э пользуются для обозначения соответствующих величин для различных частных случаев их состояния. Для каждого конкретного случая справедливы следующие граничные условия:

1) прилегающая линия изолирована от земли, т. е. $Z_2 = \infty$ (рисунок 1.3). Тогда в начале линии ($x = 0$) и в конце ее ($x = l$) ток $\dot{I}_{сэо} = \dot{I}_{сэl} = 0$;

2) прилегающая линия в конце заземлена через сопротивление $Z = Z_2$, а в начале изолирована. Тогда при $x = 0$ $\dot{I}_{сэо} = 0$, при $x = l$ $\dot{U}_{сэl} = \dot{I}_{сэl} Z_2$;

3) прилегающая линия в начале изолирована, а в конце заземлена; при $x = 0$ $Z_2 = \infty$ $\dot{I}_{сэо} = 0$, при $x = l$ $Z_2 = 0$ и $\dot{U}_{сэl} = 0$;

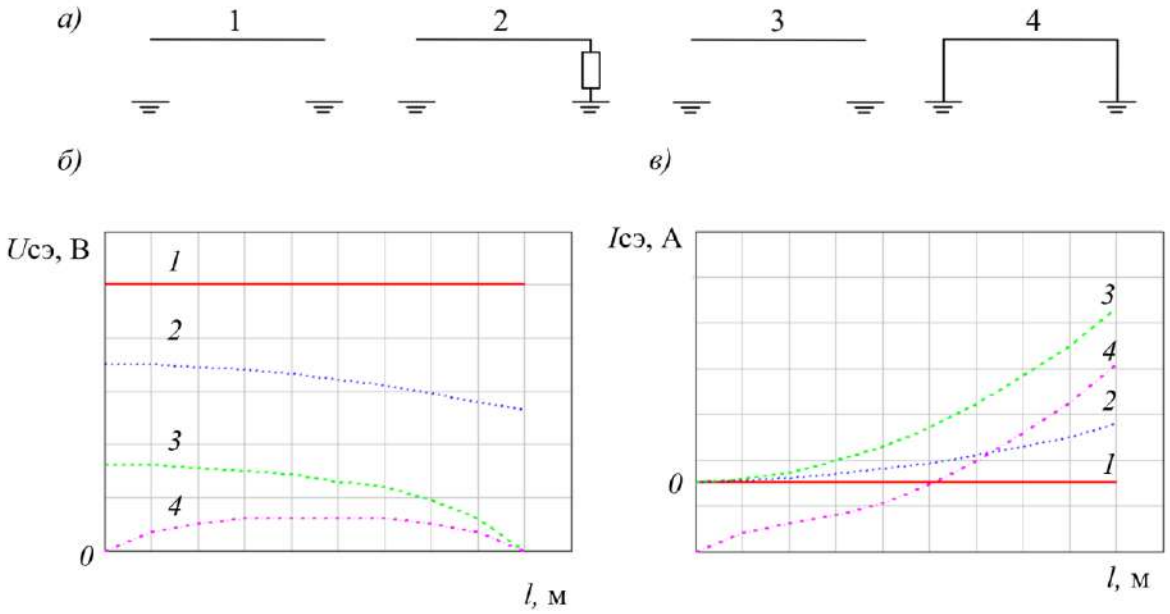
4) прилегающая линия заземлена по концам; при $x = 0$ и $x = l$ $Z_2 = 0$ и $\dot{U}_{сэо} = \dot{U}_{сэl} = 0$.

Для каждого описанного выше случая, когда $\dot{I}_k = 0$, выражения для наведенного напряжения и тока можно найти из общих уравнений (1.20). Анализ этих выражений (подробно рассмотренный в работе [1]) дает распределение $\dot{U}_{сэ}$ и $\dot{I}_{сэ}$ по длине прилегающей линии, как показано на рисунке 1.4.

Из этого анализа видно, что при электрическом воздействии максимальное напряжение индуцируется в изолированной прилегающей линии, то есть в первом случае. Учитывая отсутствие тока в КС ($\dot{I}_k = 0$) и граничный условия изолированной прилегающей линии ($\dot{I}_k = 0 \dot{I}_k = 0$), по второму уравнению (1.22) в точке $x = l$

$$0 = -\left(\dot{U}_{co} - k_2\dot{U}_k\right)\frac{sh\gamma l}{Z_{CB}}, \tag{1.23}$$

откуда $\dot{U}_{co} = k_2\dot{U}_k$. Подставив значение напряжения в начале линии в первое уравнение (1.18), получается, что $\dot{U}_{сэ} = k_2\dot{U}_k$.



а – схемы соединения смежной линии с землей, б – график зависимости индуктированного напряжения при электрическом влиянии $\dot{U}_{сэ}$ от длины смежной линии, в - график зависимости индуктированного тока при электрическом влиянии $\dot{I}_{сэ}$ от длины смежной линии

1 – смежная линия изолирована от земли; 2 – смежная линия в начале изолирована, а в конце соединена с землей через сопротивление $Z = Z_2$; 3 - смежная линия в начале изолирована, а в конце заземлена; 4 - смежная линия замкнута по концам на землю; Z – продольное сопротивление линии, l – длина смежной линии

Рисунок 1.4 – Распределение напряжений относительно земли и токов по длине смежной линии при электрическом влиянии

Следовательно, напряжение, наведенное в изолированной прилегающей линии при электрическом воздействии $\dot{U}_{сэ}$, постоянно по всей ее длине (линия 1 на рисунке 1.4, *б*). Оно определяется напряжением в КС и коэффициентом емкостной связи k_2, который зависит от соотношения частичных емкостей прилегающей линии по отношению к КС C_{kc}и земли C_{co}, формулы (1.20) и рисунок 1.4. Этот

коэффициент можно найти из уравнений электрического потенциала электростатического поля.

Из теории электростатического поля известно, что градиент потенциала поля равен по величине и обратный по направлению вектору напряженности поля

$$-\frac{d\phi}{dr} = E, \quad \text{т. е.} \quad d\phi = -Edr. \tag{1.24}$$

Провода расположены над землей, и для того чтобы учесть ее влияние на электростатическое поле вокруг проводов используется метод электрических зеркальных изображений, из которого следует, что замена проводящей среды (в данном случае – земли) зеркальным изображением провода (относительно ее поверхности) с зарядом обратного знака не изменяет поля над ее поверхностью. Проведя ряд преобразований, при параллельной трассе сближения получим расчетную формулу

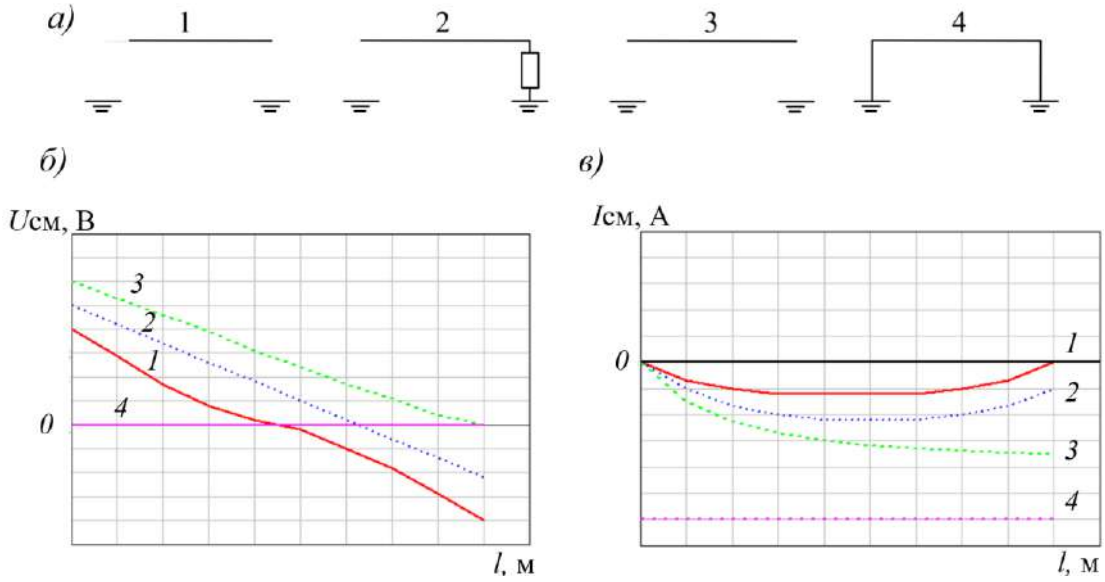
$$\dot{U}_{cэ} = k\dot{U}_k \frac{bc}{a^2 + b^2 + c^2} \cdot \frac{l_k}{l_c}. \tag{1.25}$$

При сложной трассе сближения с n элементами косого и параллельного сближения, если i – номер элемента

$$\dot{U}_{cэ} = \frac{k\dot{U}_k}{l_c} \sum_{i=1}^{n} \frac{bc}{a_i^2 + b^2 + c^2} l_{ki}. \tag{1.26}$$

Для высоты подвеса и сечения контактной сети, применяемой на железных дорогах однофазного тока, с учетом расщепления фазы на контактный провод и несущий трос можно приближенно принять для однопутных участков k = 0,4, для двухпутных участков k = 0,6 [1].

Если емкостная связь между КС и прилегающей линией очень мала, например, при значительной ширине сближения, то можно учитывать только магнитные воздействия. Тогда в уравнении (1.22) можно взять $k_2 = 0$. Используя индекс *м* для обозначения соответствующих величин при магнитном воздействии, рассматриваются напряжения и токи, наводимые в примыкающей к КС линии относительно земли, и распределение токов в различных частных случаях состояния линии (рисунок 1.4).



а – схемы соединения смежной линии с землей, б – график зависимости индуктированного напряжения при магнитном влиянии $\dot{U}_{см}$ от длины смежной линии x, в - график зависимости индуктированного тока при магнитном влиянии $\dot{I}_{см}$ от длины смежной линии x
1 – смежная линия изолирована от земли; 2 – смежная линия в начале изолирована, а в конце соединена с землей через сопротивление $Z = Z_2$; 3 - смежная линия в начале изолирована, а в конце заземлена; 4 - смежная линия замкнута по концам на землю; *l* – длина смежной линии

Рисунок 1.5 – Распределение напряжений относительно земли и токов по длине смежной линии при магнитном влиянии

Из уравнений (1.22) для каждого из этих случаев при $k_2 = 0$ и указанных граничных условиях можно найти формулы для напряжения и тока, индуктированных в смежной линии вследствие магнитного влияния КС. На рисунке 1.5 представлено распределение напряжения и тока по длине прилегающей линии, полученное в результате анализа по уравнениям (1.23-1.26).

Сравнивая результаты, полученные для рассмотренных частных случаев, легко убедиться, что наведенное напряжение относительно земли является максимальным, когда прилегающая линия заземлена с одного конца. В этом случае величина напряжения на другом конце линии равна продольной ЭДС $E_{СМК}$. Эту ситуацию следует учитывать при определении магнитного влияния. Напряжение $\dot{U}_{СМО}$ в начале прилегающей линии, заземленной в конце, при магнитном влиянии, приняв $k_2 = 0$ и учитывая граничные условия $\dot{I}_{\text{смо}} = 0$ и $\dot{U}_{смl} = 0$, из первого уравнения (1.22) для *x=l*

$$0 = \dot{U}_{смо} ch\gamma l - Z_{СВ} k_1 \dot{I}_k sh\gamma l, \tag{1.27}$$

откуда

$$\dot{U}_{смо} = Z_{СВ} k_1 \dot{I}_k th\gamma l. \tag{1.28}$$

На частоте 50 Гц значение γl обычно невелико, поэтому можно принять $\text{th}\gamma l \approx \gamma l$. С учетом этого, подставив значения $Z_{СВ}, \gamma$ и k_1 из выражения (1.20) в формулу (1.28), получается

$$\dot{U}_{смо} = z_{кс} \dot{I}_k l = jwM_{кс} \dot{I}_k l = -\dot{E}_{смк}. \tag{1.29}$$

При сложной трассе сближения прилегающей линии и КС модуль продольной ЭДС и напряжение в начале линии, заземленной в конце, определяются как сумма ЭДС, наведенных в каждой *i* части косого или параллельного сближения.

$$E_{смк} = U_{смо} = w \sum_{i=1}^{n} M_{кci} I_{ki} l_i. \tag{1.30}$$

Из-за электрических воздействий максимальные напряжения индуцируются в изолированных прилегающих линиях. Поскольку ВЛ подвержены как электрическому, так и магнитному воздействию, практический интерес

представляет также оценка значения напряжения в начале (или конце) изолированной прилегающей линии, находящейся под магнитным воздействием.

Из второго уравнения (1.22), приняв $k_2 = 0$ и учитывая граничное условие для первого частного случая - изолированной линии $I_{\text{смо}} = I_{\text{см}l} = 0$, при $x=l$ получается

$$0 = -\frac{\dot{U}_{смо}}{Z_{СВ}} sh\gamma l + k_1 \dot{I}_k ch\gamma l - k_1 \dot{I}_k, \tag{1.31}$$

откуда

$$\dot{U}_{смо} = Z_{СВ} k_1 \dot{I}_k \frac{ch\gamma l - 1}{sh\gamma l} = Z_{СВ} k_1 \dot{I}_k th\frac{\gamma l}{2}. \tag{1.32}$$

После некоторых преобразований, получается

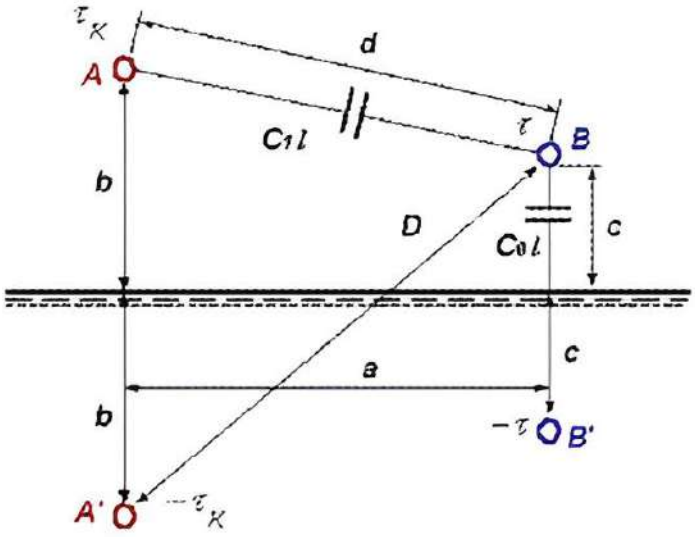
$$\dot{U}_{смо} = z_{kc} \dot{I}_k \frac{l}{2} = jwM_{kc} \dot{I}_k \frac{l}{2} = -\frac{E_{смк}}{2}. \tag{1.33}$$

Коэффициент взаимной индуктивности M_{kc} между контурами КС-земля и контуром прилегающая линия-земля зависит от ширины сближения (которая уменьшается с увеличением ширины сближения *a*) и от размеров контуров. В свою очередь, размер контурной цепи определяется проводимостью земли γ_3 и частотой воздействующего тока *f*. Чем выше электропроводность земли, тем меньше глубина, на которой токи распространяются под землей (чем ниже проводимость, тем больший объем распространяется токов на землю). По мере увеличения частоты ток направляется к поверхности земли и течет на меньшей глубине. Следовательно, по мере увеличения проводимости и частоты земли ток в земле течет на меньшей глубине и размер двух контурных цепей уменьшается, а значит, уменьшается и коэффициент взаимной индуктивности. Формулы Поллачека и Карсона для определения коэффициентов взаимной индуктивности между контурными цепями КС-земля и рельсы-земля подробно описаны в работе [1].

Приведенные там формулы по определению коэффициента взаимоиндукции для различных условий применения весьма громоздки, поэтому обычно коэффициент взаимоиндукции между однопроводными линиями определяют по кривым, построенным для практического использования по этим формулам в виде зависимости от ширины сближения *a* (м), проводимости земли γ_3 (См/м) и частоты тока *f* (Гц) [1].

1.3 Исследование электрических влияний тяговой сети переменного тока 27,5 кВ на воздушную линию

На рисунке 1.6 изображена расчетная система в сечении перпендикулярно проводам.



A – контактная сеть; *B* – смежный провод; *A'* – зеркальное отображение контактной сети; *B'* – зеркальное отображение смежного провода; *a* – перпендикулярное расстояние между контактной сетью и смежным проводом; *b* – расстояние от контактной сети (зеркального отображения контактной сети) до земли; *c* - расстояние от смежного провода (зеркального отображения смежного провода) до земли; *d* – натуральное расстояние между контактной сетью и смежным проводом; *D* – расстояние между смежным проводом и зеркальным отображением контактной сети; C_{1l} – емкостная составляющая сопротивления между контактной сетью и смежным проводом; C_{0l} – емкостная составляющая сопротивления между смежным проводом и землей; $\tau_к$, τ - противоположные по знаку заряды контактной сети и смежного провода

Рисунок 1.6. - Расчетная схема для исследования электрических влияний

По зеркальному методу влияние земли на распределение потенциала можно заменить влиянием дополнительных проводников A' и B', зеркально отражающих КС A и прилегающую линию B и имеющих заряды с противоположными знаками (по сравнению с зарядом исходной системы) - $\tau_к$ на единичную длину линии.

В задаче по методу зеркальных отображений уже нет земли, а есть четыре провода в бесконечном пространстве; электрическое поле в этой системе соответствует электрическому полю в верхней половине пространства над землей вне проводов в исходной системе.

На рисунке 1.7 представлен результат расчета для схемы взаимного расположения влияющих и подверженных влиянию проводов (рисунок 1.6).

Расчета электрических влияний производится по формуле [3]

$$U_э = U_к \cdot \frac{ln\left(\frac{D}{d}\right)}{ln\left(\frac{2 \cdot b_к}{\rho_к}\right)}, \quad (1.34)$$

где $U_к$ – напряжение контактной сети, $U_к$ = 27500 В;

$b_к$ – высота подвеса эквивалента контактной сети, можно принять $b_к$ = 8 м;

$\rho_к$ – радиус эквивалента контактной подвески, м.

При проведении расчетов по формуле (1.34) для однопутных участков $ln(2b_к/\rho_к) = 5$; для участков с количеством путей два и более $ln(2b_к/\rho_к) = 3{,}3$.

Геометрические размеры задаются формулами:

$$D = \sqrt{a^2 + (b_к + b_л)^2};\ d = \sqrt{a^2 + (b_к - b_л)^2}\,. \quad (1.35)$$

Проведем исследование зависимости напряжения электрических влияний по формуле (1.34) от следующих параметров:

- ширины сближения провода линии с контактной сетью *a* изменяется в пределах от 5 до 200 м;

- высоты подвеса провода линии $b_л$ изменяется в пределах от 3 до 12 м;

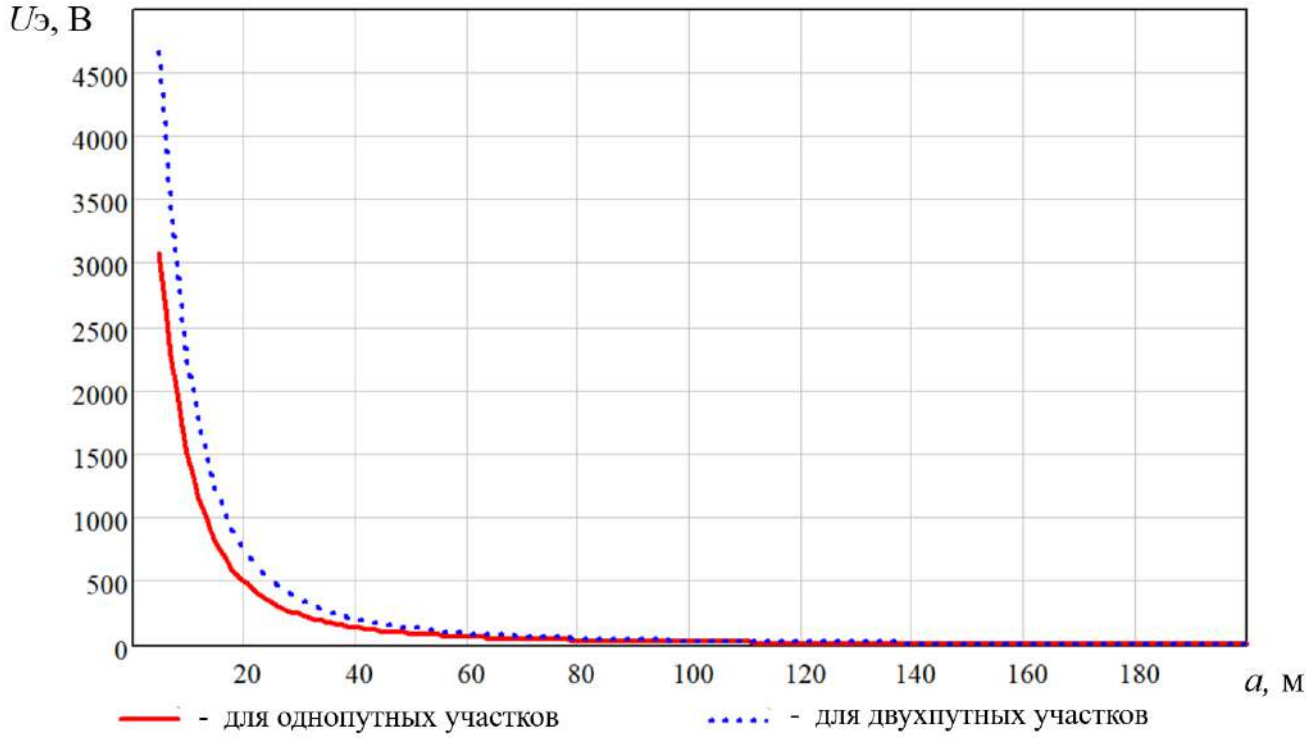
- количества контактных подвесок путей (для однопутного и двухпутного участков).

В таблице 1.1 приведены расчеты электрических влияний для однопутного и двухпутного участков при изменении ширины сближения провода линии с контактной сетью *a* в пределах от 5 до 200 м. При этом высота подвеса провода линии $b_л$ составляет 3 метра.

Таблица 1.1 – Расчетные данные электрического влияния от выбора ширины сближения провода с контактной сетью *a* для однопутного и двухпутного участка железной дороги

Параметры контактной сети					Расчетные данные				
Uк, В	Bк, м	$ln(2b_к/\rho_к)$ для однопутного участка	$ln(2b_к/\rho_к)$ для двухпутного участка	$b_л$, м	D, м	d, м	a, м	$U_Э$.однопут, В	$U_Э$.двухпут, В
27500	8	5	3,3	3	11,1	6,4	5	3072,2	4654,8
					26,9	25,3	25	335,7	508,7
					51	50,2	50	89,4	135,5
					75,7	75,1	75	40,2	61
					100,5	100,1	100	22,7	34,5
					125,4	125,1	125	14,6	22,1
					150,3	150,1	150	10,1	15,4
					175,3	175	175	7,5	11,3
					200,2	200	200	5,7	8,7

На рисунке 1.7 представлены зависимости электрического влияния от выбора ширины сближения провода с контактной сетью *a* для однопутного и двухпутного участка железной дороги.



*U*э – напряжение при электрическом влияние; *a* – ширина сближения провода с контактной сетью

Рисунок 1.7 - Зависимость электрических влияний участка тяговой сети переменного тока на одиночный провод изолированной от земли воздушной линии

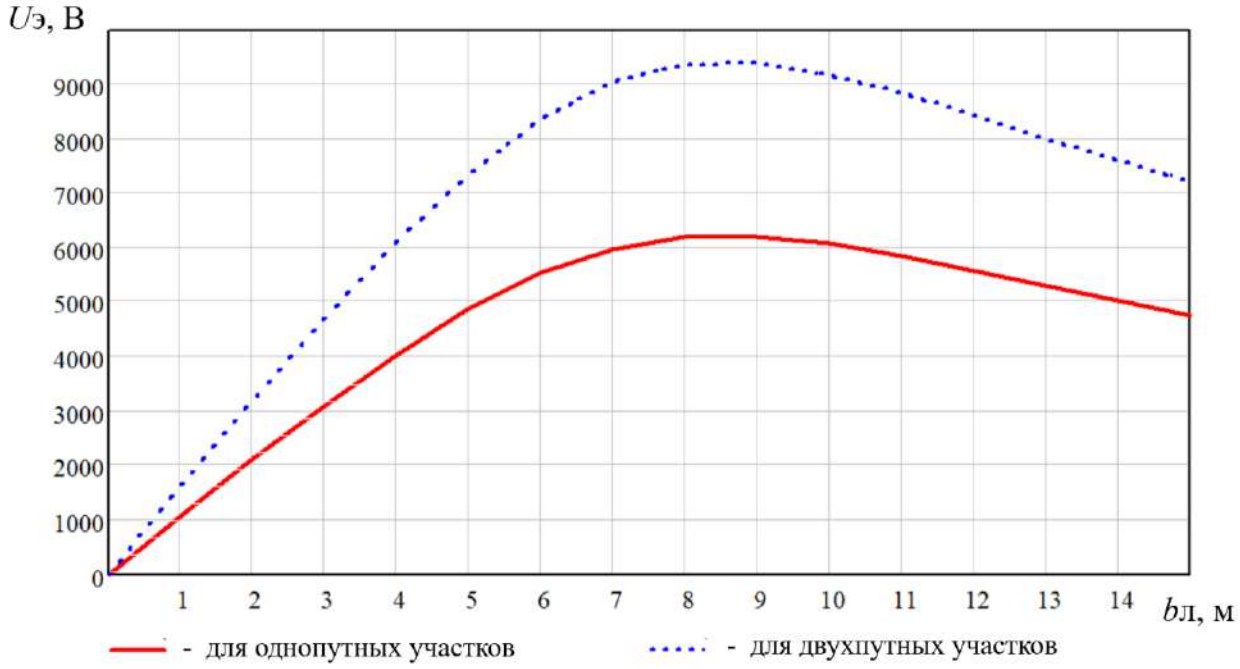
Таким образом, видно, что при ширине сближения провода с контактной сетью равной 5 метров, электрическое влияние на провод достигает 3072 В и 4654 В для однопутного и двухпутного участка соответственно. Затем при увеличении ширины до двадцати пяти метров электрическое влияние сильно падает - до 335 и 508 В соответственно. И при удалении провода до 200 метров электрическое влияние плавно снижается до незначительных значений.

В таблице 1.2 приведены расчеты электрических влияний для однопутного и двухпутного участков при изменении высоты подвеса провода линии $b_л$ в пределах от 3 до 12. При этом м ширина сближения провода линии с контактной сетью *a* составляет 3 метра.

Таблица 1.2 - Расчетные данные электрического влияния от выбора высоты подвеса провода линии $b_л$ для однопутного и двухпутного участка железной дороги

Параметры контактной сети					Расчетные данные				
Uк, В	Bк, м	$ln(2b_к/\rho_к)$ для однопутного участка	$ln(2b_к/\rho_к)$ для двухпутного участка	a, м	D, м	d, м	$b_л$, м	Uэ.однопут, В	Uэ.двухпут, В
27500	8	5	3,3	3	11,1	6,4	3	3072,2	4654,8
					12,9	5,4	5	4846	7342,4
					14,8	5	7	5968,1	9042,5
					16,7	5,4	9	6196,6	9388,7
					18,6	6,4	11	5831,6	8835,8
					20,5	7,9	13	5282,4	8003,6
					22,5	9,5	15	4744,3	7188,3

На рисунке 1.8 представлены зависимости электрического влияния от выбора высоты подвеса провода линии $b_л$ для однопутного и двухпутного участка железной дороги на одиночный провод изолированной от земли воздушной линии.



Uэ – напряжение при электрическом влиянии, $b_л$ - высота подвеса провода линии

Рисунок 1.8 - Зависимость электрических влияний от выбора высоты подвеса провода линии $b_л$ для однопутного и двухпутного участков тяговой сети переменного тока

При выборе высоты подвеса провода происходит увеличение электрического влияния до высоты подвеса эквивалента контактной сети, принятой 8 метров. Затем влияние уменьшается при удалении провода от эквивалента контактной сети.

1.4 Существующие методы борьбы с негативным электромагнитным влиянием

Крайне важно обеспечить качественное электроснабжение, а это, в первую очередь, стабильность и надежность напряжения в системе электроснабжения. Надежность электропитания во многом зависит от надежности проводов ЛЭП и правильного их выбора.

Качество напряжения в энергосистемах зависит от множества противоречивых условий. Потребляемая мощность не является постоянной величиной, а имеет четко выраженные максимальные и минимальные значения в

течение годового и дневного периода времени. Вместе с этим происходят изменения в способах производства и передачи электроэнергии по линиям. Линии электропередачи представляют собой сложные электромагнитные системы, которые не только передают активную мощность, но и генерируют или потребляют реактивную мощность в зависимости от режима передачи. Когда натуральная мощность передается по линии, ее электромагнитное поле полностью компенсируется: линия не генерирует и не потребляет реактивную мощность. Линии генерируют избыточную реактивную мощность, когда электроэнергии передается меньше натурального значения.

Когда не происходит компенсации электрического поля магнитным, то происходит производство реактивной мощности, достигающее максимальных значений. Такой режим работы соответствует холостому ходу электрической линии. По мере увеличения нагрузки (мощности, передаваемой по линии), ток в линии увеличивается и, соответственно, происходит компенсация части электрического поля линии за счет существенного увеличения магнитного поля. Когда по линии передается натуральная мощность, то ее электрическое и магнитное поля имеют одинаковую силу, что обеспечивает компенсацию друг друга. Когда передаваемая мощность превышает значения натуральной, то мощность магнитного поля линии превышает значения мощности электрического поля. В такой момент линия становится потребителем реактивной мощности, подобно реактору. Чем больше отношение передаваемой мощности к натуральной, тем больше реактивной мощности поглощается линией.

Данная особенность ЛЭП чрезвычайно затрудняет управление энергосистемами. Реактивная мощность, вырабатываемая линией, должна поглощаться энергосистемой (генератором, реактором), а потребляемая линией реактивная мощность должна компенсироваться энергосистемой.

Оборудование для потребления и выработки реактивной мощности размещается в отдельных блоках, что определяет реактивный ток, протекающий к ним по линиям, вызывающий колебания напряжения в сети, превышающие допуск по качеству напряжения. Напряжение в энергосистеме возрастает, когда

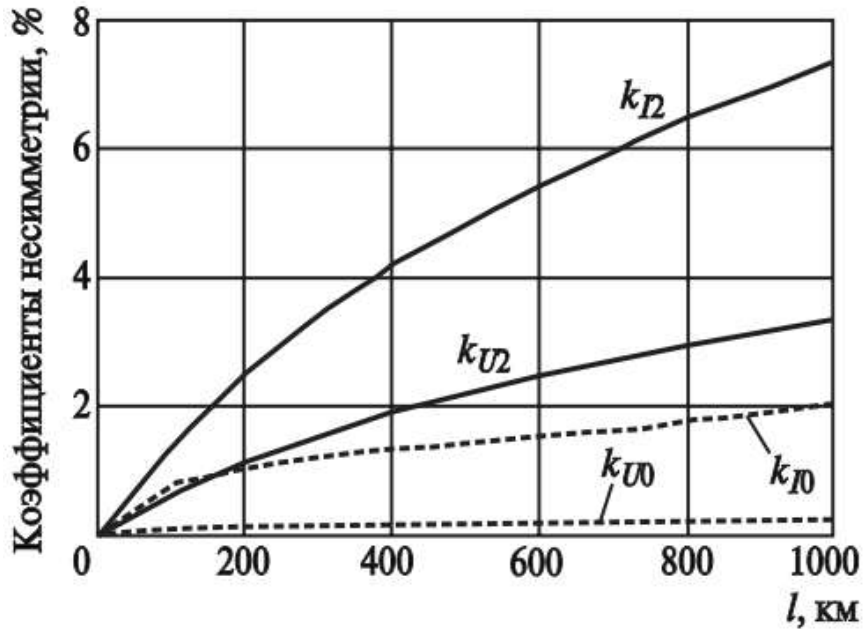
реактивный ток обладает емкостным характером (режим малой нагрузки). Снижается напряжение, когда реактивный ток принимает индуктивных характер (режим максимальной нагрузки). Целью проектирования и эксплуатации является минимизация этих колебаний напряжения. В настоящее время во всем мире весьма заметны проблемы стабильности напряжения, особенно в странах с обширными территориями, когда межузловая длина линии превышает 300 километров [4].

Длинные ВЛ переменного тока часто изготавливаются с переставленными фазными проводами – транспозицией (ТП), чтобы уменьшить ток, наводимый в соседних цепях [5].

Основной причиной несимметрии тока и напряжения в нормальном режиме работы электрической системы являются отличия электрических параметров линии в каждой фазе. Несимметрия параметров ВЛ обусловлена их конструкционными особенностями. Особое внимание необходимо уделять вопросам несимметрии при строительстве линий сверхвысокого и ультравысокого напряжения, поскольку длина некоторых участков может достигать 500-1000 км. На обычных линиях обычно применяют одноцепные опоры с горизонтальными фазами. Чтобы ограничить эту несимметрию, часто используют транспозицию как простой, надежный и одновременно эффективный метод [6]. Транспозиция фазовых проводов, т.е. циклическое изменение их взаимного положения, приводит к симметрированию продольного и поперечного сопротивлений по всей линии. Симметрии параметров линии можно добиться и за счет конструктивного увеличения высоты подвеса промежуточной фазы по сравнению с внешними фазами, т.е. имея расположение фазных проводов в виде треугольника.

Так в статье [7] был рассчитан коэффициент несимметрии обычных трехфазных ВЛ 750 кВ без ТП. На рисунке 1.9 показан вариант с горизонтальными фазными линиями при расстоянии D = 17 м между фазами, который показывает, что с увеличением длины линии коэффициент несимметрии существенно возрастает, при этом по обратной последовательности это выражено сильнее. Так, для реальной длины линии 400–600 км коэффициенты несимметрии по току

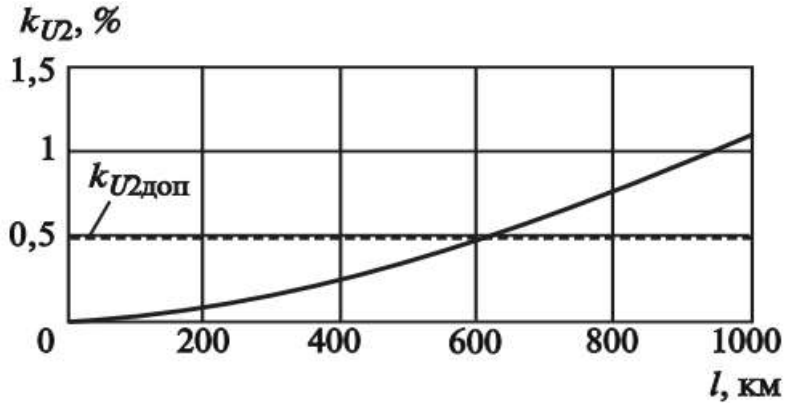
обратной последовательности k_{I2} находятся в диапазоне от 4,2 до 5,4%, а по напряжению обратной последовательности k_{U2} — от 1,9 до 2,5%.



k_{I0} – коэффициент тока нулевой последовательности [%], k_{U0} – коэффициент напряжения нулевой последовательности [%], k_{I2} – коэффициент тока обратной последовательности [%], k_{U2} - коэффициент напряжения обратной последовательности [%]; l – длина ВЛ электроснабжения [км]

Рисунок 1.9 - Зависимость коэффициентов несимметрии от длины линии для обычной ВЛ 750 кВ без циклов ТП

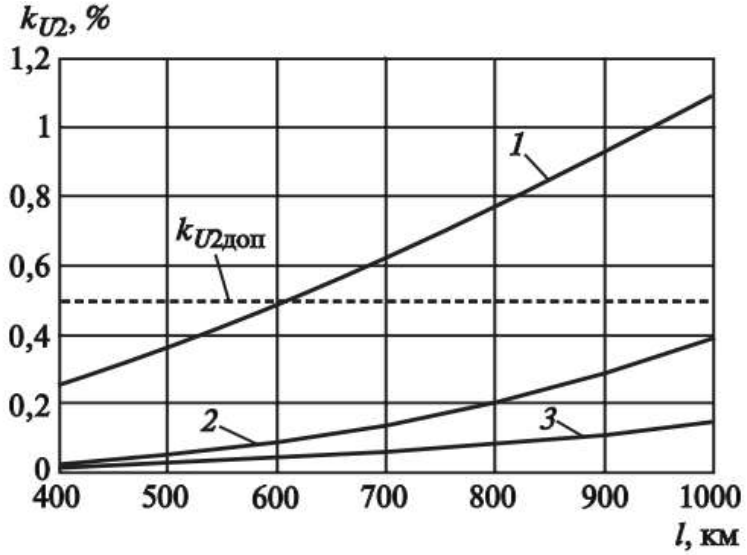
Допустимые значения коэффициента несимметрии напряжения обратной последовательности и коэффициента несимметрии напряжения нулевой последовательности шин распределительного устройства нормируются в пределах 2 % [8]. Кроме того, при добавлении циклов ТП коэффициент несимметрии существенно снижается (рисунок 1.10).



$k_{U2доп}$ – допустимый коэффициент напряжения обратной последовательности,
k_{U2} - коэффициент напряжения обратной последовательности;
l – длина ВЛ электроснабжения

Рисунок 1.10 - Зависимость коэффициента несимметрии по напряжению обратной последовательности от длины линии для обычной ВЛ 750 кВ с одним циклом ТП

Результаты расчета коэффициента несимметрии линии с двумя транспонированными циклами приведены также в работе [7] (рисунок 1.11).



$k_{U2доп}$ – допустимый коэффициент напряжения обратной последовательности,
k_{U2} - коэффициент напряжения обратной последовательности,
l – длина ВЛ электроснабжения;
1- один равномерный цикл ТП, 2 – два равномерных цикла,
3 – неравномерный цикл;

Рисунок 1.11 - Зависимость снижения коэффициентов несимметрии от цикла ТП

Очевидно, что замена проводов необходима для уменьшения несимметрии проводов ВЛ переменного тока.

Асимметричное расположение фазных проводов относительно друг друга определяет различия в индуктивности и емкости разных фаз. Благодаря специальным опорам проводят ТП проводов-фаз, чтобы реактивные параметры по фазам выравнивались и главным образом обеспечивалась симметрия трехфазной системы. В ходе полного цикла ТП каждая фаза последовательно занимает положение всех трех проводов на кронштейне опоры равномерно по длине электрической линии (рисунок 1.12).

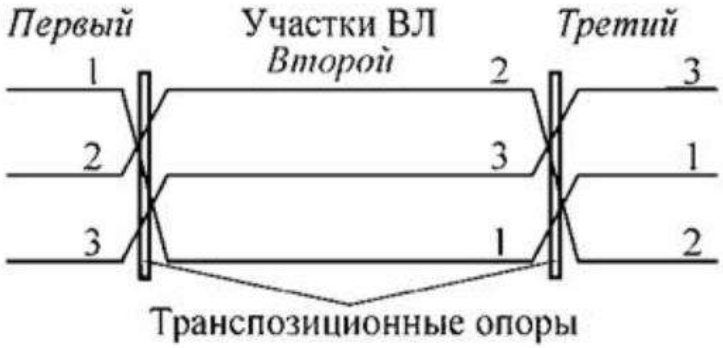


Рисунок 1.12 – Схема ТП

При изменении межфазного расстояния ЛЭП также изменяются индуктивность и емкость, и, соответственно, волновое сопротивление линии.

Можно заметить, что целью перестановки фаз ВЛ является:

• выравнивание индуктивности и емкости отдельных фаз;

• уменьшение взаимодействие между линиями и КС;

• уменьшение воздействия на соседние параллельные ВЛ связи.

Кроме того, в работе [9] описано влияние переменных электромагнитных полей на воздушные трехфазные ЛЭП, питающие линии автоматической блокировки, причем влияние более очевидно на линиях, проложенных на опорах КС. В данной статье авторы рекомендуют в начале линии между каждой фазой и землей установить конденсатор *C*, наличие которого должно уменьшить несимметричное напряжение.

1.5 Выводы по разделу 1

1 Проведенные расчеты напряжения смещения фаз показывают актуальность проблемы негативного электромагнитного влияния.

2 Единое электромагнитное поле, образующееся вокруг контактного провода, индуцирует в смежной линии напряжения и токи. Это влияние является причиной несимметрии электрических параметров в фазах-проводах.

3 В ходе исследования электрических влияний тяговой сети переменного тока 27,5 кВ на воздушную линию было установлено, что одно из решений проблемы негативного электромагнитного влияния состоит в увеличении расстояния между контактным проводом и воздушной линией продольного электроснабжения.

4 Для выравнивания индуктивностей и емкостей отдельных фаз, уменьшения взаимного влияния между линией и контактной сетью, уменьшения влияния на соседние параллельные воздушные линии используется транспозиция проводов – взаимное перекручивание фазных проводов.

2 МОНТАЖ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

2.1 Проблематика традиционного метода монтажа проводов воздушных линий. Технология монтажных работ и применяемого оборудования при существующих методах монтажа транспозиционной геометрии проводов

ВЛ делятся на три категории в зависимости от назначения подвесной цепи. К I категории относятся линии связи с подвесными цепями, соединяющие между собой организационно-структурные подразделения ОАО РЖД; II категория - линии, несущие цепи, соединяющие различные участки, а также линии, подвешивающие участковые связи; к III категории - местные (станционные) линии связи.

В зависимости от интенсивности гололедных отложений на проводах воздушных линий связи эти линии строят четырех типов: О - облегченный, Н - нормальный, У - усиленный и ОУ - особо усиленный. Линии типа О строят в негололедных и слабогололедных районах, где эквивалентная толщина стенки льда на проводе не превышает 5 мм. В районах со средней интенсивностью гололеда, где эквивалентная толщина стенки льда может увеличиться до 10 мм, строят линии типа Н. В сильногололедных районах, где эквивалентная толщина стенки льда достигает 15 мм, строят линии типа У, а где эквивалентная толщина стенки льда достигает 20 мм и более - линии типа ОУ.

В зависимости от интенсивности наледи на проводах ВЛ связи эти линии в свою очередь делятся на четыре типа: О - облегченные, Н - обычные, У - усиленные и ОУ - особо усиленные.

Воздушные линии, используемые для автоматики, телемеханики и связи, состоят из стальных, медных или биметаллических неизолированных проводов, подвешенных к деревянным или железобетонным опорам, по которым передаются электрические сигналы.

К воздушным линиям относятся высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП), высоковольтно-сигнальные линии СЦБ и линии связи.

К воздушным высоковольтным сигнальным линиям для питания перегонных и станционных устройств подвешиваются проводники трехфазной силовой цепи с линейным напряжением 10 кВ (ранее применялось напряжение 6 кВ). Кроме проводов силовой цепи на кронштейнах высоковольтных сигнальных линий подвешиваются также сигнальные провода.

На ВЛ связи подсоединяют большое количество других проводов: магистральной связи; дорожной и участковой телефонно-телеграфной связи; провода местной связи; провода автоматической и полуавтоматической блокировки; провода диспетчерской централизации; провода диспетчерского контроля; провода телеуправления тяговыми подстанциями и др. На работу ВЛ влияют метеорологические и климатические условия, местность расположения линии, интенсивность грозовой активности, сеть ЛЭП и тяговых дорог. Наибольшее воздействие оказывают лед, изморозь и ветер.

Продольное электроснабжение (ВЛ ПЭ) – это трехфазная линия, расположенная на опорах контактной сети для питания нетяговых потребителей и являющаяся резервной для питания сигнальных точек автоблокировки. К нетяговым потребителям относятся железнодорожные потребители, расположенные вдоль железных дорог и на небольших станциях. К районным потребителям относятся небольшие заводы, поселки фермерские хозяйства и т. д.

ВЛ АБ – это 3-хфазная воздушная линия, расположенная на отдельно стоящих опорах и предназначенная для питания сигнальных точек автоблокировки (светофоров).

Для электроснабжения устройств СЦБ могут применяться одноцепные и двухцепные ВЛ АБ, ВЛ ПЭ. Двухцепные линии ВЛ АБ и ВЛ ПЭ должны быть разделены при реконструкции высоковольтных линий.

Одноцепные линии ВЛ АБ предназначены только для основного электроснабжения устройств СЦБ.

Одноцепные линии ВЛ ПЭ предназначены для резервного электроснабжения устройств СЦБ, а также для электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта в соответствии с установленной ОАО «РЖД» категорией.

На двухцепных линиях одна цепь ВЛ АБ используется только для основного электроснабжения устройств СЦБ, а другая цепь ВЛ ПЭ – для резервного электроснабжения устройств СЦБ, а также для электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта в соответствии с установленной ОАО «РЖД» категорией.

При строительстве объекта ЛЭП напряжением 10 кВ для соблюдения условий выполнения большого объема монтажных работ создаются технологические карты, в которых прописывают правила устройства ВЛ.

Перед началом монтажа проводов ответственное лицо должно осмотреть участок, чтобы определить готовность для выполнения работ. В этот момент проходят проверку установленные опоры, очистка трассы от деревьев, качество фундаментов, наличие дополнительных инструментов для крепления изоляторов.

После успешной проверки и получения разрешений на проведение работ приступают к очистке монтажной полосы, распределению изоляторов, проводов, арматуры. Линейную арматуру возможно собирать как непосредственно на месте, так и на производстве с последующей доставкой к месту монтажа.

При вторичной проверке перед монтажом изоляторы с существенными повреждениями (сколы, трещины, царапины) записывают в бракованные. Линейную арматуру проверяют аналогичным способом. Арматуру, которая успешно прошла проверку, подвешивают и поднимают с помощью ролика и закрепляют на опоре.

На данный момент раскатка проводов проводится ручным методом, в местах, где возможно применение машин и механизмов, применяются раскаточные тележки. Последовательность выглядит следующим образом:

– снимается обшивка барабана, удаляются гвозди, проводится осмотр проводов, проводят установку металлических втулок в барабан;

– происходит установка на раскаточное устройство барабана с проводом с выходом сверху;

– соединение устройства для раскатки с механизмом тяжения;

– барабаны должны иметь возможность свободного вращения, трактор со свободно вращающимися барабанами перемещается на расстояние 15-20 м от анкерной опоры;

– на анкерную опору проводят крепление конечных частей проводов;

– проводят раскатку проводов;

– при окончании провода в барабане проводят его демонтаж с раскатного устройства;

– на анкерную опору проводят крепление конечных частей проводов;

– проводят раскатку проводов;

– при окончании провода в барабане проводят его демонтаж с раскатного устройства;

Для протягивания проводов через реки используют синтетический канат, который выступает лидер-тросом, который перетягивают на другую сторону реки ручным методом по льду. Работы разрешено проводить при достижении отрицательных температур минус 10-15 °*C*.

После внимательного изучения витков провода на наличие повреждений проводят крепление с трактором. Затем водитель плавно и без рывков должен двигаться вдоль трассы ВЛ, при этом соблюдая зигзагообразный путь. Во время раскатки провода фиксируются его повреждения, следят за перехлёстыванием, в случае которого необходимо остановить монтажный процесс и устранить проблему, что в конечном итоге ведет к повышению временных затрат.

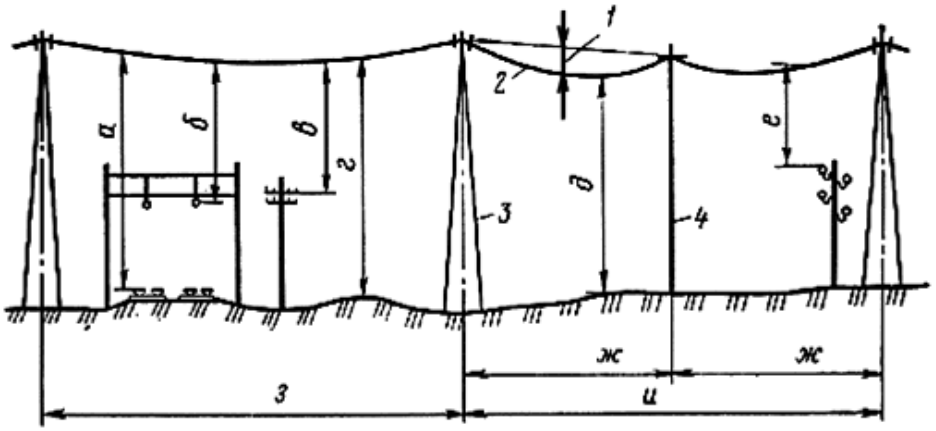
Последние витки необходимо раскатывать только ручным методом. В анкерных опорах соединение проводится с помощью обжима, опрессовки, скрутки, так как при горячей обработке снижается прочность.

Опоры ВЛ в зависимости от способа подвески делятся на:

- промежуточные опоры;

- анкерные опоры.

Анкерные опоры необходимы для натяжения проводов. Промежуток между опорами ЛЭП – пролет – на анкерных опорах называется анкерованным участком (рисунок 2.1)



а, б, в, г - расстояния от провода ЛЭП соответственно до головки рельса, провода контактной сети, провода линии связи и до автодороги; д - наименьшее расстояние от провода ЛЭП до земли в пролете; е - расстояние от провода ЛЭП до провода напряжением 0,4 кВ; ж - промежуточный пролет; з - переходный анкерный пролет; и - анкерный пролет или анкерный участок; 1 - стрела провеса; 2 - провод; 3 - анкерная опора; 4 - промежуточная опора

Рисунок 2.1 - Пролеты ЛЭП

Для соединения проводов между собой, независимо от метода, необходимо тщательно подготовить место контакта.

Провода на опоры поднимаются с помощью телескопических автовышек. Также используется ручной метод с помощью веревки и блока. При использовании автовышки один рабочий находится в корзине, а второй на земле, для контроля свисающего провода. После успешного поднятия провода на опору автовышка передвигается к следующей опоре. На анкерной опоре провод закрепляют в гирлянду изоляторов, а на промежуточной опоре монтируют на вращающихся роликах.

Следующим этапом является визирование, натяжение и закрепление проводов по следующей последовательности:

- установка визирных реек на опоры;

- крепление провода к тяговому механизму;

- проведение натяжения провода до необходимой стрелы провеса;

- закрепление провода на последней анкерной опоре и последующее снятие раскаточного ролика;

- демонтаж тягового механизма и визирных реек;

- закрепление проводов на промежуточных опорах и снятие вращающихся роликов с них.

Фактическое провисание провода не должен отличаться более чем на ±5 % от расчетного значения с учетом соблюдаемых размеров до земли и пересекающихся объектов [2].

Технологической картой предусмотрено выполнение работ комплексным механизированным звеном в составе: портативная лебедка 2042 предназначена для раскатки изолированных и голых проводов, имеет задний ход и удерживает постоянное натяжение провода после остановки (сила натяжения - макс 400 кг; скорость - 1100 м/мин; двигатель: бензиновый, 4-тактный N = 5,5 л.с.); подъемный блок QHN2-3 номинальная нагрузка 20 кН, 100 мм, ширина 31 мм, вес 3,7 кг; автогидроподъемник АГП-22 на базе автомобиля Урал-4320 (вылет стрелы = 9,0 м, грузоподъемность Q = 300 кг, высота подъема =22,0 м); раскаточное устройство РУ-02М с ленточным тормозом, грузоподъемность Q = 40 кН, масса m = 260 кг, усилие торможения 0,53 кН.

Для проведения монтажных работ понадобится следующая техника: трактор, автокран, устройство для раскатки проводов, роликовое раскаточное устройство, ролики монтажные, временный якорь.

2.2 Решение проблемы традиционного метода монтажа проводов воздушных линий

2.2.1 Автоматизация ручного труда

В настоящее время технологии автоматизации рабочих процессов широко распространены во многих отраслях производства и промышленности, а те отрасли, где они не распространены, их внедрение имеет наибольший приоритет в развитии [10]. На данный момент большое количество работ на железной дороге выполняются ручным и монотонным методом. В некоторых областях его смогли заменить автоматизированными системами, в других только ведутся работы.

Так, например, на станциях «Владимир» на Горьковской железной дороге и «Иньская» на Западно-Сибирской железной дороге уже обладают элементами автоматизации, такими как системами мониторинга силовых трансформаторов, ячеек комплектных распределительных устройств КРУ-10, оперативных цепей [11,12]. Дополняя эти системы, в статье [13] предлагается идея автоматического диспетчерского управления и сбора данных для тяговых подстанций на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД), которое имеет название *SCADA*-система. Такое решение должно привести к более высокому уровню безопасности при производстве работ в электроустановках, а также и на оптимизацию технологического процесса, что в свою очередь позволит существенно сократить время на принятие решения и даст возможность выявлять в работе дорогостоящего оборудования нарушения на более ранних этапах их возникновения. К тому же тяговые подстанции на основе *SCADA*-системы не требует постоянного присутствия обслуживающего персонала. Соответственно будет снижение расходов на эксплуатацию. Поэтому можно считать, что в перспективе внедрение *SCADA*-системы на тяговые подстанции ВСЖД целесообразно.

В свою очередь на подвижном составе автоматическое управление было интегрировано более 60 лет назад и за это время претерпело несколько стадий, которые отличаются степенью влияния человека на процесс управления. Так, Сиднейский метрополитен в Австралии — это система быстрого транзита без водителя, которая использует полностью автоматизированные поезда, а железнорудные железные дороги Рио-Тинто были полностью автоматизированы, что позволило поездам работать с *GoA*4. *GoA*4 – это одна из стадий развития автоматического управления подвижными составами, в которой запуск и остановка, открывание дверей и устранение аварийных ситуаций полностью автоматизированы без участия персонала поезда. При этом все управление происходит удаленно [14].

Чешские железные дороги работают с полуавтоматическим управлением поездами *GoA*2 (STO) с 1991 года, а в Великобритании *Thameslink* работает с *STO* поверх *ETCS* уровня 2 с 2019 года, с планами обновления до *GoA*4 [15].

В России для оптимизации перевозочного процесса активно проводят внедрение интеллектуальных систем в автоматическое управление [16, 17, 18].

Монтаж воздушных высоковольтных линий является частью строительных работ при возведении новых железнодорожных путей и ремонтных работ при проведении работ на уже построенных и эксплуатируемых линиях.

Безопасность труда работников строительной отрасли и защита их трудовых прав гарантируется законом. Поэтому организации должны разрабатывать и соблюдать все меры, обеспечивающие адекватную защиту работников, принимая во внимание конкретные риски в этой области. Однако строительные и ремонтные площадки были и остаются опасными местами для работы людей [19].

Железнодорожные работники сталкиваются с различными опасностями (падения, машины и механизмы, высокое напряжение), которые можно смягчить или исключить вовсе благодаря автоматизации технологических процессов, что способно повысить безопасность рабочей обстановки несколькими способами:

- *повышение безопасности машин и оборудования.*

Автоматизация и роботизация оборудования все сильнее распространяются на строительных площадках. Благодаря этому при выполнении рабочих операций повысились скорость, эффективность и безопасность. Механизмы подобного типа способны поднимать большие грузы, выполнять циклические монотонные операции, при этом сокращая объем физического труда. Важно отметить автоматизацию деятельности, которая связана с высоким риском, например, снос, строительство туннелей, работы, связанные с возможным обвалом земляного полотна.

Оборудование автоматизации должно проектироваться и производиться с учетом требований техники безопасности. Для соблюдения этого условия в этих оборудованиях используются датчики, звуковые и световые сигнальные точки, кнопки аварийной остановки. Целью этих дополнительных устройств является быстрое и своевременное реагирование на изменение окружающей среды, когда происходит отклонение от нормальных условий работы;

– *улучшенный сбор данных и мониторинг*.

При автоматизации рабочих процессов неотъемлемой частью является сбор статистических данных, который необходимо использовать для анализа выполняемого процесса как для оптимизации с целью повышения скорости и эффективности работы, так и для корректировки потенциально опасных зон и участков в режиме реального времени;

– *снижение влияния человеческого фактора*.

Во время выполнения монотонного однотипного рабочего процесса по заданному циклу внимание и концентрация работника снижается, повышается усталость, в результате чего сильно повышается вероятность возникновения несчастного случая или снижения качества выполняемых работ. Указанных недостатков лишена автоматизированная система, чье проектирование с самого начала учитывает безошибочного выполнение однотипных и монотонных работ определенного цикла.

Исследование многих аварий на железнодорожном транспорте показало, что в 60 годах ошибка человека составляла 20 % случаев от общего числа аварий. В конце 1990-х г. этот процент стал равен 80 % [20, 21].

Как обсуждалось в разделе I, монтаж воздушных линий 3 кВ и 10 кВ производится ручным методом с привлечением большого количества работников. Аналогом этих работ выступают монтажные работы по строительству воздушных линий электропередач напряжением 35 – 110 кВ. В статье [22] описывается мобильный монтажный комплекс для натяжения проводов на ЛЭП с динамическим изменением скорости, что в итоге приводит к увеличению итоговой скорости работы, уменьшению времени работ, а также к достижению оптимальных характеристик провода, таких как усилие тяжения, натяг, длина протяжки. Все необходимые параметры для комплекса рассчитываются пакетом программ в соответствии от выбранного провода или кабеля по характеристикам из технического паспорта.

Автоматизация монтажа проводов воздушной высоковольтной линии, который на сегодняшний день ведется высокозатратным ручным трудом, является очевидным способом для повышения эффективности монтажных работ и в то же время решением существующих проблем. Проводимая в указанном направлении исследовательская работа была и по сей день остается актуальной сразу по нескольким причинам: во-первых, снижается влияния человеческого фактора на различные проводимые работы, что положительно сказывается на их безопасности и качестве, во-вторых, благодаря автоматическому режиму выполнения заложенной задачи, несоизмеримо возрастает скорость выполнения всех рабочих процессов, в-третьих, снизиться стоимость монтажных работ, так как одновременно с уменьшением времени, необходимого на их производство, уменьшиться и количество обслуживающего персонала.

2.2.2 Существующие методы теории автоматического регулирования, применимые для создания механизированного комплекса

Для реализации планов по повышению безопасности на производствах активно внедряют современные системы управления (СУ), которые подразделяются на:

- автоматизированные (при участии человека);
- автоматические (работающие без человека).

По работе [23] дается определение основных этапов процесса автоматического управления:

- постановка задачи;
- получения информации о результате управления;
- проведение анализа полученной информации;
- расчет и выбор решения для воздействия на объект.

Для реализации Процесса Управления СУ должна иметь (рисунок 2.2):

- источники информации о задаче управления;
- источники информации о результатах управления (различные датчики, измерительные устройства, детекторы и т.д.);
- устройства для анализа получаемой информации и выработки решения;
- исполнительные устройства, воздействующие на Объект Управления, содержащие: регулятор, двигатели, усилительно-преобразующие устройства и т.д.
- СУ будет называться системой автоматического управления (САУ) если она выполняет свою функцию без участия человека. Если участие оператора необходимо, то такая система будет называться автоматизированной СУ.

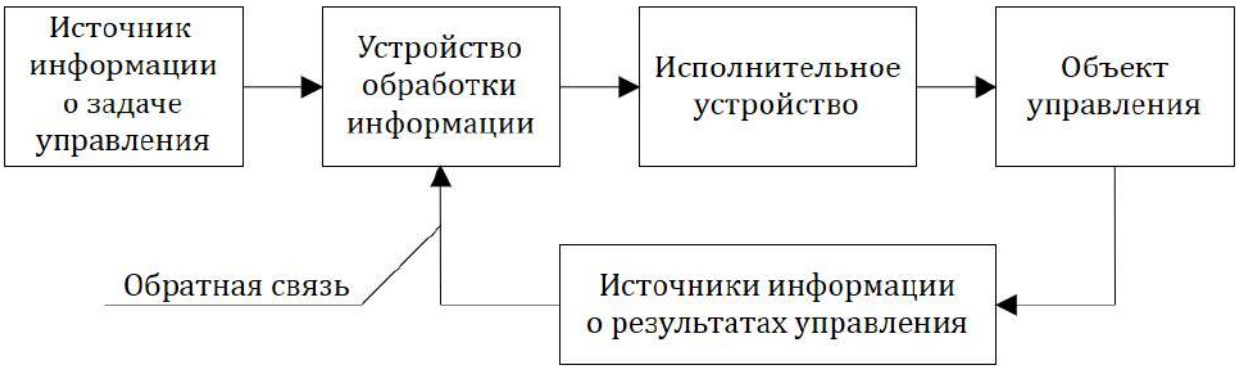


Рисунок 2.2 — Структурная схема управления

Управление, которое осуществляется по заданному закону во времени, не завися от выходных данных, называется управлением по разомкнутому циклу, которое применяется на промышленных автоматах (конвейеры, роторные линии), станки с числовым программным управлением (рисунок 2.3). При этом управление называется программным.

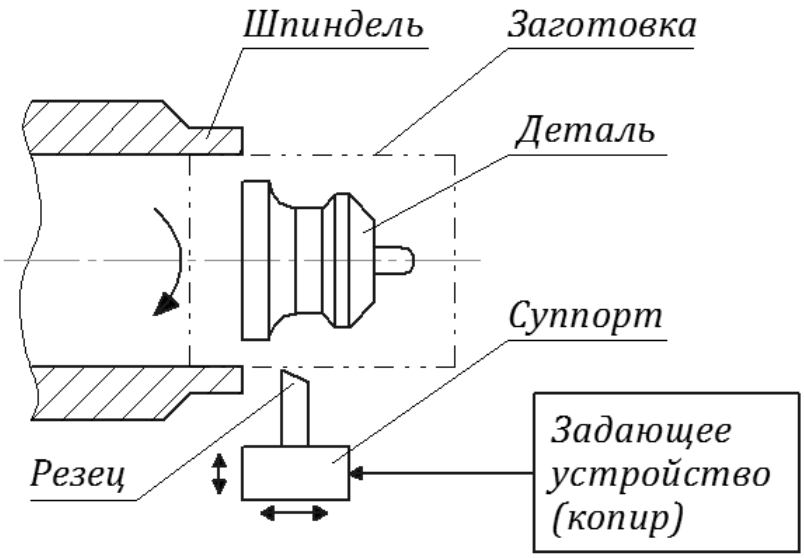


Рисунок 2.3 — Схематичное изображение установки с программным управлением

Копирующее устройство может выступать задающим устройством, так как отсутствуют контролирующие результат датчики. В случае поломки, например,

резца цель не будет достигнута. В подобных системах обычно контролируют только соответствие эталонным размерам.

Автоматические СУ разделяют на 3 типа [24]:

- системы автоматического управления (САУ);
- системы автоматического регулирования (САР);
- следящие системы (СС).

САР сохраняет какую-то физическую величину постоянной во времени и являются самым распространенным типом систем автоматического управления.

Часто целую систему заменяют наборами звеньев, которые соединены в структуры. В теории Управления Техническими Системам используют 2 основных способа представления звеньев систем управления:

— в переменных “вход-выход”;

— в переменных состояния.

Система «вход-выход» обычно используется для простых систем, у которых по одному «входу» и «выходу» (рисунок 2.4).

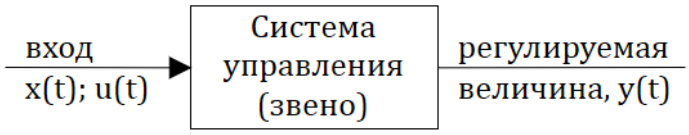


Рисунок 2.4 – Схематическое представление простой СУ

В последнее время представление переменных состояния получило широкое распространение, особенно для технически сложных систем, в том числе многомерных систем автоматического управления. На рисунок 2.5 приведено схематичное представление многомерной системы автоматического управления, где $u_1(t)…u_m(t)$ — управляющие воздействия (вектор управления), $y_1(t)…y_p(t)$ — регулируемые параметры САУ (вектор выхода).

Рисунок 2.5 — Схематическое представление многомерной СУ

При более детальном рассмотрении структуры САУ, которая строится в виде переменной «вход-выход» и имеет один вход (воздействие) и один выход (выходная переменная), предполагается, что структурная схема такой САУ состоит из определенного количества звеньев. Структурную схему САУ можно упростить до вида на рисунке 2.6, если проводить принципиальную группировку звеньев [24].

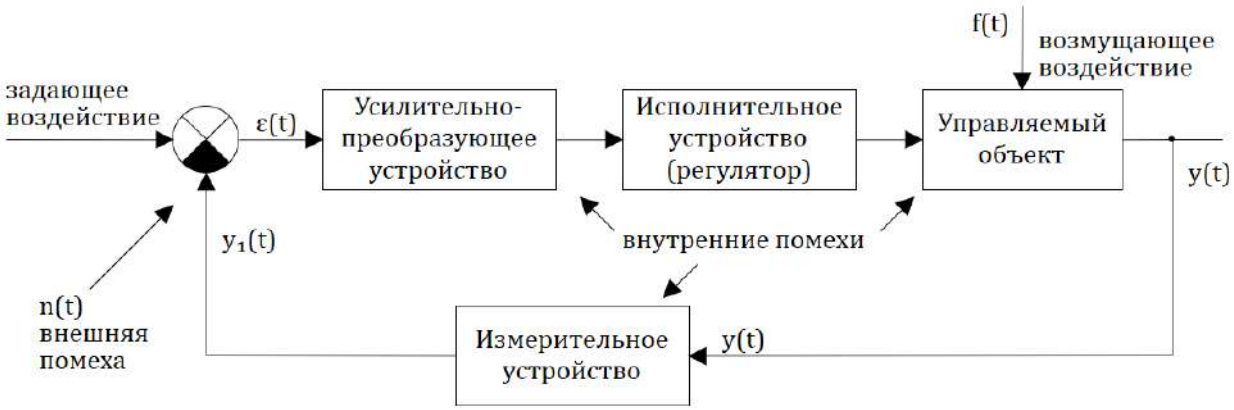


Рисунок 2.6 — Структурная схема САУ

Переменная ***ε(t)*** отвечает за ошибку на выходе устройства сравнения, которое может работать по принципу простых операций сложения и по сложным процедурам.

Так как регулируемый параметр САУ от первой внешней помехи равен

$$y_1(t) = y(t)*k_1, \qquad (2.1)$$

где k_1 — коэффициент усиления, то

$$\varepsilon(t) = x(t) - y_1(t) = x(t) - k_1 * y(t). \quad (2.2)$$

Задача СУ состоит в снижении ошибки, появляющейся из-за расхождения входного и выходного сигналов, т.е. $\varepsilon(t)$, т.е. ==> $\varepsilon(t) \rightarrow 0$.

СУ воспринимает внешние воздействия и внутренние помехи. При этом помехи имеет случайный характер. Для обозначения входного воздействия необходимо использовать либо $x(t)$, либо $u(t)$.

Если усилительно-преобразующее устройство (УПУ) выполняет только усиление (или ослабление) сигнала рассогласования $\varepsilon(t)$, а именно

$$\varepsilon_1(t) = \alpha \cdot \varepsilon(t), \quad (2.3)$$

где α – коэффициент пропорциональности (в частном случае α = Const), то такой режим управления замкнутой САУ называется режимом пропорционального управления (П-управление) [25].

Если УПУ выполняет формирование выходного сигнала $\varepsilon_1(t)$, пропорционального ошибке $\varepsilon(t)$ и интегралу от $\varepsilon(t)$, т.е.

$$\int_0^t \varepsilon(t)dt, \quad (2.4)$$

то такой режим управления называется пропорционально-интегрирующим (ПИ-управление).

$$\varepsilon_1(t) = \alpha \cdot \varepsilon(t) + b \cdot \int_0^t \varepsilon(t)dt, \quad (2.5)$$

где b – коэффициент пропорциональности (в частном случае $b = Const$).

Обычно ПИ-управление используется для повышения точности управления (регулирования) [26].

Если УПУ формирует выходной сигнал $\varepsilon_1(t)$, пропорциональный ошибке $\varepsilon(t)$ и ее производной, то такой режим называется пропорционально-дифференцирующим (ПД-управление)

$$\varepsilon_1(t) = \alpha \cdot \varepsilon(t) + c \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

Для повышения быстродействия САУ используют ПД-управление.

Если УПУ формирует выходной сигнал $\varepsilon_1(t)$, пропорциональный ошибке $\varepsilon(t)$, ее производной, и интегралу от ошибки

$$\varepsilon_1(t) = \alpha \cdot \varepsilon(t) + b \cdot \int_0^t \varepsilon(t)dt + c \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2.7)$$

то такой режим управления называется пропорционально-интегрально-дифференцирующим режимом управления (ПИД-управление).

ПИД-управление позволяет зачастую обеспечить “хорошую” точность управления при “хорошем” быстродействии [27].

2.3 Применение шестишаговой транспозиции для исключения электромагнитного влияния

Одна из важнейших проблем автоматизации связана с решением технически сложных задач, от которых зависит итоговый успех в разработке и эксплуатации систем электроснабжения, применяемых на сети железных дорог, что, в свою очередь, самым тесным образом связано с вопросами адаптации различных проводных систем к электромагнитному полю контактной сети железных дорог. Это положительно скажется на качестве электроэнергии и эксплуатационной работе железной дороги [28].

По примерам из раздела I видно, что проблема негативного электромагнитного влияния от контактной сети на ВЛ присутствует, что также подтверждает работа [1]. Предлагаемые решения по снижению влияний имеют недостатки.

В работе [29] авторы описывают математическую модель напряжений нулевой последовательности, возникающих в ВЛ электропередачи 6-10 кВ железнодорожного транспорта (ВЛ СЦБ, ВЛ АБ, ВЛ ПЭ) при их движении на коротком расстоянии от КС, иногда монтируемых на их опорах. Данное решение также рекомендует использовать на каждой фазе дополнительную емкость, которую каждый раз необходимо рассчитывать индивидуально.

Одним из самых распространенных решений проблемы негативного электромагнитного воздействия на прилегающую линию является существенное удаление ВЛ от КС. Но в таких местах, как тоннели, горные районы, поймы рек, районы вечной мерзлоты и плотно застроенные городские территории, установка ВЛ на независимых опорах либо невозможна, либо дорога и трудоемка.

Помимо всего прочего транспозиция ВЛ на сегодняшний день производится вручную с использованием вспомогательной техники, что приводит к неточности транспозиции и ее низкому качеству, а следовательно, и к снижению передаваемой электроэнергии.

В данной работе предлагается исключение возникновения несимметрии погонных электрических параметров от негативного электромагнитного воздействия на ВЛ от контактной сети с помощью устройства транспозиционной геометрии проводов ВЛ [30]. Это устройство подразумевает под собой исполнение той же транспозиции проводов ВЛ, но с важным изменением. Как описывается в [7] при транспозиции провода должны располагаться на вершинах равностороннего треугольника, чтобы выполнялась симметрия всех параметров цепи, в частности, электрического и магнитного влияний. Важным изменением новой методики является транспозиция в шесть шагов [31]. В этом случае транспозиция – взаимное изменение фазных проводов – должна проводиться каждый пролет на 60°, таким образом каждый провод сделает полный круг за 6

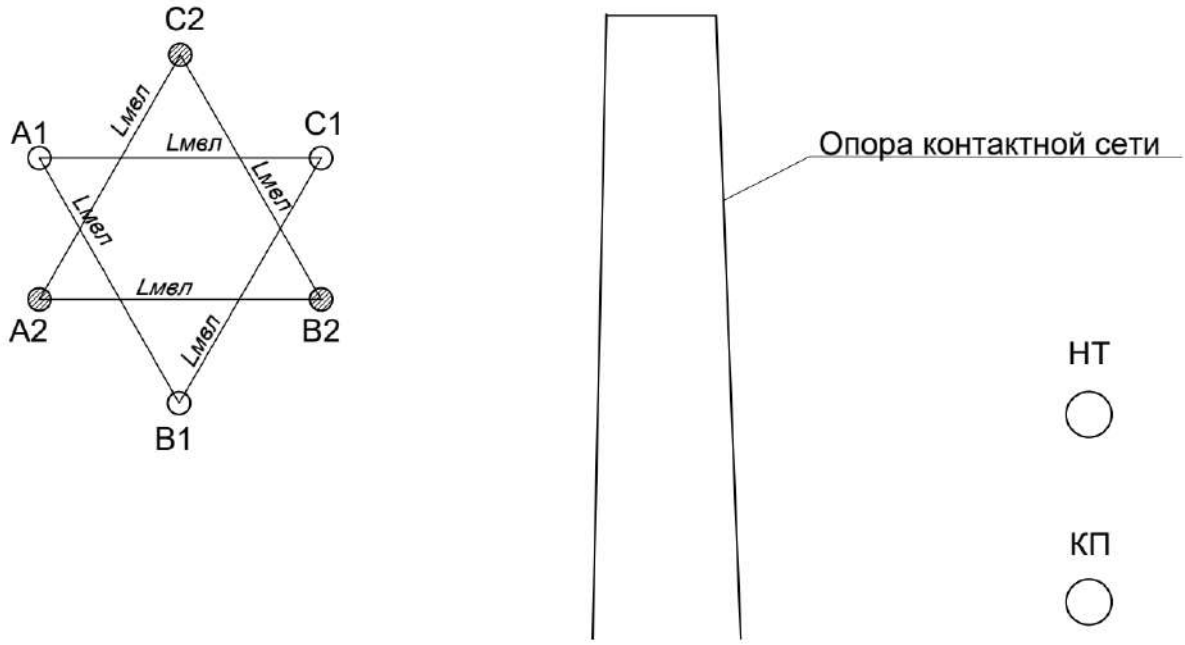
опор, что примерно равно 300 м. В то время как сегодня на ВЛ, проложенных на самостоятельных опорах, а также на опорах контактной сети, транспозицию проводов следует осуществлять через каждые 3 км при полном шаге транспозиции 9 км [32].

Благодаря небольшому повороту на каждой опоре, натяжение ВЛ будет постоянным на всей ее длине. Внепроектное провисание провода будет стремится к нулю и расстояние между фазными проводами ВЛ будет равноудаленным друг от друга на всей протяженности сети. Данное решение позволит исключить влияние фазных проводов на самих себя. Но при монтаже ВЛ на опорах контактной сети помимо данной проблемы решается основная – устройство транспозиции, сохраняя равносторонний треугольник фазных проводов, также позволяет сохранить одинаковое расстояние от контактного провода до каждого из фазных ВЛ [33]. Таким образом обеспечивается полная симметрия погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе (рисунок 2.7).

Аналогом для шестишаговой транспозиции является кабельная цепь, отдельные провода в которой перекручены между собой, то есть постоянно меняют свое местоположение в пространстве. Симметрирование погонных электрических параметров в основном выполняется в кабелях как связи, так и силовых [34]. Основным преимуществом симметричных кабельных трасс является уравнивание погонных электрических параметров. Однако существенным недостатком кабельных линий является их большая погонная емкость относительно ВЛ связи из-за меньшего расстояния между жилами кабеля. Этот недостаток влияет на переходный процесс коммутации, тем самым ограничивая длину непрерывных кабельных линий (длина непрерывных линий из кабеля не превышает 60 км).

Предлагаемое устройство транспозиционной геометрии проводов для снижения электромагнитного воздействия максимально использует все преимущества как воздушных, так и кабельных линий. То есть предлагаемое

устройство использует симметрию погонных электрических параметров кабелей, но с малой погонной емкостью, которой обладают воздушные проводные линии.



A1, B1, C1 – расположение проводов фаз *A, B, C* на нечетных опорах;
A2, B2, C2 – расположение проводов фаз *A, B, C* на четных опорах; НТ – несущий трос;
КП – контактный провод; *L*мвл – расстояние между проводами-фазами ВЛ

Рисунок 2.7 – Устройство транспозиционной геометрии проводов на опорах КС

В работе [35] описаны параметры симметричной цепи:

1 конструкция цепи в любом поперечном сечении имеет ось симметрии;

2 скрученные провода многократно меняются друг с другом местами по длине цепи, в результате чего каждый провод обладает одинаковыми погонными параметрами по отношению к земле и к другим проводам.

В случае с новой методикой натяжения проводов скрутка аналогична шестишаговой транспозиции с той разницей, что между проводами увеличено расстояние по сравнению с межпроводным расстоянием в кабельной линии.

Соответственно, устройство транспозиционной геометрии проводов позволит симметрировать ВЛ. Для подтверждения этого было проведено математическое моделирование.

В первую очередь был проведен расчет взаимной индуктивности контактного провода с каждым фазным проводов ВЛ на всех шести опорах, по которым происходит полный цикл транспозиции. Для расчета взаимной индуктивности по книге [3] необходимо использовать формулу

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi}(ln\ \frac{l}{h}\ -\ 1), \tag{2.8}$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi * 10^{-4}$ Гн/км; l – длина участка сближения ВЛ и контактного провода, км; h – половина расстояние между фазным проводом ВЛ и контактным проводом, км.

Величина, которая на основании закона Фарадея-Максвелла будет пропорциональна взаимной индуктивности M между проводами называется продольная ЭДС [36] и определяется по формуле

При этом суммарные взаимные индуктивности по каждой фазе за интервал равный полному циклу транспозиции равны между собой

$$M_{A\ \text{сумм}} = M_{B\ \text{сумм}} = M_{C\ \text{сумм}} = 11{,}67 * 10^{-5}\ \text{Гн}.$$

$$\dot{E}_M = -j\omega M\dot{I}l, \tag{2.9}$$

где ω – циклическая частота: $\omega = 2\pi f$, при частоте переменного тока f = 50 Гц: $\omega = 314\ c^{-1}$;

$\dot{I}$ – комплексное значение тока во влияющей цепи.

С помощью формул (2.8) и (2.9) были посчитаны взаимные индуктивности и суммарные продольные ЭДС для фаз *A, B, C* воздушной линии, которая находится под интенсивным влиянием контактной сети и смонтирована по новой технологии шестишаговой транспозиции. Данные расчетов занесены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Расчет взаимной индуктивности и продольной ЭДС при длине цикла транспонирования *l* = 300 м

№ пролета	Угол поворота фазного провода	Взаимная индуктивность *M*, Гн			Продольная ЭДС $\dot{E}_M$, В		
		Фаза *A*	Фаза *B*	Фаза *C*	Фаза *A*	Фаза *B*	Фаза *C*
1	0	$1{,}78*10^{-5}$	$1{,}95*10^{-5}$	$1{,}95*10^{-5}$	0,711	0,711	0,711
2	60	$1{,}86*10^{-5}$	$2{,}06*10^{-5}$	$2{,}06*10^{-5}$			
3	120	$1{,}95*10^{-5}$	$1{,}95*10^{-5}$	$1{,}78*10^{-5}$			
4	180	$2{,}06*10^{-5}$	$2{,}06*10^{-5}$	$1{,}86*10^{-5}$			
5	240	$1{,}95*10^{-5}$	$1{,}78*10^{-5}$	$1{,}95*10^{-5}$			
6	300	$2{,}06*10^{-5}$	$1{,}86*10^{-5}$	$2{,}06*10^{-5}$			

Благодаря этому в соответствии с формулой (2.9) равны между собой и продольные ЭДС $\dot{E}_M$.

Провода фаз *A, B, C* воздушной линии при новой методике монтажа находятся на вершинах равностороннего треугольника, который геометрически в пространстве расположен вершиной вверх на нечетных опорах и вершиной вниз на четных опорах. При сохранении равностороннего треугольника геометрии расположения проводов между фазами будет всегда сохраняться одинаковое расстояние. Соответственно, учитывая формулу (2.8) можно утверждать, что взаимная индуктивность фазных проводов *A, B, C* между собой будет одинаковой, так как переменная h не изменяется. Продольная ЭДС от взаимного влияния фазных проводов также уравняется.

Аналогично рассчитывается емкость *C* на единицу длины [3]

$$\mathrm{C} = \frac{\pi\varepsilon_{\mathrm{a}}}{\ln\frac{b}{r}},$$

где $\varepsilon_a = 8{,}85 * 10^{-12}$Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха [37];

b – высота подвеса провода;

$r = 4{,}8 * 10^{-3}$м – радиус провода ВЛ.

Данные расчетов занесены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 - Расчет емкости провод фаз *A, B, C* воздушной линии относительно земли при длине цикла транспонирования *l* = 300 м

№ пролета	Угол поворота фазного провода	Емкость *C*, Ф/м		
		Фаза *A*	Фаза *B*	Фаза *C*
1	0	$3{,}7*10^{-12}$	$3{,}76*10^{-12}$	$3{,}7*10^{-12}$
2	60	$3{,}74*10^{-12}$	$3{,}74*10^{-12}$	$3{,}68*10^{-12}$
3	120	$3{,}76*10^{-12}$	$3{,}7*10^{-12}$	$3{,}7*10^{-12}$
4	180	$3{,}74*10^{-12}$	$3{,}68*10^{-12}$	$3{,}74*10^{-12}$
5	240	$3{,}7*10^{-12}$	$3{,}7*10^{-12}$	$3{,}76*10^{-12}$
6	300	$3{,}68*10^{-12}$	$3{,}74*10^{-12}$	$3{,}74*10^{-12}$

Как можно заметить по таблице 2.2 значения емкости *C* по всем трем проводам-фазам *A, B, C* не достигают опасных величин за счет большой высоты подвеса над землей.

Выполнить полную симметрию проводов ВЛ на сегодняшний день без внесения серьезных изменений в процесс монтажа невозможно. Для этого необходимо воспользоваться устройством монтажа транспозиционной геометрии проводов [38], которое в свою очередь базируется на передвижной платформе и оснащено захватным устройством с функцией перемещения проводов для их монтажа на опорах в автоматизированном режиме. В совокупности данное устройство называется «Мобильный механизированный комплекс» [39].

2.4 Выводы по разделу 2

1 В ходе анализа методов монтирования воздушной линии было установлено, что в основном он ведется ручным методом. Присутствуют большие временные затраты на подготовку места, на раскатку проводов, на контролирование состояния провода. Для соблюдения всех условий необходимо от 7 до 11 работников монтажной бригады.

2 Автоматизация процесса ручного монтажа воздушной линии способна решить существующие проблемы и добавить новые элементы, повышающие качество монтажного процесса, а именно: повышение безопасности машин и оборудования, улучшенный сбор данных и мониторинг, снижение человеческого фактора.

3 Для решения проблемы несимметрии погонных электрических параметров негативного электромагнитного влияния КС переменного тока на ВЛ необходимо использовать ТП проводов с повышенной симметрией погонных электрических параметров, которую возможно достичь благодаря использованию ТП в шесть шагов.

4 Математическое моделирование подтвердило, что ТП нового типа снижает как взаимное влияние фазных проводов ВЛ друг на друга, так и влияние КС на смежную ВЛ ПЭ.

3 МОБИЛЬНЫЙ МЕХАНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС КАК СПОСОБ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ МОНТАЖА ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Как описывалось выше, воздушные линии обладают двумя основными проблемами: монтаж ручным или, в редких случаях, полуавтоматическим методом, а также негативное электромагнитное влияние контактной сети на симметрию погонных параметров данной линии.

В первом случае наблюдаются большие трудозатраты, низкую точность монтажа транспозиции, низкую скорость работы, большую вероятность ошибки и вандализма на участке строительства новых или ремонта старых путей в случае монтажа способом, когда провод находится большую часть времени на земляном полотне.

Во втором случае негативное электромагнитное влияние будет снижено, если использовать транспозицию с более коротким шагом, следовательно более частой взаимной прокруткой проводов. При таком способе более ответственными становятся моменты не только верного взаимного изменения положения проводов, но и натяжение, крепление, и другие факторы, влияющие на монтаж воздушной линии. При условии высокой степени неточности существующей транспозиции, остро стоит вопрос автоматизации процесса монтажа, направленного на решение проблемы негативного электромагнитного влияния контактной сети на ВЛ.

Устройством, которое способно решить обе эти проблемы, является мобильный механизированный комплекс (ММК).

3.1 Автоматизация монтажа воздушной линии с использованием механизированного комплекса

Автоматизация монтажа воздушной линии подразумевает под собой замену ручного мускульного труда машинным трудом. При этом необходимо передать оперативное управление технологическим процессом также машине. В данном случае машиной выступает ММК, призванный обеспечить не только механизацию процесса монтажа, но и автоматизацию, с возможностью интеграции робототехнических и интеллектуальных систем.

ММК представляет собой комплекс механизмов на базе мобильной платформы, которую может перемещаться по маршруту строительства железной дороги. Комплекс состоит из краноманипуляторной установки, выполняющей вертикальное перемещение провода с целью установки ее на опорный изолятор, и раскруточной машины, осуществляющей подачу отдельных проводов из барабанов, при этом выполняя вращательное движение (при нахождении платформы между опорами за один пролет совершается поворот на 60°).

Монтаж проводов и кабелей ВЛ по ровным линиям без пересечений и переходов в нормальных условиях обычно происходит в следующей последовательности: подготовительные и транспортировочные работы; сборка изоляционных гирлянд; размотка и соединение проводов и кабелей и подъем их на опоры; закрепление концов проводов к первой анкерной опоре; натяжение тросов и проводов до нужного провисания и закрепление их под тяжением ко второй анкерной опоре; перенос проводов с разматывающего ролика на зажим; соединение проводов в шлейфах анкерной опоры; при необходимости установить вибрационный демпфер и распорки.

Ряд действий благодаря ММК возможно выполнить либо без участия человека, либо минимизируя его влияние на процесс, в общем итоге облегчая задачу монтажа ВЛ.

Далее разобраны подробнее этапы технологического процесса.

1 Все процессы начинаются с подготовительных мероприятий. После осмотра трассы для будущего монтажа происходит проверка смонтированных опор, фундаментов, отсутствие ям, наличие заземления. Мешающие конструкции необходимо предварительно снести.

Далее очищают монтажную трассу ВЛ и возводят защитные мероприятия для пересекающих монтажную трассу линий. Также немаловажным является очистка места для раскатки проводов для избежания его повреждения во время монтажного тяжения.

В случае использования ММК очистку монтажной полосы можно пропустить, так как бухты проводов находятся непосредственно на подвижной платформе комплекса, и раскладка провода по земле в данном случае не требуется. При таком подходе исключается вероятность зацепления проводов о сучья, пни, ветки, валежник, камни, остатки строительных материалов и, соответственно, их повреждение. Отпадает необходимость в работнике, на которого возложена обязанность контроля целостности размотанного по земле провода. Исключается вероятность вандализма в виде порчи и кражи части разложенных проводов посторонними людьми, так как длина монтируемого участка достигает нескольких километров, контроль которого является отдельной трудной задачей.

Так, с начала 2021 года сотрудники филиала ПАО «Россети Сибирь – Читаэнерго» выявили семь случаев хищений оборудования с энергообъектов. Хищение оборудования энергообъектов рассматривается в том числе как деяние, направленное на нанесение ущерба сетевому комплексу, наносящее тем самым ущерб экономическому и социальному благополучию региона. Кроме того, любое вмешательство в работу электрооборудования может привести к гибели [40].

В 2021 и 2022 годах в Башкирии группой лиц было совершено хищение проводов ЛЭП на энергообъектах [41]. В Норильске 29-летний водитель такси в течение недели украл со склада кабель на общую сумму 5,5 млн. рублей [42].

Во всех описанных случаях компаниям, чье имущество повредили и украли, придется восстанавливать вышедшие из строя участки. Эти процедуры влекут за

собой как материальные, так и временные затраты. В свою очередь за все время этих неприятных ситуаций компании понесут убытки.

2 Количество провода рассчитывается с целью полного использования во время монтажных работ и при этом производят группировку барабанов с одинаковой длиной проводов на них.

Обычно производят раскатку нескольких барабанов одновременно. В зависимости от разных факторов (длина провода, количество барабанов, наличие оврагов, рек, препятствий) выбирают расположение установки барабанов. На одноцепных и двухцепных ВЛ производят раскатку трех проводов с трех барабанов одновременно. В случае с двухцепной линией присутствует такой же цикл и в обратную сторону. Отличием является то, что на одноцепных ВЛ грозозащитный трос комбинируют с одним из трех проводов ВЛ и раскатывают всю линию в этапа, а у двухцепной линии грозозащитный трос раскатывают и поднимаю отдельно перед проводами.

На сегодняшний день существует два основных способа раскатки барабанов:

- с неподвижных устройств, которые располагаются в начале линии;
- посредством передвижных механизмов.

При использовании первого метода перемещение провода производится по земле способом волочения. Преимуществом этого способа является простота конструкции, метода, удобство при сложном рельефе и при необходимости легко заводить внутрь опоры. Недостатком является высокая вероятность повреждения изоляции, внешних повивов, защитных слоев.

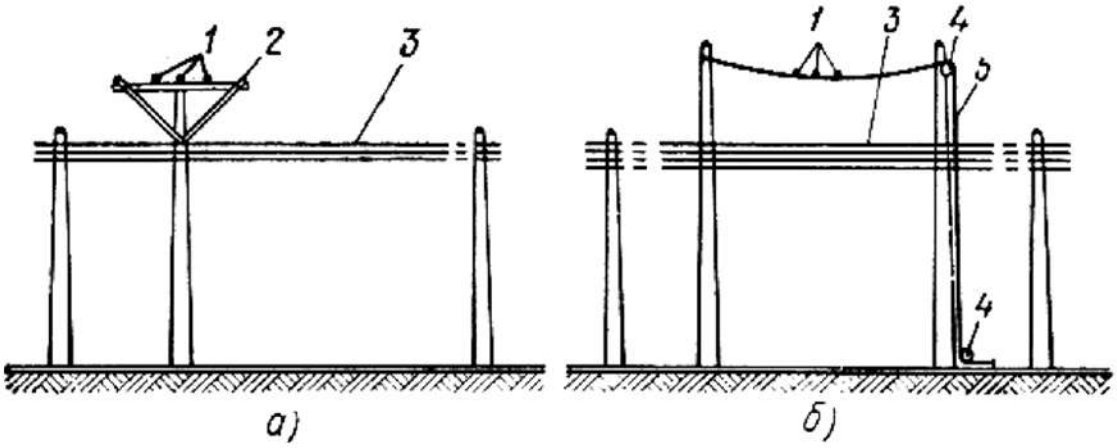
Данная процедура занимает большое количество времени, необходимо очистить большую территорию для безопасного расположения провода перед монтажом, дополнительное использование техники, а также необходимо учитывать многие факторы, влияющие на сохранность и растяжку проводов, такие как проходимости механизмов, наличия водных преград, оврагов и др.

ММК в свою очередь продвигается один раз и проводит работы сразу с тремя проводами, бухты которых располагаются друг за другом. Как и в ручном методе здесь необходим подбор бухт с примерно одинаковой длиной проводов. После

использования запланированных длин проводов, необходимо произвести замену каждой израсходованной бухты на новую. После небольшого загрузочного промежутка ММК способен продолжить работу.

3 Во время доставки барабанов на промежуточные точки производят возведение защитных конструкций действующих ВЛ, линий связи, железными и автомобильными дорогами, которые пересекают монтажную трассу.

На рисунке 3.1 (а) представлен пример временной защиты, которая состоит из общей стойки 1 для всех проводов вместе или отдельных стоек с рогатиной 2 наверху для каждого провода. Другим вариантом защиты является натянутый между двумя стойками трос (рисунок 3.1 б).



а - стойкой с рогатиной, б – стойка канатов
1 - провода сооружаемой ВЛ, 2 - рогатина, 3 - провод пересекаемой линии, 4 – ролики, 5 – канат

Рисунок 3.1 - Устройство временной защиты на переходах

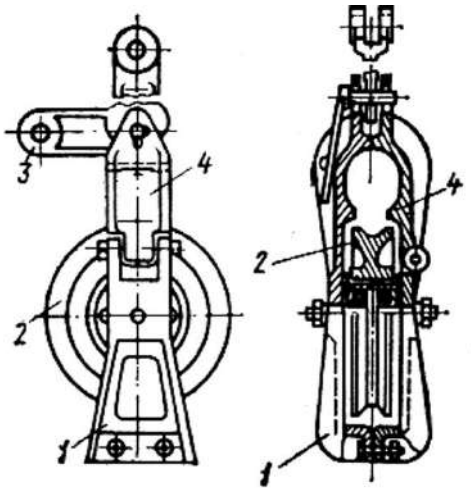
В отдельных случаях вместо устройства защит на пересечениях устанавливают телескопические или шарнирные вышки и раскатывают провода через их поднятые стрелы.

Автоматизация монтажа проводов воздушной линии продольного электроснабжения с помощью ММК не подразумевает прохода препятствий в виде других линий электропередач в автоматическом режиме. Как и в случае с существующим методом, для преодоления подобных препятствий ММК

понадобится дополнительно кран-манипулятор. В данном случае может прийти на помощь машина, используемая для подмены бухт в корпусе ММК.

При подъезде к препятствию в виде других воздушных линий бухты с проводами необходимо выгрузить из ММК до непосредственной преграды. ММК необходимо продвинуться по пути следования за пределы пересекаемой линии и дождаться загрузки бухт, которые необходимо краном-манипулятором перенести над препятствием.

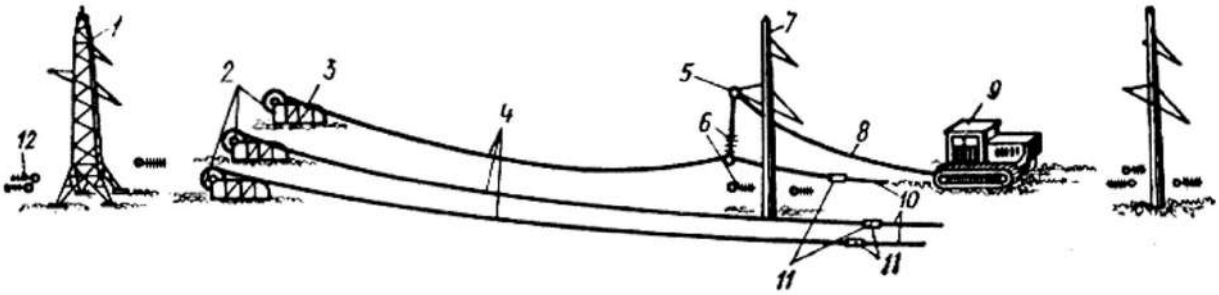
4 После раскатки проводов проводят сборку и подготовку гирлянд изоляторов. Изоляторы соединяют в гирлянды, используя замки и стержни соседних изоляторов. На пестик нижнего изолятора гирлянды надевают ушко и подвешивают монтажный ролик (рисунок 3.2). В гнездо шапки верхнего изолятора вставляют серьгу для крепления гирлянды к опоре.



1- обойма; 2 - ролик с пазом; 3 - звено промежуточное; 4 - откидная щека обойма

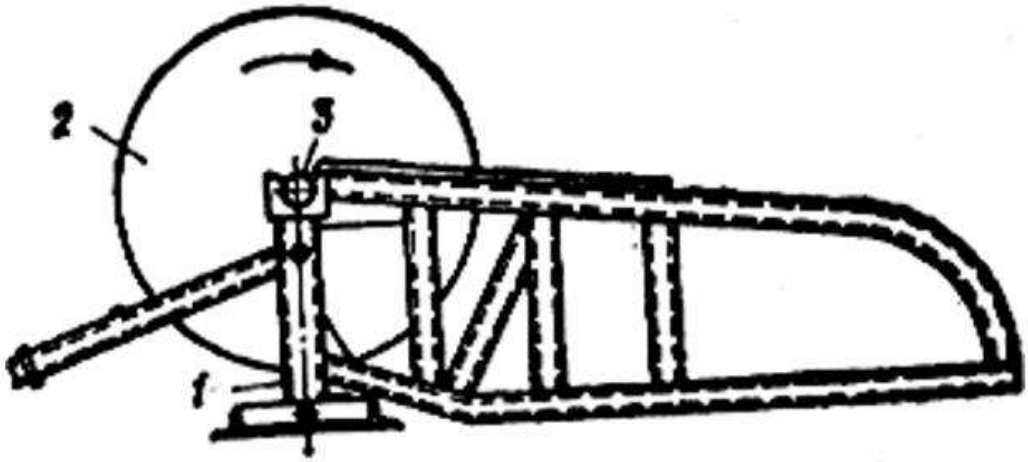
Рисунок 3.2 - Раскаточный ролик

Для увеличения сохранности провода объединяют раскатку и подъем провода на промежуточные опоры. На рисунке 3.3 представлен способ раскатки волочением. Барабаны с проводом в этом случае устанавливают за 10-15 метров до опоры на раскаточные станки 1 (рисунок 3.4) и закрепляют валом 3. После этого другой конец закрепляют на трактор, отмотав перед этим 15-25 метров ручным методом.



1, 7 - анкерная и промежуточная опары; 2 - барабаны с проводом; 3 - раскаточные станки; 4 – провода; 5 - однороликовый блок; 6, 12 - поддерживающие и натяжные гирлянды; 8, 10 - такелажный и тяговый тросы; 9 – трактор; 11 - монтажные зажимы

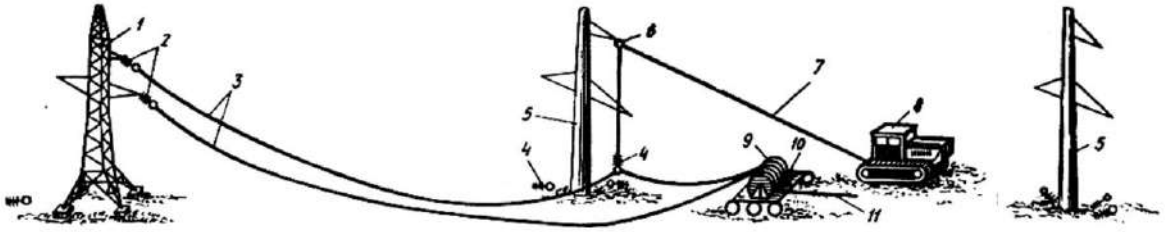
Рисунок 3.3 - Одновременная раскатка трех проводов волочением и подъем их на опору



1 - раскаточный станок; 2 – барабан; 3 – вал

Рисунок 3.4 - Установка барабана с проводом на раскаточный станок

Во время монтажа с помощью передвижных механизмов один конец провода закрепляют в начале линии к анкерной опоре 1 через собранные заранее натяжные гирлянды изоляторов 2, а барабан 9 монтируется на передвижную платформу 10 (рисунок 3.5). Достоинством этого способа является то, что во время тяжения тележки трактором 10 провод плавно разматывается, не повреждаясь от трения о землю, и остается целым, сводя отбраковку поврежденных участков к нулю.



1, 5 - анкерная и промежуточная опоры; 2, 4 - натяжные и поддерживающие гирлянды; 3 -провода; 6 - однороликовый блок, 7, 11 - такелажный и тяговый тросы; 8 - трактор; 9 - барабаны; 10 - раскаточная тележка

Рисунок 3.5 - Одновременная раскатка двух проводов укладкой с барабана и подъем их на опору

Во время монтажа под тяжением провод соединяют со специальным такелажным тросом, который предварительно уложен в раскаточные ролики. Тяговой машиной в конце линии производят тяжение провода из барабана, который смонтирован на вращающейся конструкции в начале монтажной трасы. Благодаря этому способу выполняется полная сохранность провода от повреждения о землю, но из-за высокой технической сложности повышается стоимость тяговых машин, появляется необходимость в квалифицированных рабочих кадрах, а также возрастает объем предварительных работ. В основном этот способ пользуется популярностью в горных, труднодоступных районах, густонаселенной местности, при большой длине перехода через реку и на данный момент не нашел широкого распространения в РФ [43].

На этом этапе монтажные работы подходят к концу. Начинается подключение ВЛ к сети, проверка и прием выполненных работ.

На описанном выше этапе было проведено большое количество работ, целью которых было поднятие с земли и закрепление проводов на опорах.

В ММК этот процесс сильно проще благодаря автоматизации всего процесса в целом. Так как у монтажного комплекса не было необходимости раскатывать и раскладывать провод по земле, то на этом этапе нет необходимости в таком сложном комплексе работ. Монтажный комплекс обладает манипулятором с захватным устройством, и крутильной машиной с бухтами проводов. На одном конце участка необходимо закрепить провода ВЛ, далее ММК продвигается к

первой опоре, и манипулятор в автоматическом режиме по команде оператора производит подъем, установку и закрепление каждого провода поочередно на опоре. Для ориентации в пространстве ММК использует систему датчиков.

В случае с ММК натяжение проводов и их закрепление на опоре производится сразу. Благодаря захватному устройству с системой датчиков, роликов преднатяга и вакуумного механизма с клиновидными зажимами отпадает нужда в использовании раскаточных роликов (рисунок 3.2).

Описанные достоинства механизированного мобильного комплекса будут так же актуальны при производстве монтажных работ на отдельностоящих опорах вне зависимости от наличия поблизости железнодорожного полотна. Это говорит о том, что использование данного ММК для монтажа воздушных линий вне железнодорожной индустрии также имеет большие перспективы.

3.2 Шестишаговая транспозиция воздушной высоковольтной линии

Технология ММК позволяет осуществлять непрерывный, неразрывный, единовременный монтаж всех трех проводов ТП нового типа в шесть шагов высоковольтной ВЛ на каждой опоре по всей ее длине в автоматизированном режиме.

Для систем с изолированной нейтралью (ВЛ АБ) на опорах КС с полевой стороны и ВЛ ПЭ, которая совместима с электромагнитным полем железнодорожной КС переменного тока [44], уменьшить несимметрию напряжений потребителя, вызываемую электромагнитным воздействием КС, способно правильное геометрическое расположение проводов ВЛ.

Если воздействующее электромагнитное поле оказывает одинаковое воздействие на все три фазных провода линии, то уровни наведенного напряжения магнитного и электрического полей (что является составляющими электромагнитного поля) будут равны в фазных проводах. В этом случае, разности потенциалов по фазам в проводах линии от влияний электромагнитного поля будут

стремиться к нулю. При этом само потребляющее устройство сохраняет только питающее напряжение. Этот эффект достигается за счет создания равных расстояний от каждой линии до эквивалентного воздействия (т.е. КС). ТП ВЛ, уравнивающая индуктивность и емкость каждой фазы провода, направлена на уменьшение асимметрии электромагнитного воздействия параллельных ВЛ, обеспечивая в конечном итоге максимальное качество передачи электроэнергии потребителям.

Транспонирование предполагает перестановку мест проводов разных фаз друг с другом по всей линии и осуществляется на специальных транспозиционных опорах или в «пролетах». Однако при таком транспонировании невозможно получить высокое качество желаемых параметров.

Геометрическое устройство перестановки проводников высоковольтной ВЛ электроснабжения позволяет обеспечить полную симметрию погонных электрических параметров линии при сильном воздействии электромагнитного поля контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока [30]. Эту ТП можно выполнять не только на независимых опорах, но и на опорах КС. Однако использование для монтажа линии штатную монтажную дрезину структурного подразделения электроснабжения (дистанции электроснабжения) затруднено. Необходимо разработать:

1 индивидуальную технологию монтажа линии на опоры контактной сети с полевой стороны по отношению к железнодорожному полотну (рисунок 3.6);

2 мобильный монтажный комплекс, способный выполнить все поставленные технологические задачи с максимальной степенью механизации и автоматизации.

Для монтажа транспозиционной линии с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии на отдельно стоящие опоры необходимо немного изменить конструкцию опор. Последовательность выполнения монтажа проводов обозначено цифрами на рисунке 3.7.

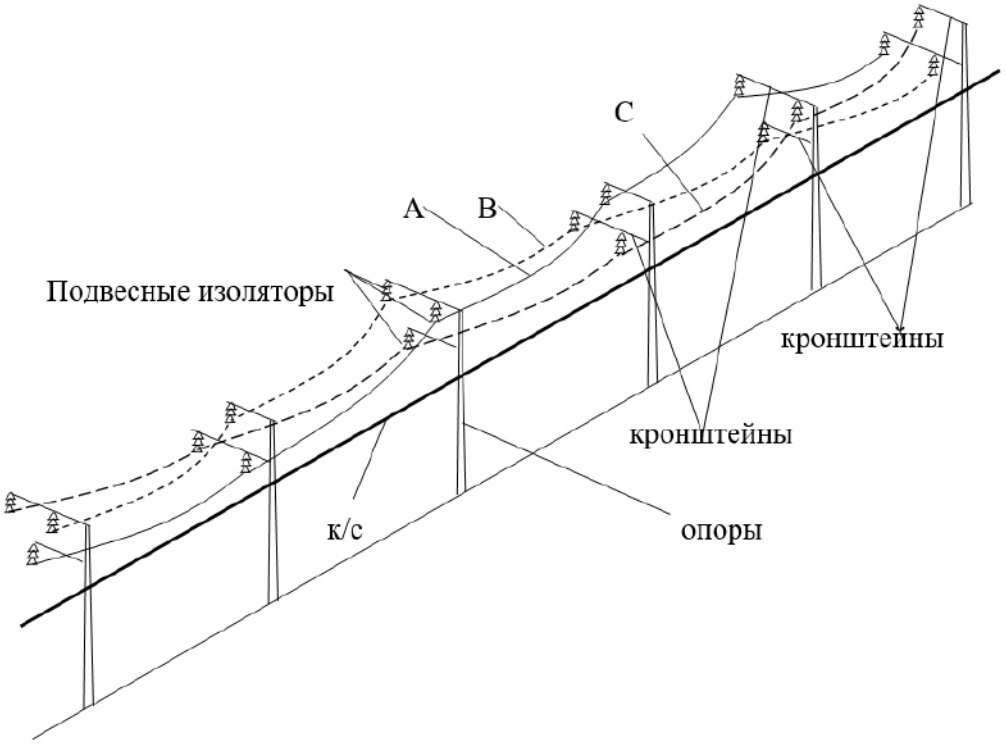


Рисунок 3.6 - Транспозиция проводов на опорах контактной сети

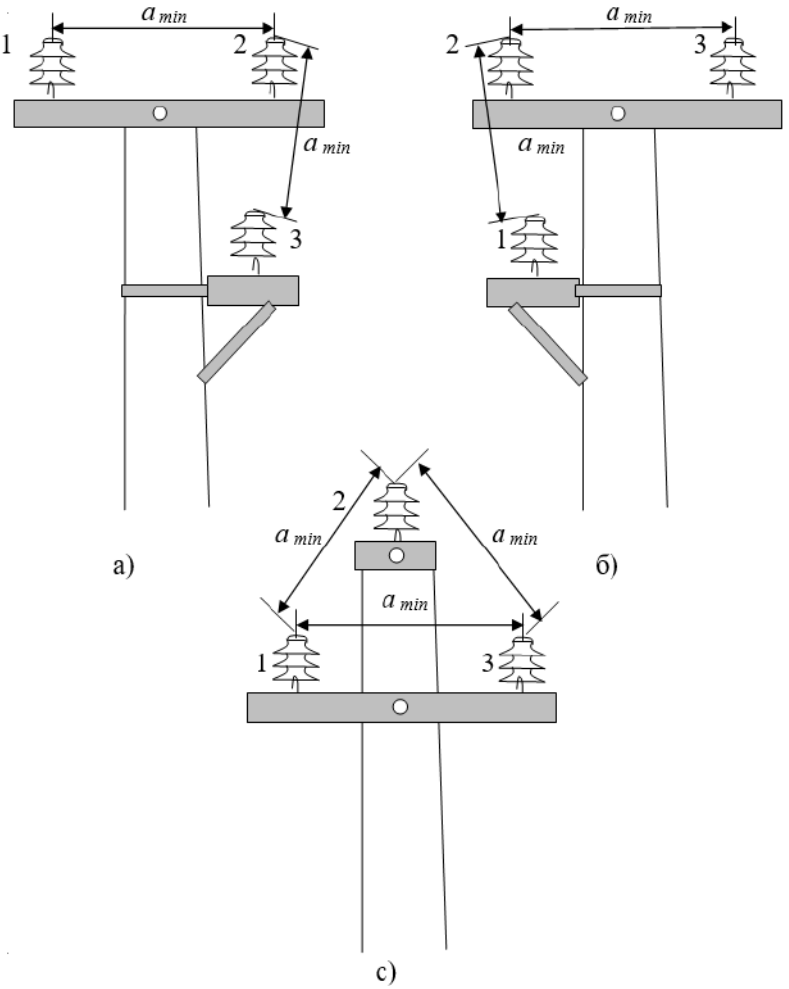
Для систем с изолированной нейтралью ВЛ АБ и ВЛ ПЭ 6 – 10 кВ расстояние между проводами – фазами a_{min} увеличивается на коэффициент 1,15 и используются опорные изоляторы как на бетонных, так и деревянных отдельно стоящих опорах

$$a_{min} = 1{,}15 * a_{\text{cm}\,min},$$

где $a_{\text{cm}\,min}$ – минимальное расстояние между проводами – фазами, которое используется на данный момент.

На основе математического подтверждения симметрии ВЛ по новой технологии шестишаговой транспозиции в разделе II три провода ВЛ заменяются одним эквивалентным, который располагается в геометрическом центре двух

пространственных треугольников расположения проводов-фаз на четных и нечетных опорах.



а - правая опора; б - левая опора; с - центральная опора

Рисунок 3.7 - Транспозиция проводов на отдельно стоящих опорах

Для моделирование электромагнитного влияния на эквивалент ВЛ необходимо рассчитать погонную индуктивность L между контактным проводом и эквивалентом ВЛ. В соответствии с работами Попова П.А. [35] и Говоркова В.А. [3] погонная индуктивность на единицу длины складывается из внутренней индуктивности проводника и внешней индуктивности вне провода.

Внутренняя индуктивность $L_{внутр}$ снижается при увеличении поверхностного эффекта и обычно не превышает 5% от общей индуктивности [3]

$$L_{\text{внутр}} = \frac{\mu l}{8\pi} = 0{,}05 * 10^{-3}, [\text{Гн/км}],$$

где $\mu -$ магнитная проницаемость материала (медь – 1,26*10^{-6} Гн/м); l – единица длины равная 1000 м.

Так как внутренняя индуктивность очень мала, то ей можно пренебречь. Тогда погонная индуктивность приблизительно равна внешней индуктивности $L_{\text{внеш}}$ и рассчитывается по формуле

$$L_{\text{п}} \cong L_{\text{внеш}} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(ln\frac{l}{h} - 1\right), [\text{Гн/км}],$$

где μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi * 10^{-4}$Гн/км);

h – расстояние между центрами контактного провода и эквивалентом ВЛ.

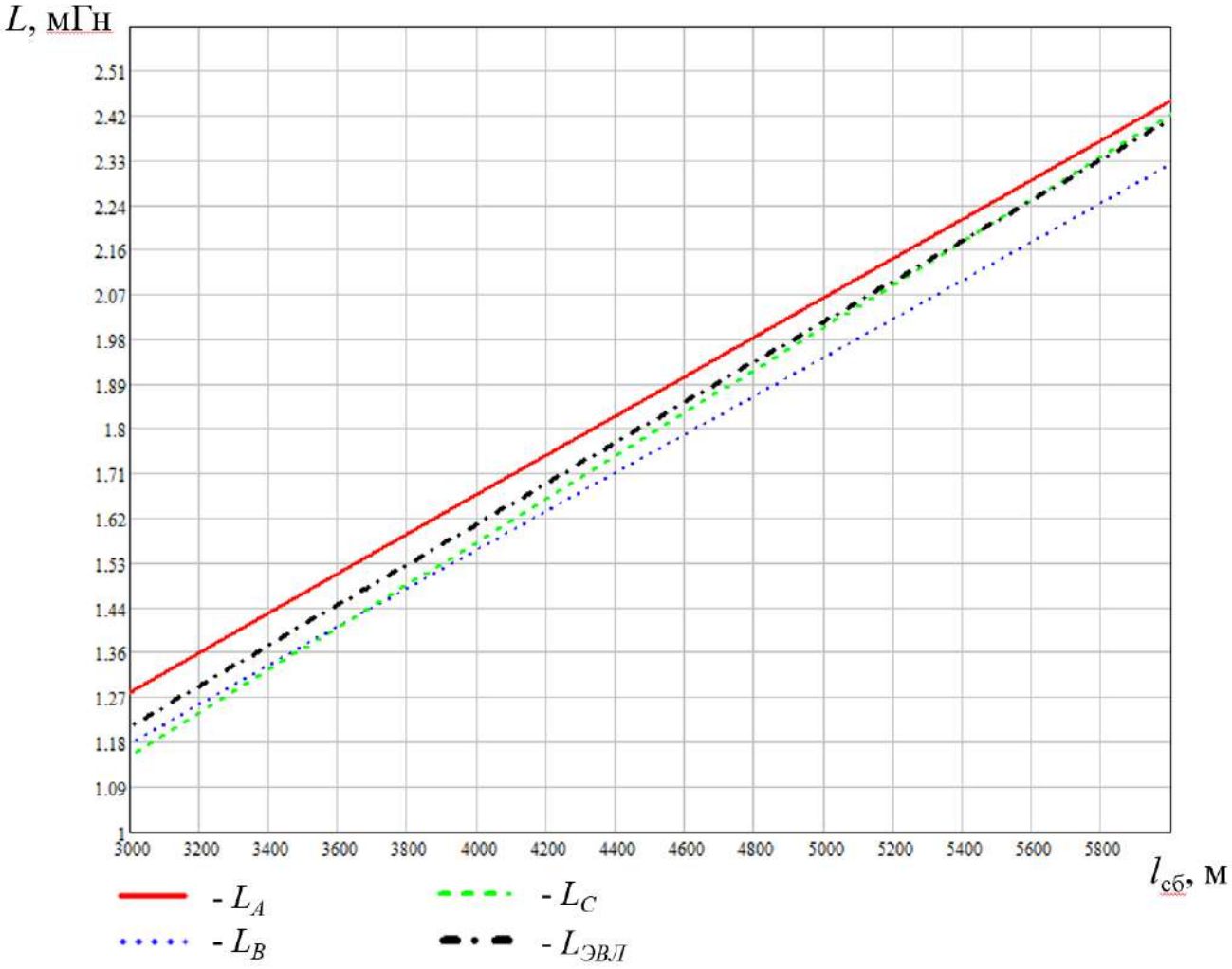
Так как при современном способе монтажа транспозиция производится каждые 3 км, то из этого следует, что на протяжении 9 км полного цикла транспозиции траса сближения каждого фазного провода ВЛ является сложной. Следовательно, для подсчета общей индуктивности необходимо учитывать разное расстояние между фазным проводов ВЛ и контактным проводом в зависимости от длины участка

$$L = \sum_{i=1}^{3} L_{\text{п}i} l_{\text{сб}},$$

где $l_{\text{сб}}$ – длина участка сближения.

На основе этого была построена зависимость общей индуктивности проводов-фаз *A, B, C* в [мГн] от длины линии для трехфазной ВЛ при современном методе монтажа и для эквивалентной ВЛ (рисунок 3.8). Для наглядности был

выбран участок с 3 км до 6 км, что соответствует первой и второй перекрутке фазных проводов при современной транспозиции.



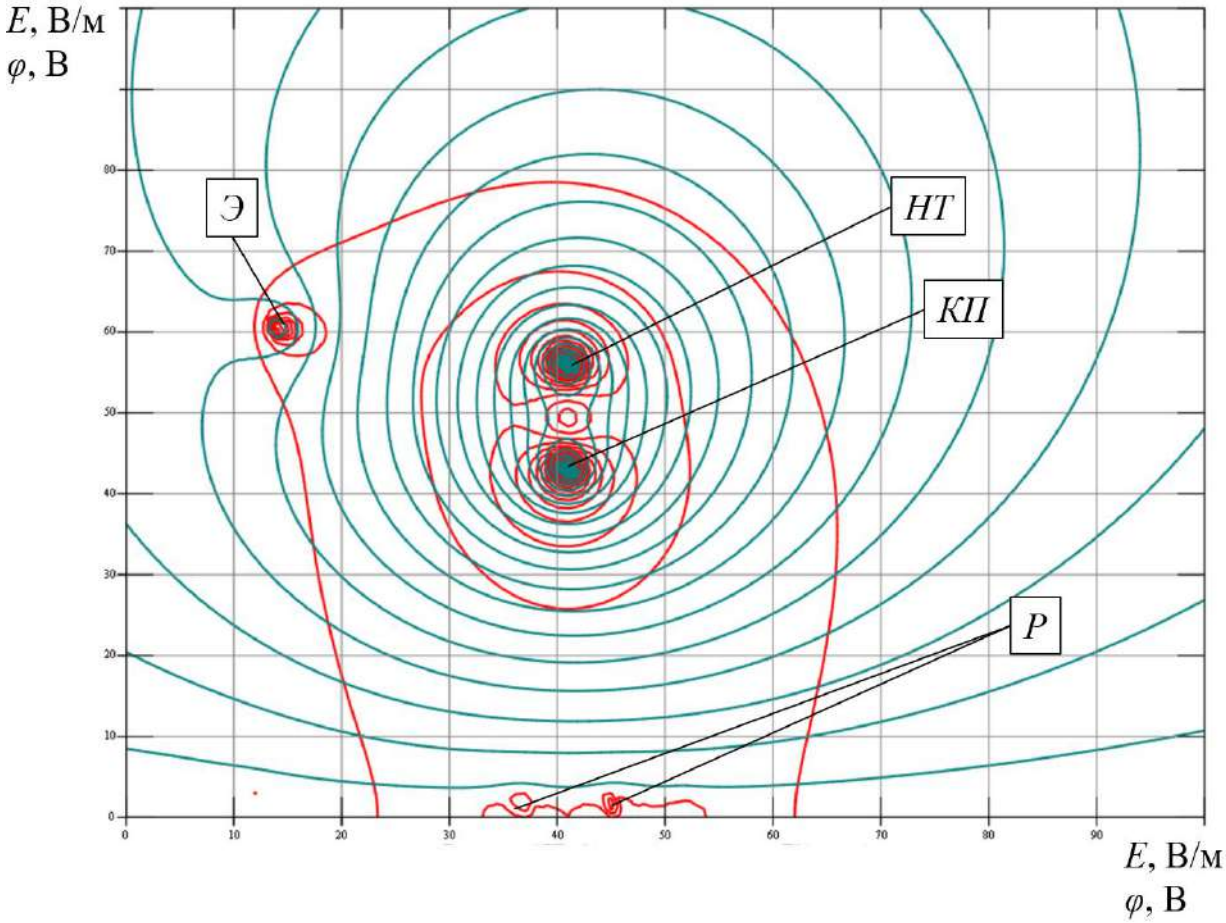
L_A, L_B, L_C – индуктивность от контактного провода на провода-фазы *A, B, C* соответственно при современной транспозиции проводов ВЛ; $L_{ЭВЛ}$ - индуктивность от контактного провода на эквивалентный провод фаз *A, B, C* при шестишаговой транспозиции проводов ВЛ; $l_{сб}$ – длина участка сближения

Рисунок 3.8 – Зависимость погонной индуктивности от длины ВЛ на участке *l*сб = 3-6 км

На рисунке 3.8 видно отличие индуктивностей при современном методе монтажа по всей длине участка между собой, что говорит о несимметричности такой линии. Симметрирование параметров происходит только к концу транспозиционного цикла, т.е. когда $l_{сб}$ = 9 км. При использовании шестишагового устройства транспозиционной геометрии проводов несимметрия погонных параметров, в частности погонной индуктивности, стремится к нулю. Это также

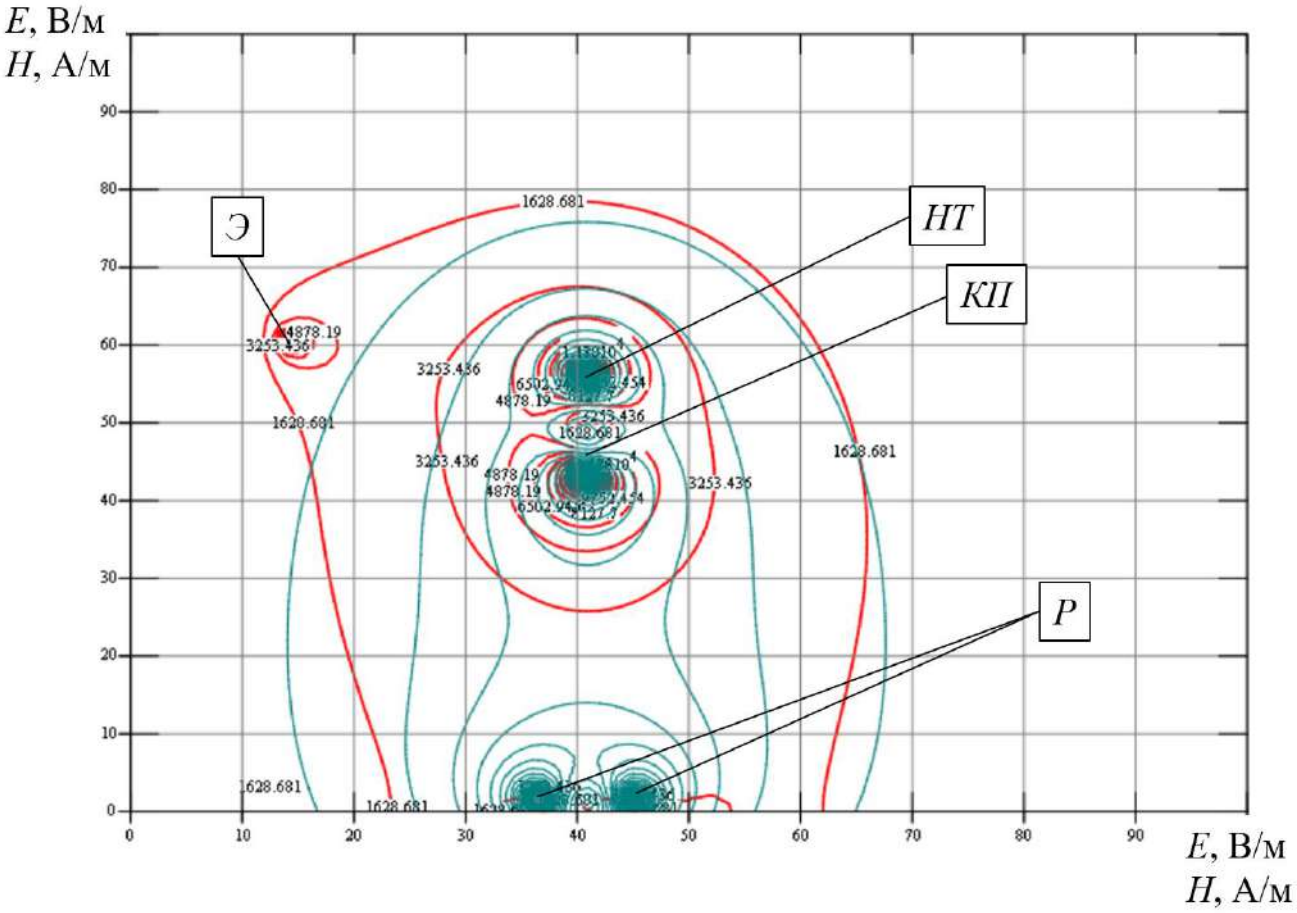
подтверждает кривая $L_{ЭВЛ}$, которая является единой для эквивалента ВЛ благодаря симметрированию.

В ходе моделирования в среде математического программирования MathCad [45] была построена зависимость напряженностей электрического и магнитного полей от контактной сети между контактным проводом и эквивалентов ВЛ (рисунок 3.9 и 3.10). Дополнительно модель учитывает наличие несущего троса и рельс. Условием возникновения магнитного влияния является наличие двух электропоездов переменного тока на линии. Напряжение контактной сети Uкс = 27,5 кВ.



Э – эквивалент ВЛ; НТ – несущий трос; КП – контактный провод; Р – рельсы;
E – напряженность электрического поля; φ – эквипотенциальные поверхности

Рисунок 3.9 – Напряженность электрического поля и эквипотенциали

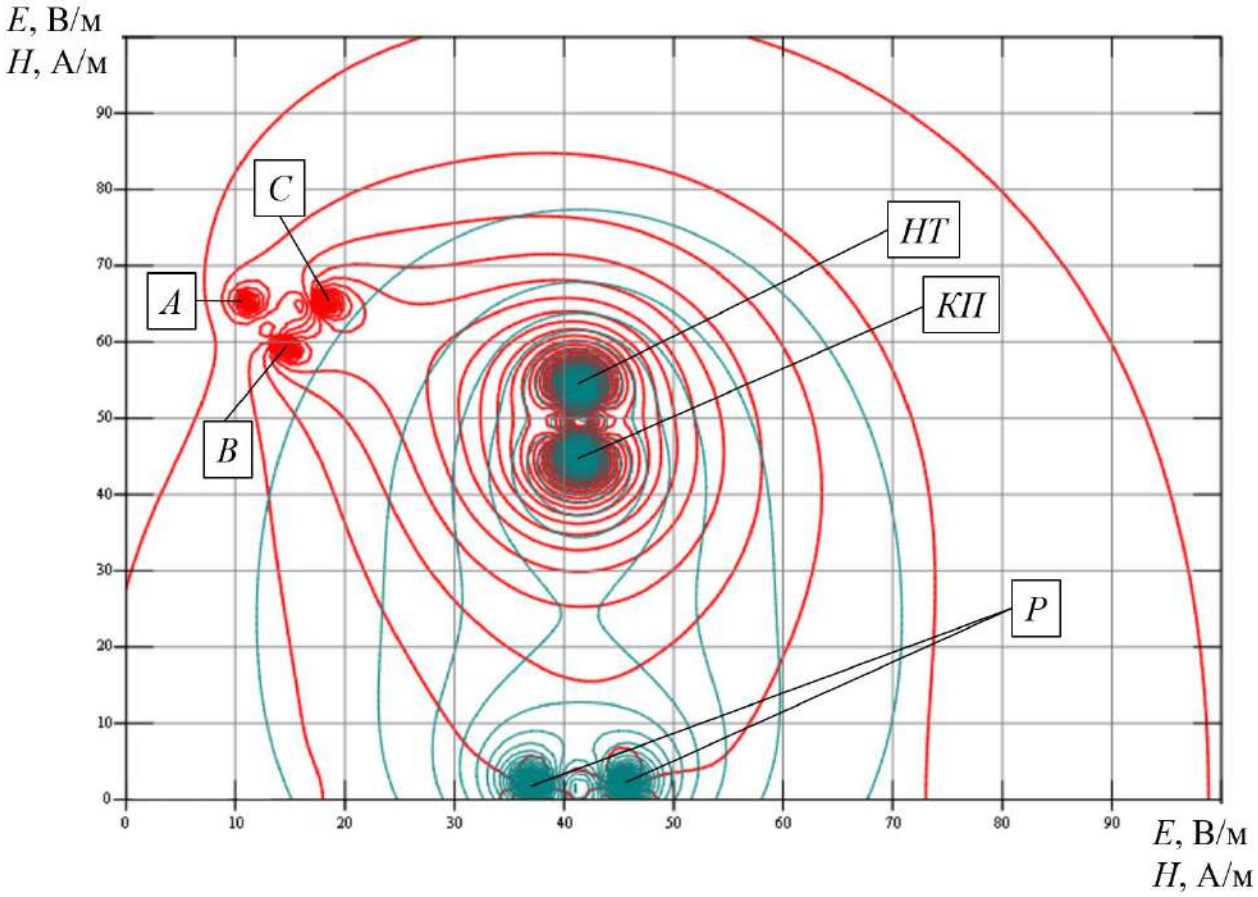


Э – эквивалент ВЛ; НТ – несущий трос; КП – контактный провод; Р – рельсы;
E – напряженность электрического поля; *H* – напряженность магнитного поля

Рисунок 3.10 – Напряженность электрического и магнитного поля при шестишаговой транспозиции

В ходе изучения электромагнитного влияния на эквивалент ВЛ, который смонтирован на опорах контактной сети и находится под интенсивным ее влиянием, было установлено, что в момент нахождения на линии двух электропоездов напряженность электрического поля составляет E = 12 038 В/м, в то время как напряженность магнитного поля составляет H = 17,1 А/м.

На рисунке 3.11 можно увидеть напряженность электрического и магнитного полей при современном методе монтажа проводов ВЛ на опорах контактной сети. Контактный провод оказывает несимметричное влияние на каждый из фазных проводов ВЛ.



A, B, C – провода фаз *A, B, C* соответственно; НТ – несущий трос;
КП – контактный провод; Р – рельсы;
E – напряженность электрического поля; *H* – напряженность магнитного поля

Рисунок 3.11 – Напряженность электрического и магнитного поля при современной транспозиции

В ходе моделирования было установлено, что на этом участке напряженность электрического поля по фазам равна:

E_A = 16 477 В/м; E_B = 9 547 В/м; E_C = 28 520 В/м.

Напряжённость магнитного поля:

H_A = 13,5 А/м; H_B = 17,9 А/м; H_C = 17,8 А/м.

Как можно заметить по рисункам 3.8-3.11 устройство транспозиционной геометрии проводов благодаря выравниванию индуктивностей в отдельных

проводах-фазах позволяет снизить несимметрию погонных электрических параметров в ВЛ ПЭ, которая смонтирована на опорах контактной сети и находится под интенсивным электромагнитным влиянием.

3.3 Проработка серийных систем управления с гидравлическими приводами, работающих в автоматическом и полуавтоматическом режиме

Аналогом монтажных работ по возведению воздушных линий продольного электроснабжения являются работы по строительству линий электропередач от среднего напряжения (3-35 кВ) до ультравысоких (свыше 1000 кВ).

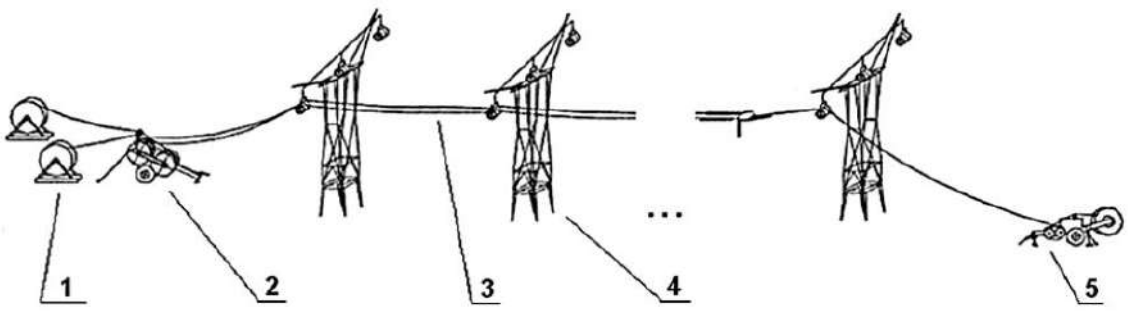
В работе Гаврюшина С. С. проводится моделирование работы монтажного комплекса строительства ВЛ электропередач при помощи оборудования с использованием гидравлического привода [22]. Авторы провели исследования монтажного комплекса для строительства линий электропередач, оборудование и лидер трос в процессе тяжения.

Монтажный процесс при использовании таких машин состоит из этапов: разгон, статичный режим и выбег. На скорость комплекса влияют технические требования к проводу и климатические условия. Схождение натурного и теоретического экспериментов гидравлической установки монтажа проводов ЛЭП под тяжением показало преимущество автоматизации подобных комплексов перед существующими методами.

В указанном исследовании проводился анализ перспективных кабелей и проводов, монтаж которых необходимо выполнять системами автоматического управления с учетом ограничений по усилию растяжения. При моделировании компоненты комплекса были представлены упругими инерционными элементами, соединенные между собой в цепь. При этом параметры всего комплекса постоянно изменяются.

На рисунке 3.12 представлена схема монтажного комплекса, который первоначально разгоняется до проектной скорости (4-5 км/ч), натяжение при

номинальной скорости и торможение. Параметры работы (усилие тяжения, торможения, скорость, длины пролетов) задаются до начала монтажного процесса.



1 - тормозной кабельный домкрат; 2 – гидравлическая тормозная машина; 3 - пролет воздушной линии электропередач с проводом; 4 - опора; 5 - натяжная гидравлическая машина

Рисунок 3.12 - Монтажный комплекс

Во время исследования системы управления комплексом проводился анализ влияния массы, моментов инерции, подвижности и упругости элементов, жесткости проводов, сил тяжения, трения, времени торможения и разгона.

По итогам исследования были получены результаты моделирования процесса разгона монтажного комплекса из состояния покоя до достижения максимальной постоянной скорости (рисунок 3.13) и результаты торможения до полной остановки (рисунок 3.14).

Как можно заметить по графику на рисунке 3.13, время набора постоянной скорости тяжения под номинальной нагрузкой для провода АС 240/56 составляет чуть более 23 секунд. При этом за это время комплекс успевает протянуть около 13 метров провода. По рисунку 3.14 видно, что скорость с 6 м/с снижается до нуля за чуть более чем 18 секунд, протягивая за этот момент 14 метров провода марки АС 240/56.

Эти данные подтверждают значительное улучшение характеристик монтажа линий электропередач с введением автоматизации.

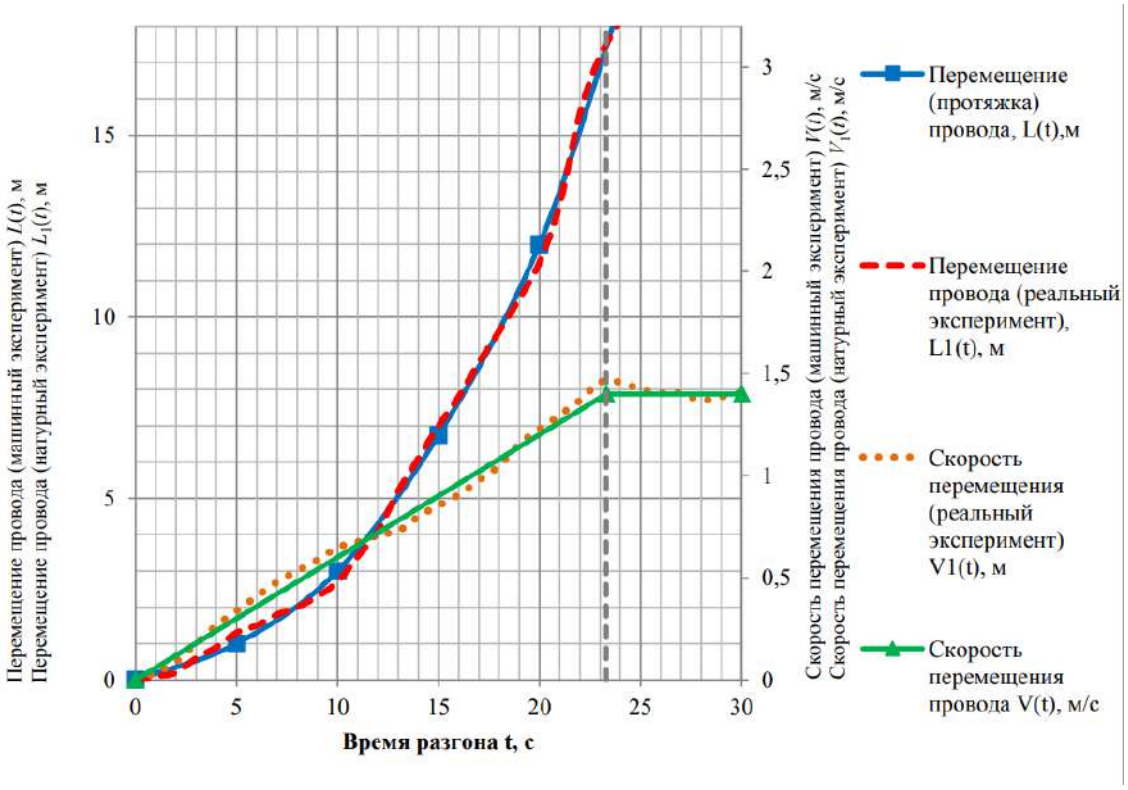


Рисунок 3.13 - График зависимости перемещения (протяжки провода) и изменения скорости в процессе разгона из состояния покоя до постоянной максимальной скорости 1,4 м/с для провода АС 240/56

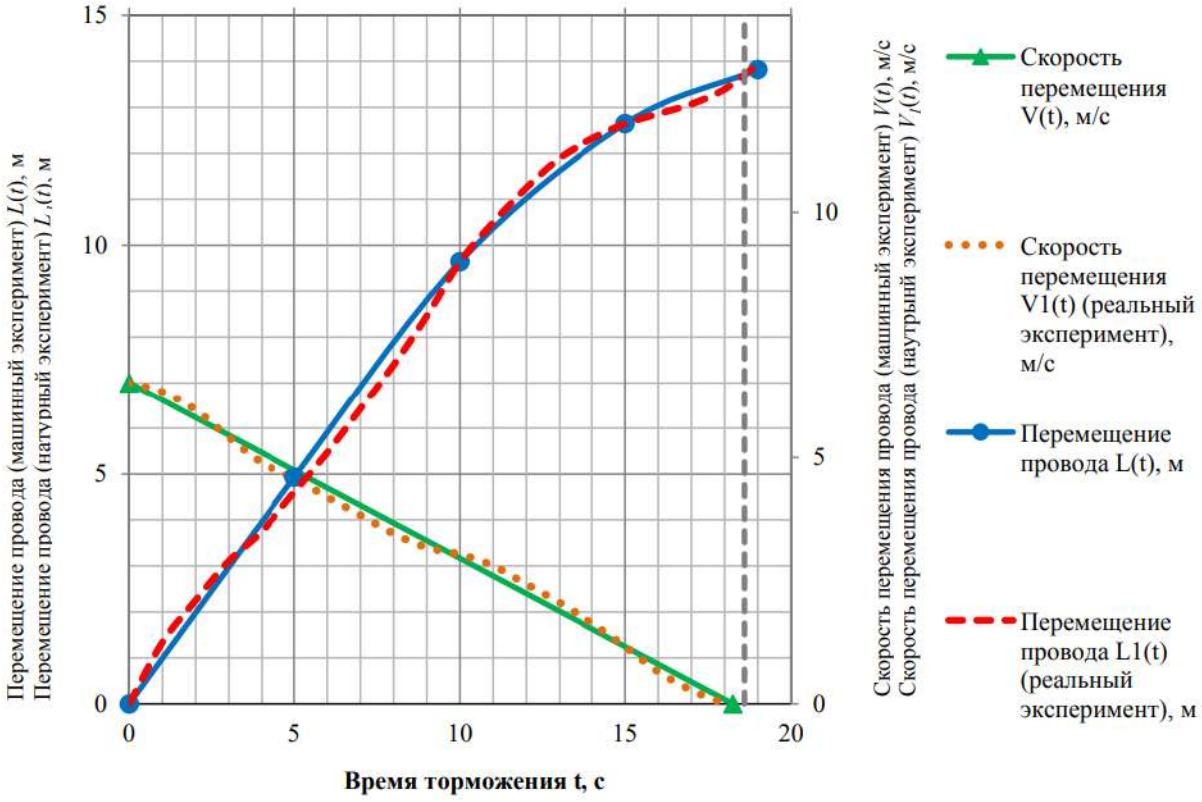


Рисунок 3.14 - График зависимости перемещения (протяжки провода) и изменения скорости в процессе торможения до полной остановки для провода АС 240/56

Повышается скорость работы, уменьшается время монтажных работ, при математическом моделировании вычисляются допустимые нагрузки, которые позволяют максимально эффективно использовать гидравлическую монтажную систему. Система управления представлена на рисунке 3.15.

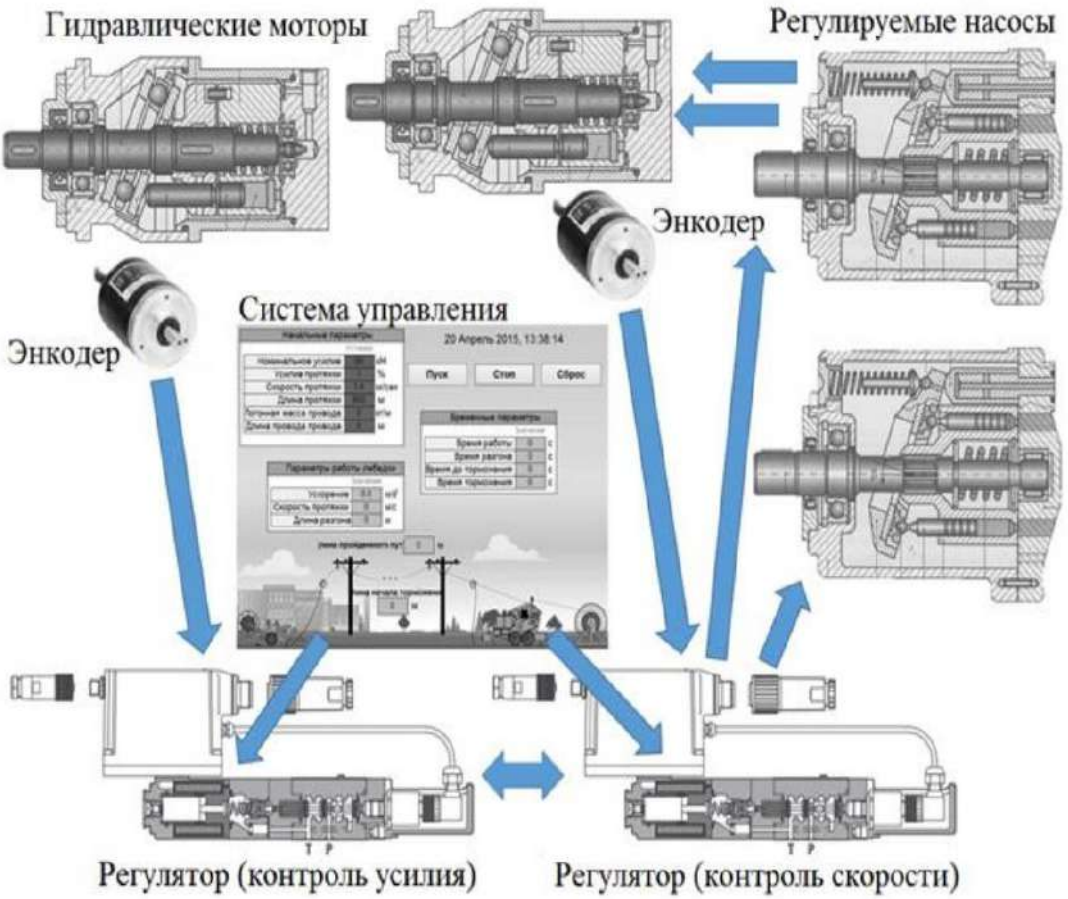


Рисунок 3.15 - Автоматизированная система управления гидравлическим монтажным комплексом

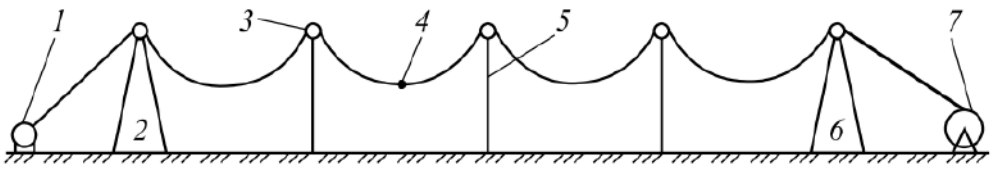
Работа данной гидравлической системы основана на гидравлических моторах, питаемых от регулируемых насосов высокого давления. Через энкодеры (датчики скорости) система управления машиной узнает данные из внешней среды об усилии и скорости тяжения. Обратная связь системы управления и регуляторов обеспечивает своевременное изменение характеристик скорости и усилия натяжения, что приводит к повышению эффективности монтажных работ на воздушной линии электропередач.

Использование установки с гидравлическим приводом обусловлено большим весом проводов воздушных линий электропередач напряжением

выше 30 кВ. ВЛ ПЭ, монтируемые на опорах контактной сети переменного тока или на значительном удалении от нее, а также ВЛ, располагающиеся на территориях федерального значения не зависимо от железной дороги, для монтажа которых проводится исследование ММК, в основном имеют напряжение 6-10 кВ. Провода для таких систем имеют небольшой удельный вес, что позволяет отказаться от использования такой массивной, громоздкой и тяжелой гидравлической установки.

Но нельзя не отметить сравнительный анализ экспериментальной и теоретической составляющих описанного исследования, в котором была доказана корреляция рассчитанной математической модели и реальных условий эксплуатации гидравлического комплекса. Как и в случае ММК, монтажный комплекс из описанного исследования Гаврюшина С. С. и др. [22] оптимизирует механизированный труд автоматизацией с помощью системы управления, что в конечном итоге приводит к улучшению качества технологического процесса.

Процесс прокладки воздушной линии в автоматизированном процессе представляет собой достаточно сложную систему взаимосвязанных этапов. На рисунке 3.16 представлена схема раскатки проводов и кабелей 4 с помощью гидравлического монтажного комплекса 1 по смонтированным опорам 5 через раскаточные ролики 3 [46]. Благодаря такому методу монтажа повреждение провода или кабеля во время работы сводится к нулю, так как растягивание происходит без рывков резко динамичного характера и при этом провод или кабели не касаются земли.



1 — гидравлическая натяжная машина; 2, 6 — анкерные опоры; 3 — раскаточный ролик; 4 — кабель-провод; 5 — промежуточные опоры; 7 — тормозная машина и барабан с кабель-проводом

Рисунок 3.16 - Схема раскатки проводов методом монтажа «под тяжением»

В работе [47] было целью спроектировать автоматизированную систему управления (АСУ) монтажного комплекса с гидроприводом для монтажа ВЛ электропередач. Во время изучения существующих систем проектирования ВЛ было установлено, что длина трос-лидера должна быть индивидуальной на каждом пролете для сохранения проектной «стрелы провеса».

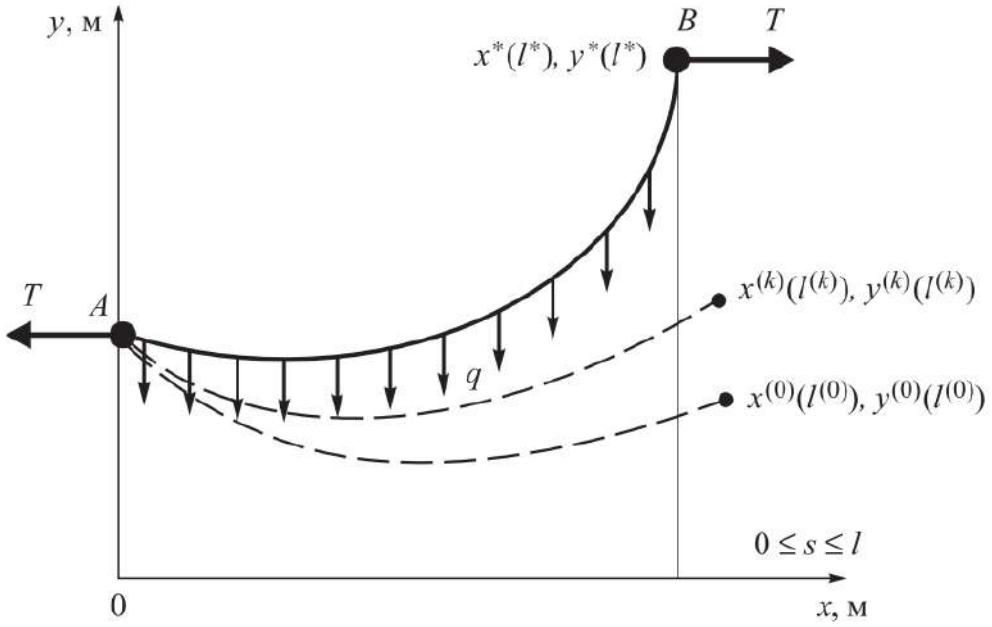
Для расчета силы тяжения необходимо использовать параметры длины пролета и погонный вес монтируемого провода или кабеля. В первом приближении оно может быть определено по уравнению цепной линии или по эмпирическим соотношениям. Как расчетные модели лидер-троса и кабель-провода используются модели абсолютно гибкой нерастяжимой нити, подробно описанные в работах [48, 49, 50, 51].

Благодаря использованию методики с АСУ гидравлического комплекса по натяжению ВЛ снижается вероятность опасных ситуаций и повышается качество работы.

При двумерной (плоской) постановке задачи о нахождении формы нити в поле сил тяжести решением является уравнение цепной линии [52, 53, 54]. Но так как изначально неизвестна длина нити в пролете и вероятность проскальзывания через ролики в соседний пролет, то непосредственное применение этих формул невозможно [47].

В системе уравнений, составленной по схеме пролета воздушной линии электропередач авторами работы [47], дополнили задачу краевыми условиями. И с помощью программного математического комплекса MathLab были проведены вычисление дифференциальных уравнений.

Если значение силы тяжения T будет фиксированным, то нужно найти длину проводной линии l^*, при которой координаты сечения во время достижения дуговой координаты s совпали с координатами опоры. Заключительный этап теоретического расчета позволяет определить векторы состояния в каждом сечении гибкой нити. На рисунке 3.17 представлена зависимость параметров от дуговой координаты, а также «стрела провеса» гибкой нити.



A, B – точки соседних опор; *s* – дуговая координата длины провода; *l** - необходимая длина провода; *x*, y** - необходимые координаты опоры *B*; l^k –длина провода при дуговой координате $s = k$; x^k, y^k - координаты опоры *B* при значении дуговой координаты $s = k$; l^0 –длина провода при дуговой координате $s = 0$; x^0, y^0 - координаты опоры *B* при значении дуговой координаты $s = 0$; *q* – распределенная нагрузка на провод; *T* – направление тяжения

Рисунок 3.17 - Линия провеса гибкой нити в пределах одного пролета

Программное обеспечение из исследования авторов [47] позволяет в виртуальной среде провести моделирование монтажного процесса ВЛ с учетом краевых условий. Стрелы провеса проводов или кабелей, отличающиеся от расстояния между опор представлены на рисунке 3.18.

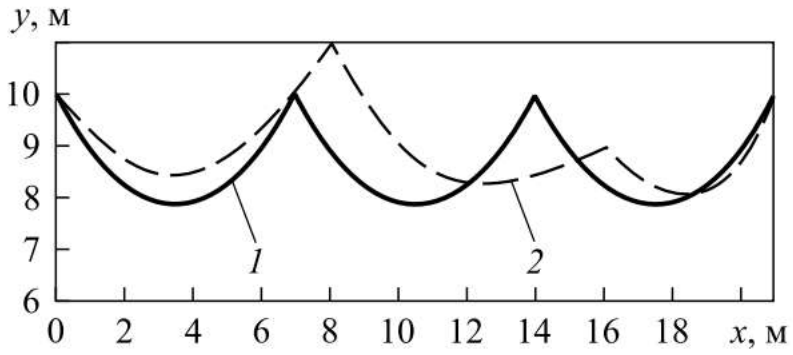


Рисунок 3.18 - Линии провеса для участков с равным (1) и с переменным (2) межпролетным расстоянием

Предложенные численная методика и алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния кабель-проводов воздушных ЛЭП, предназначенные для использования в АСУ работой монтажного комплекса с гидравлическим приводом, способны помочь в решении задачи автоматизации управления ММК, где также необходимо проводить тяжение провода с последующим его креплением на опоре.

Разницей между монтажным комплексом с гидравлическим приводом и ММК являются принцип работы, усилия тяжения, исходные параметры для программы управления, а также переменные данные, поступающие из внешней среды.

Так, например, используемый монтажный комплекс с гидроприводом является по своей сути статичным объектом. Из-за большой массы и габаритных размеров его транспортировка не является доступной. Это влечет за собой ряд трудностей, ограничивающих область работы. ММК в свою очередь базируется на передвижной платформе, способной двигаться вдоль монтируемого участка. В дополнении к более тонкому проводу, это требует усилия тяжения только на один пролет, что позволяет проектировать ММК на меньшую мощность работы, а значит приводит в данном аспекте вопроса к более дешевому производству установки.

Соответственно, если ММК базируется на передвижной платформе и изначально отличается от статичного комплекса, описанного выше, то исходные параметры будут отличаться. ММК необходимо ориентироваться в пространстве для поиска опоры, коуша крепления, препятствий, задавать усилия работы электродвигателей, гидроприводов, электроприводов, а также, основная цель ММК, отслеживать положение каждого из трех проводов продольного электроснабжения относительно друг друга в пространстве.

В процессе работы на ММК будут действовать различные факторы окружающей среды. Крепление проводов должно осуществляться четко, верно и надежно. Для этой цели регулярно должна проводиться проверка всех датчиков, после чего система управления ММК рассчитает программу управления для конкретной опоры и проведет монтаж.

Результатом работы [47] стал программный комплекс выбора оптимальных параметров монтажного процесса, которые позволяют снизить вероятность аварийных ситуаций и повысить качество работы комплекса. Методы и алгоритмы использованные в этом программном обеспечении могут помочь в уточнении некоторых параметром системы управления ММК.

3.4 Выводы по разделу 3

1 В ходе анализа принятого на сегодняшний день алгоритма монтажных работ по возведению воздушных линий продольного электроснабжения было установлено, что больше половины этапов могут быть оптимизированы с существенным улучшением характеристик благодаря автоматизации монтажного процесса.

2 Предлагаемое устройство транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии повысит сложность и без того трудоемкого процесса.

3 Снижение несимметрии погонных электрических параметров линии лежит в прямой зависимости от геометрии расположения равностороннего треугольника проводов-фаз в пространстве относительно контактного провода. Использование в расчетах эквивалента ВЛ позволяет провести сравнительный анализ шестишаговой симметричной и современной ВЛ.

4 Для облегчения процесса, повышения безопасности и точности необходимо автоматизировать процесс монтажа воздушной линии путем использования мобильного механизированного комплекса.

3 ММК позволяет использовать технологию беспрерывного, безразрывного и одновременного монтажа всех трех проводов шестишаговой транспозиции воздушной высоковольтной линии на каждой опоре по всей ее длине в автоматическом режиме.

4 Анализ существующих методов монтажа воздушной линии с использованием гидропривода показал преимущества перед ручным методом. Указанный монтажный комплекс с гидроприводом работает в полуавтоматическом режиме. По сравнению с ММК обладает следующими недостатками: большие масса-габаритные размеры, статичный метод работы устройства с гидроприводом, более высокая стоимость агрегатов тяжения проводов.

4 РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Для четкого понимания всей сути рабочего процесса и непосредственно функционирования ММК необходимо провести структурный анализ отдельных блоков всей системы.

ММК включает в себя: крутильную машину для вращения барабанов с проводами в нескольких плоскостях; манипулятор в первую очередь для вертикального перемещения провода от крутильной машины до места крепления; устройства натяжения и крепления проводов на опорах; электродвигатели для осуществления вращательных и поступательных перемещений необходимых элементов; а также необходимо подобрать основание, которое будет соответствовать техническим требованиям ММК.

4.1 Устройство мобильного механизированного комплекса

ММК, по аналогии со специализированными машинами [55], представляет собой механизированный комплекс на базе мобильной платформы, которую можно перемещать по маршруту строительства железной дороги. Комплекс состоит из краноманипуляторной установки, выполняющей вертикальное перемещение провода с целью установки провода на опорный изолятор, и раскруточной машины, осуществляющей подачу провода из барабана с одновременным выполнением вращательного движения (при нахождении платформы между опорами за один пролет происходит вращение на 60°). При этом общая длина манипулятора должна составлять не менее 10 метров, так как максимальное расстояние до опоры может составить 7 метров [56], при этом стоит заложить еще 3 метра на случай вертикальной несовместимости кабеля и

опоры. Для защиты от перегрузок электрических сетей предлагается применять кабель нового поколения [57, 58].

Поскольку при его использовании возможно потребуется большая конструкционная прочность и мощность двигателей, необходимо проектировать ММК с некоторым запасом на предлагаемые технологии.

Крутильная машина представляет собой рамную конструкцию, выполненную из металла и установленную на подвижное основание, которым выступает полуприцеп различного исполнения.

В настоящее время в ВЛ ПЭ 6-10 кВ применяют различные типы проводов, особенности их конструкции и основные технические характеристики можно найти в литературе [59, 60, 61, 62].

В ВЛ ПЭ напряжением от 6 до 35 кВ следует использовать многожильные провода (до преобразования допускается применение одножильных проводов) [60]. По условиям механической прочности на ВЛ ПЭ на перегонах и станциях, в населенной и ненаселенной местности может применяться провод сталеалюминиевый многопроволочный марки АС сечением 25, 35, 50 и 70 мм^2 [65].

Как показывает опыт эксплуатации, ВЛ ПЭ в основном выполняются проводами АС-25, АС-35 и АС-50 [63]. Присоединение линий к трансформаторным подстанциям осуществляется кабелями марки АСБ 3×16, АСБ 3×35, АСБ 3×50 и т.п. [60].

С целью повышения надежности электроснабжения устройств СЦБ и других нетяговых потребителей для ВЛ 6–10 кВ в последнее время широко применяют самонесущие изолированные и защищенные провода (СИП). Анализ принятых правил электроснабжения нетяговых потребителей показывает, что в практике железнодорожного строительства для сооружения ВЛ 10 кВ применяют провод марки СИП-3 (SAX). Самонесущие провода для ВЛ до 20 кВ изготовляются из уплотненного сталеалюминевого сплава (СИП-3) или термоупроченного алюминиевого сплава SAX (финской фирмы *ENSTO SEKKO*), имеют круглое сечение и покрыты изолирующей оболочкой из

атмосферостойкого светостабилизированного полиэтилена [64]. Расстояние от проводов до земли и между фазами принимают в соответствии со сводом правил СП 226.1326000.2014 [32].

Расстояние между линией и землей подлежит также нормированию. Не менее 6 м в населенной местности, не менее 5,2 м – в ненаселенной местности, не менее 5 м – в труднодоступной.

В таблице 4.1 представлены характеристики проводов АС-25, АС-35, АС-50 [65], СИП-3 1х35, СИП-3 1х50 [66].

Таблица 4.1- Характеристики проводов

Марка провода	Расчетный наружный диаметр провода, мм	Расчетная масса 1 км провода, кг	Минимально допустимый радиус изгиба, мм
АС-25	6,9	100,3	48,3
АС-35	8,4	148	58,8
АС-50	9,6	195	67,2
СИП-3 1х35	12	165	84
СИП-3 1х50	13	215	91

Для выполнения описанных задач ММК необходима информация об окружающей среде и блок управления для преобразования полученных данных в управляющее воздействие. Для сбора информации из окружающей среды на ММК должна быть установлена система датчиков [67, 68]. Контроль безопасности движения будет осуществляться благодаря датчикам движения ближнего действия. Так как скорость движения мобильной платформы вдоль железнодорожного полотна при монтаже низкая, то дальность этого датчика нужна небольшая. Достаточным будет 2-5 метров с учетом запасного расстояния для совершения маневра. Минимально таких датчиков необходимо установить на ММК в количестве двух единиц: спереди и сзади.

Также необходимы датчики скорости и температуры двигателей. Как правило, они уже установлены на двигатели, поэтому в нашем случае остается произвести подключение их к выводам блока управления.

Помимо описанных датчиков, одними из самых важных в данной системе являются концевые датчики, которые показывают блоку управления ММК разрешенные границы для монтажа. Один концевой датчик необходим на рабочем органе для определения момента перекрутки при достижении новой опоры. Второй необходим на крутильной машине для контроля верного угла поворота. Еще два необходимы для контроля границ манипулятора при совершении движения в вертикальной плоскости. В случае, если необходимо повысить точность, то некоторые концевые датчики можно заменить энкодерными [69]. Если по какой-либо причине произойдет перенатяжение монтируемого провода, то должен сработать соответствующий датчик на изгиб манипулятора. Так как ММК должен обладать способностью передвигать манипулятор как в прямом направлении, так и в обратном, то датчиков перенатяжения должно быть установлено в количестве четырех штук, по два на каждую сторону изгиба.

Чтобы полученная информация была правильно использована, необходим блок управления. Для этих задач подходит одноплатный компьютер *RaspberryPi* [70].

Аналогов мобильному комплексу на сегодня нет. При существующем способе монтажа используют автовышку или дрезину. В свою очередь ММК призван обеспечить одновременный монтаж трех проводов транспозиции с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии в условиях электромагнитного поля в автоматизированном режиме.

4.1.1 Конструкция крутильной машины

В основе конструкции лежит поддерживающий «скелет», который называется рама. Так как она представляет собой несущую конструкцию в виде

клетки, опоясывающей с разных сторон бабины с проводами, то полное ее название будет пространственная рама. К ней крепятся все элементы конструкции и декоративные элементы.

Пространственная рама изготавливается из труб различного сечения, представляется в виде каркаса, который сваривается или стягивается болтовыми соединениями. Отличается небольшой массой и высокими показателями по прочности.

Пространственная рама выполняется из металлической трубы. Так как каркас является одной из самых важных частей ММК, то данный элемент конструкции должен выдерживать все прикладываемые нагрузки. Поэтому важным является верный выбор типа трубы для производства рамы.

Вариантов деления труб на классы множество, каждый из них основан на одном из признаков (рисунок 3.1). Например, по диаметру они бывают:

- капиллярными, от 0,3 до 4,8 мм;
- малыми, от 5 до 102 мм;
- средними от 102 до 426 мм;
- большими, от 427 мм.

В зависимости от размера меняется пропускная способность и предел текучести, который характеризует максимально допустимую нагрузку.

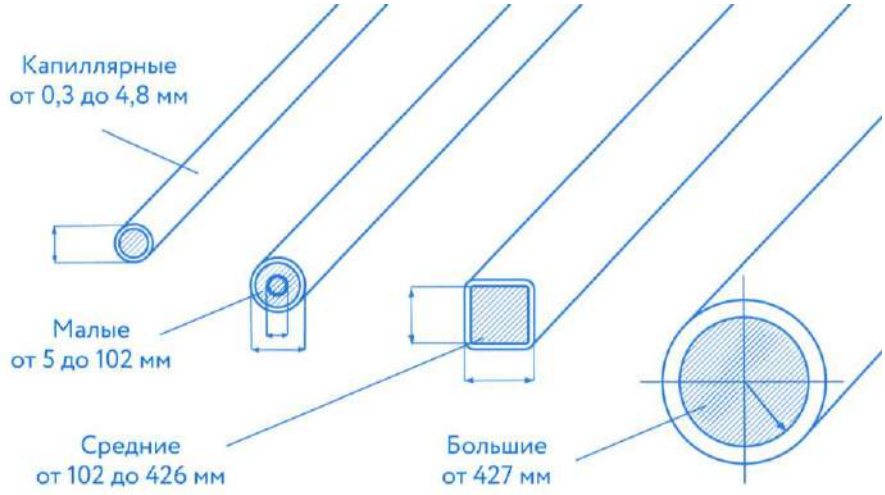


Рисунок 4.1 - Виды стальных труб в зависимости от диаметра

Помимо диаметра трубы можно классифицировать по профилю поперечного сечения — круглые, профильные и переменного сечения. У последних срез тоже круглый, но толщина стенок или диаметр по длине изделия неравномерные. По способу изготовления — сварные и бесшовные. По толщине стенок — от особотонкостенных до особотолстостенных: размеры зависят от способа производства.

Электросварные. Трубы со сварным швом, изготовленные из стального листа. Они бюджетные, с большой вариативностью размеров и толщины стенок. Поэтому их используют практически везде — от машиностроения до сельского хозяйства.

Процесс производства электросварных труб состоит из следующих этапов:

- Подготовка стального листа. Основу проглаживают и обрабатывают срезы, чтобы финальное изделие не было кривым и неустойчивым к повреждениям.
- Вальцевание. Лист формируют с помощью валиков до нужной формы.
- Сварка. Есть два варианта. Первый — контактный. В этом случае, края сами свариваются после соприкосновения. Второй — дуговой. Здесь для расплавления металла и соединения двух концов изделия используют дополнительный инструмент, электрическую дугу.
- Калибровка. Доведение готовой трубы до нужных размеров на специальном станке.
- Проверка на прочность. Перед отправкой в эксплуатацию электросварные трубы проходят гидравлические испытания или ряд цифровых тестов. Это позволяет убедиться, что в процессе работы они не развалятся.

Сделать электросварные трубы долговечнее помогает оцинкование, то есть нанесение цинкового покрытия на всю поверхность изделия. Оно защищает деталь от коррозии и особенно важно в случаях, когда деталь применяется для транспортировки воды.

Бесшовные. Как понятно из названия, у этих труб нет ни прямых, ни спиралевидных сварных швов по всей длине изделия. Это качество важно для транспортировки опасных веществ, нефти и газов под большим давлением — то есть там, где нужно исключить возможность протечки.

Производят их уже не из листов, а из металлических цилиндров. Есть два способа:

1 горячекатаный. Заготовку нагревают и с помощью сверла проделывают внутри отверстие нужного размера. Затем полученную гильзу отправляют на прокатный станок, где под действием валиков и ограничителя она вытягивается и принимает нужную форму;

2 холоднокатаный. Здесь также из шаблона через нагревание делают гильзу нужного диаметра. Но после снимают, остужают, очищают от загрязнений, покрывают составом, уменьшающим трение, и отправляют на калибровку уже в холодном виде. Процесс могут повторять несколько раз. В конце трубу шлифуют.

Изделия в итоге получаются разными, не только внешне, но и по характеристикам. Горячекатаные бесшовные трубы имеют диаметр от 28 до 530 мм и толщину стенок — от 2,5 до 75 мм [71, 72]. Они очень прочные, но покрыты окалиной, поэтому легче поддаются коррозии. Подходят для транспортировки нефти и газа, а вот для водяного пара, взрывчатых веществ и опасных химикатов — нет.

Холоднокатаные трубы же лёгкие и тонкие: диаметр — от 0,3 до 450 мм, толщина стенок — от 0,06 до 12 мм [73, 74]. За счёт очистки в процессе производства на них проще наносить защитные слои. Поэтому областей применения у них больше: химическая промышленность, медицина, энергетика, машиностроение и другие сферы.

Профильные. Это трубы с некруглым сечением — квадратным, прямоугольным, ромбовидным или овальным. За счёт необычной формы такие детали повышают прочность конструкции: чёткие рёбра обеспечивают надёжное

сцепление и устойчивость. Для большего усиления профильные изделия могут снабжать дополнительными армирующими слоями, например, из алюминия.

Это качество делает их особо востребованными в строительстве. Также такие трубы применяют для производства лестниц, заборов, каркасов, спортивных и детских площадок, деталей автомобилей и не только. Для газо- и водопроводов они используются редко.

Трубы с нестандартным сечением могут создаваться из готовых круглых деталей или из штрипсов — стальных лент. Формируют их горячекатаным и холоднокатаным методом. В зависимости от способа производства меняются характеристики изделия (таблица 4.2).

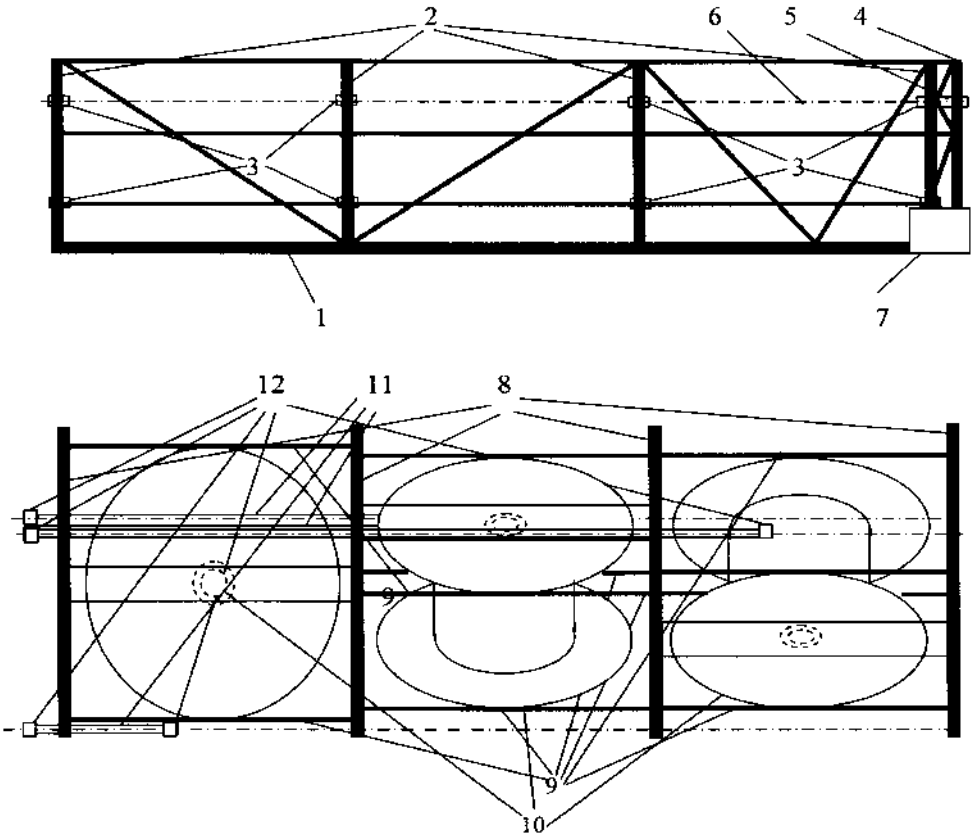
Таблица 4.2- Виды профильных труб по способу изготовления

Способ изготовления	Метод производства	Характеристики	Область применения
Горячекатаные бесшовные	Готовую бесшовную трубу нагревают и придают нужную форму с помощью валиков	У трубы получаются толстые стенки, которые способны выдерживать большое давление	В строительстве, например, для опорных колонн
Холоднокатаные бесшовные	Заготовка формируется на прессе после остывания	Стенки тонкие – до 5 мм, и одинаковые по всей длине изделия	Везде, где важна точность, например, в химической промышленности
Сварные из штрипсы	Из стальной ленты формируется цилиндр и сваривается шов. Затем на станке изделию придается необходимая форма	Дешевые в производстве и вариативные в размерах	Там, где давление на трубы невысокое. Например, для заборов или деталей мебели.

Выбор трубы для производства пространственной рамы должен быть обусловлен не только прочностными, но и экономическими показателями. Для

проведения анализа и выбора трубы для конструкции, необходимо знать размеры, нагрузку, форму, область применения пространственной рамы.

На рисунке 4.2 представлена схема крутильной машины, основу которой составляет пространственная рама.



1 – рама; 2 – опорные стойки; 3 – вращающиеся направляющие ролики; 4 – центральная опора; 5 – центра; 6 – ось всей конструкции; 7 – привод; 9 – скрепляющие планки; 8 – опорные кольца; 10 -центры вращения бухт; 11 – трубчатые направляющие; 12 – вращающиеся шкивы

Рисунок 4.2 -Крутильная машина с неподвижной (сверху) и подвижной (снизу) частями

Как можно заметить по схеме на рисунке 4.2 крутильная машина состоит из двух частей: подвижной и неподвижной. В обеих частях предлагается использовать профильную трубу прямоугольного сечения. Для соединения труб круглого сечения необходима большая подготовительная работа, которая заключается в верном измерении углов и радиусов надреза окончаний труб и последующие разрезы с высокой степенью точности. Низкая точность работ в такой конструкции способна привести к поломке или аварии, что не допустимо. Следовательно, для

обеспечения высокой точности работ необходимы работники с высокой специализацией в данной области. В свою очередь это приводит к повышению стоимости производства крутильной машины ММК.

Круглую трубу активно использует для построения пространственных рам и каркасов автомобилей, где основным видом нагрузок являются нагрузки на скручивание. Уход от стандартного круглого сечения и изменение конструктива труб позволило создавать трубный прокат повышенной прочности, благодаря внедрению дополнительных ребер жесткости. Профильные трубы квадратной, прямоугольной или овальной формы выдерживают повышенные статические нагрузки.

В крутильной машине ММК за вращение подвижной части отвечает электродвигатель, подача провода на место монтажа осуществляется посредством вращения барабана резиновыми роликами. Нагрузки на скручивание в данном комплексе исключены, остаются нагрузки от веса барабанов и небольшого сопротивления барабанов с проводами вращению на крепежных роликах. Статические нагрузки от веса барабана с проводами являются очень большими, поэтому от труб круглого сечения принято отказаться в пользу профильной трубы прямоугольного сечения.

Формирования заготовок из профильной трубы заключается в одном надрезе пилой по отметке указанной длины. После чего болтовым соединением или методом сварки происходит соединение заготовок.

Заготовки для пространственной рамы крутильной машины ММК следует выполнять методом сварки, так как присутствует большое количество подвижных частей, которые не должны встречать никаких препятствий при движении. При этом сварка обладает более высокими надежностью и прочностью, чем болтовое соединение.

Пространственная рама крутильной машины повторяет форму цилиндра. По размерам она должна вмещать три барабана с проводами. Кабельные барабаны — это один из самых недорогих кабельных тар, используемых при транспортировке кабеля и для его хранения. На сегодняшний день они могут выполнятся из дерева,

металла, пластика. В работе рассматривается самый популярный вид – деревянные барабаны (рисунок 4.3). Производство катушек для проводов выполняется по ГОСТ 5151-79 [75], поэтому в случае необходимости замены материала барабана на функциональность крутильной машины это не повлияет.

A – диаметр барабана; *B* – ширина барабана; *C* – диаметр шейки барабана; *D* – ширина шейки; *E* – диаметр отверстия для втулки

Рисунок 4.3 – Конструктивный вид барабана для проводов

Выбор барабана осуществляется по следующим параметрам: диаметр шейки барабана, катушки, центральной части контейнера, а также внутренний диаметр бухты должны быть не менее минимального допустимого диаметра изгиба изделия, установленного в стандартах или технических условиях на изделия [76]. По таблице 4.1 видно основные марки проводов используемых для ВЛ 6-10 кВ и соответствующие минимально допустимые радиусы изгиба. По ГОСТ 5151-79 [75] установлено, что для намотки проводов марок, указанных в таблице 4.1, подходят все стандартные марки барабанов.

Строительная длина указанных в таблице 4.1 марок проводов должна составлять не менее 3000 метров, если иное не требуется от заказчика [65, 66]. По ГОСТ 5151-79 [75] выбирается для сталеалюминевых проводов тип барабана 10, а для самонесущих изолированных проводов барабан типа 10 или 12. Для провода типа АС-50 необходимо рассчитать параметры для обоих типов барабанов, так как

диаметр провода подходит как для барабана типа 10, так и для барабана типа 12. Данные типы барабанов обладают одинаковой длиной шейки d = 500 мм, что позволит унифицировать место крепление барабанов в пространственной раме крутильной машины.

По [77] полная длина провода или кабеля в барабане высчитывается по формуле

$$Lo = \frac{k * \pi * (D^2 - d^2)}{4 * W^2}, \quad (4.1)$$

где Lo – общая длина провода в барабане;

k – длина шейка барабана;

D – диаметр щеки барабана;

d – диаметр шейки барабана;

W – диаметр кабеля или провода.

Вес провода, намотанного на барабан, вычисляется по [77]

$$G\text{п} = 1{,}02 * g_{\text{уд}} * \frac{Lo}{1000}, \quad (4.2)$$

где Gп – масса провода на барабане;

$g_{\text{уд}}$ – вес провода, необходимого для сооружения 1 км линии, кг;

1,02 – коэффициент, учитывающий потери.

Длины проводов на разных типах барабанов и их вес, суммарный вес проводов и барабана с учетом данных из таблицы 4.1 и ГОСТ 5151-79 [75], а также габаритные размеры указаны в таблице 4.3.

Как можно заметить, суммарный вес проводов АС-25, АС-35, АС-50, намотанных на барабан типа 10, находится в пределах 650 кг. При этом общая длина провода 5,7; 3,9 и 3 км соответственно. При выборе барабана типа 12 для провода АС-50 максимальная длина превышает 4 км, а суммарный вес более

860 кг. Поэтому предпочтительнее с проводами типа АС использовать барабаны типа 10 для использования в крутильной машине ММК.

Таблица 4.3 - Расчётные данные барабанов для крутильной машины

Марка провода	Тип барана	Длина провода на барабане, м	Вес провода, кг	Вес барабана, кг	Суммарный вес провода и барабана, кг	Ширина, мм	Высота, мм
АС-25	10	5798	593	56	649	600	1000
АС-35	10	3912	590,6	56	646,6	600	1000
АС-50	10	2995	595,7	56	651,4	600	1000
	12	4335	862,2	132	994,2	600	1200
СИП-3 1х35	10	1917	322,6	56	378,6	600	1000
	12	2774	466,9	132	598,9	600	1200
СИП-3 1х50	10	1633	364,7	56	420,7	600	1000
	12	2364	518,4	132	650	600	1200

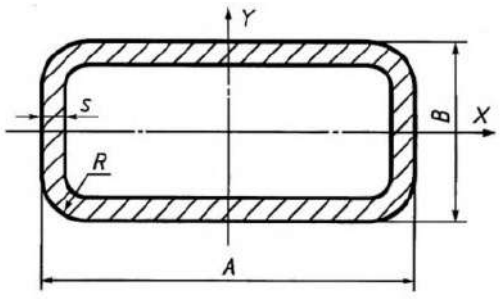
Провода СИП-3 имеют дополнительную изоляцию, поэтому их толщина существенно больше. На барабаны типа 10 СИП-3 1х35 максимально можно разместить 1,9 км, а СИП-3 1х50 – 1,6 км. Суммарный вес составит 322 кг и 365 кг. Для барабана типа 12, соответственно 2,8 и 2,4 км, а суммарный вес составляет 466 и 518 кг.

Исходя из полученных данных следует вывод, что вес одного барабана с проводом для ВЛ 6-10 кВ необходимо учитывать равным 700 кг. При этом необходимо заложить запас прочности в виде 30 % от расчётного веса.

После проведенных расчетов постановка задачи включает в себя следующие характеристики: масса одного барабана с проводами 900 кг, максимальные габаритные размеры барабана соответствуют типу 12 и составляют 1200 мм – диаметр щеки, 600 мм – ширина барабана; диаметр осевого вала для крепления барабана должен быть не более 50 мм. Для построения пространственной рамы необходимо использовать профильную трубу. Горячекатаная и холоднокатанная бесшовная профильная труба используется в местах с повышенным давлением, при этом размеры, вес и стоимость выше, чем у электросварной трубы.

Для расчета сторон трубы и толщины стенок (рисунок 4.4) необходимо провести предварительный расчет нагрузок на профильную трубу по [78, 79, 80]. Расчет и симуляция нагрузок будет проводиться в программном комплексе системы автоматизированного проектирования *SolidWorks* 2019 [81]. В таблице 4.4 занесены результаты расчета и моделирования профильных труб с различными параметрами сторон поперечного сечения и толщины самой трубы, такие как нагрузка, область деформации, высота прогиба, масса материала, а также стоимость на указанные трубы.

Предварительный расчет материала показал, что на подвижную и неподвижную части крутильной машины потребуется около 100 метров профильной трубы.



A – ширина профильной трубы; B – высота профильной трубы; s – толщина стенки профильной трубы; R – радиус изгиба углов профильной трубы

Рисунок 4.4 – Схема профильной трубы

Барабан с проводами помещается в подвижную часть пространственной рамы крутильной машины ММК краном сверху до момента, пока ось барабана не

будет находится на одном уровне с осью балки крепления. Балка крепления представляет собой лист металла из стали 09Г2С размерами 1300х200х10 мм, в центре отверстие для вала фиксации барабана с подшипником типа UCF-212, который закреплен болтами.

Подшипник UCF-212 — это подшипник в квадратном литом корпусе, имеющий четыре отверстия для крепления болтом М18-50 и гайкой.

Балка крепления с двух сторон соединена сваркой с профильной трубой. Получившаяся конструкция, похожая на букву «Н» крепится к каркасным опорным кольцам, формирующих цилиндрическую форму подвижной части. В свою очередь каждое из четырех опорных колец подвижной части опирается на 4 вращающихся направляющих ролика соответствующих опорных колец неподвижной части (рисунок 4.2).

Из описанной выше конструкции видно, что максимальная нагрузка будет приходится на стык балки крепления и промежуточной профильной трубы, соединенной с опорным кольцом, так как дальше нагрузка поделится пополам.

Необходимо учитывать, что барабан с проводами может находиться в трех основных положениях: в вертикальном, в горизонтальном и промежуточном под углом в 45 градусов. Очевидно, что максимальная нагрузка будет возникать при горизонтальном и вертикальном положениях. При вертикальном положении будет действовать вдоль профильной трубы в месте крепления с балкой крепления только 25 % от общей нагрузки, в то время как на саму балку крепления будет давить 50 % от общего веса.

Расчет нагрузки от фиксирующего вала в вертикальном положении, на котором закреплен барабан с проводами, представлен на рисунке 4.5. Максимальная нагрузка составляет 12.9 МПа, что в 18 раз меньше предела текучести стали 09Г2С. Смещение материала составит около 0,05 мм, поэтому можно сказать, что под максимальной нагрузкой балка крепления сохранит свои свойства и не деформируется.

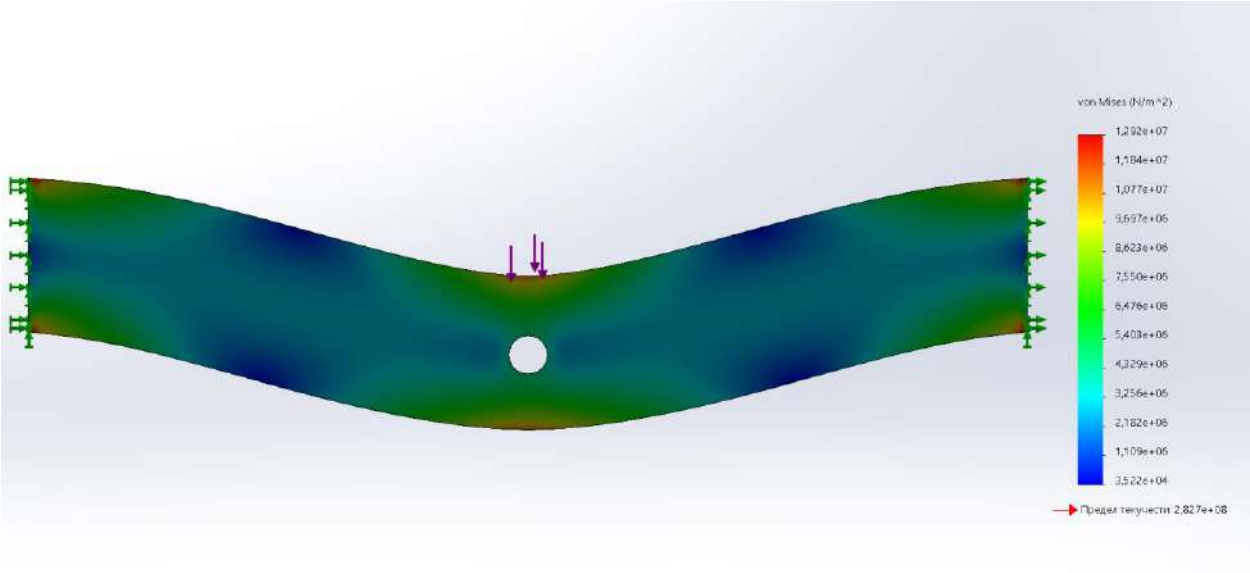


Рисунок 4.5 – Деформация от вала фиксации барабана с массой m = 900 кг

При горизонтальной нагрузке вдоль профильной трубы в месте крепления с балкой крепления будет действовать нагрузка в 50 % от общего веса барабана с проводами, так как из уравнения расчета нагрузки исключается одна сторона. В этот момент на балку крепления будет давить весь вес барабана с проводами.

Чтобы в горизонтальном положении барабан с проводами мог продолжать выполнять вращательные движения необходимо расположить между щекой барабана и боковым креплением типа «Н» вращательные ролики, которые распределят между собой нагрузку и практически исключат коэффициент трения. Подвижных роликов будет установлено в количестве двух штук на балке крепления, между профильными трубами так, чтобы барабан типа 10 и типа 12 могли одинаково опираться на них. Масса барабана будет распределяться на два ролика, от которых будет давить на балку крепления в двух точках. С обратной стороны балку крепления необходимо усилить ребрами жесткости, чтобы исключить необратимую деформацию металла (рисунки 4.6, 4.7). Такое усиление позволило снизить максимальную нагрузку в углах крепления до 81 МПа, в то время, когда на основной части нагрузка не превышает 50 МПа, прогиб удалось уменьшить с 17 мм до 0,6 мм. Балка крепления в свою очередь будет создавать разрывное усилие в промежуточной профильной трубе.

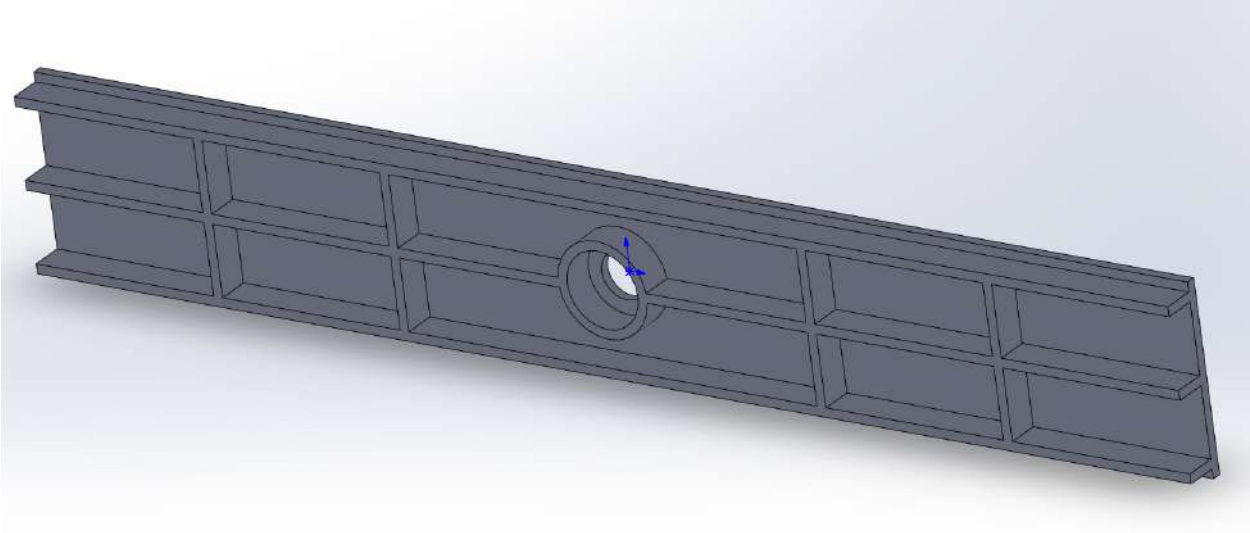


Рисунок 4.6 – Усиление балки крепления ребрами жесткостями

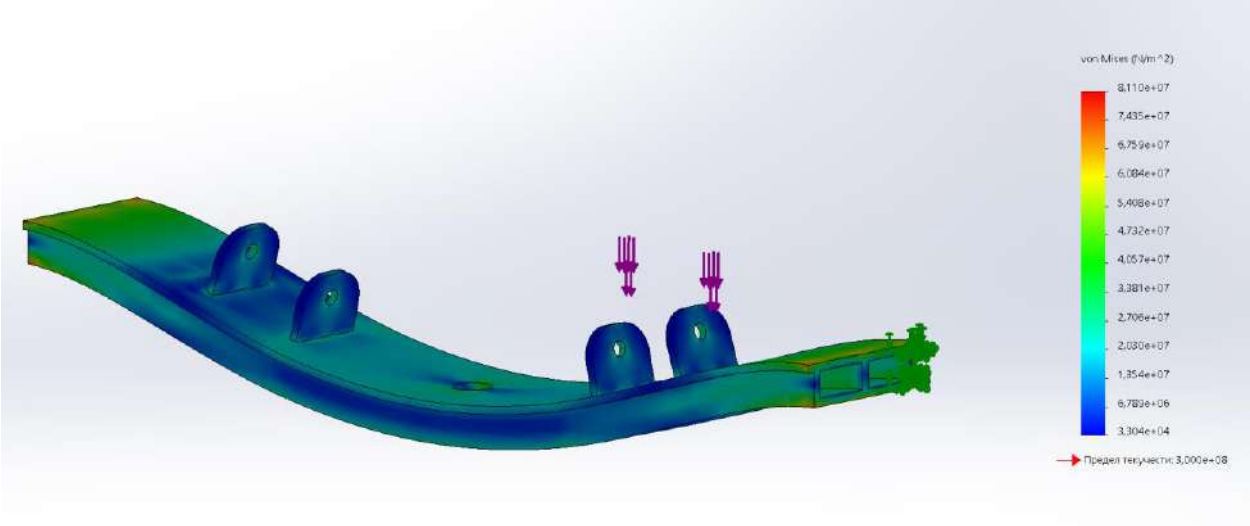


Рисунок 4.7 – Симуляция максимальной нагрузки на балку крепления при массе барабана m = 900 кг

В таблице 4.4 внесена информация максимальной нагрузки на промежуточную профильную трубу для горизонтального положения барабана с проводами при максимальном расчетном весе m = 900 кг и проведена симуляция сборочной модели балки крепления и промежуточной профильной трубы из стали 09Г2С при горизонтальном положении барабана также при максимальном весе

m = 900 кг (рисунок 4.8). Длина промежуточной профильной трубы в этом месте составляет 1300 мм, крепление балки крепления находится посередине трубы.

Таблица 4.4 - Предварительный расчет профильных труб

Параметры профильной трубы, мм			Максимальная нагрузка, МПа	Максимальное смещение материала от нагрузки, мм	Масса 1 м, кг	Масса 100 м, кг	Стоимость 100 м трубы, руб.
A	B	S					
40	30	2	247	4,3	2,02	202	7544
		4	153	2,6	3,68	368	13744
	40	2	200	3,48	2,31	231	10833
		4	120	2,1	4,2	420	18858
60	30	3	96	1,18	3,83	383	17388
		5	69	0,8	5,94	594	31000
	40	3	80	1	4,3	430	19522
		5	55	0,65	6,73	673	25100
	60	2	92	1,1	3,56	356	16696
		4	50	0,6	6,71	671	30127
		6	32,5	0,35	9,45	945	42430
80	50	3	48	0,45	5,72	572	21400
		4	375	0,35	7,44	744	27800
	60	5	28	0,26	9,87	987	36900
		7	22	0,2	13,19	1329	49300
	80	6	21	0,19	13,21	1321	59312
		8	18	0,15	16,36	1646	69000

**Цены актуальны на август 2023 года в московском регионе*

Основными марками стали для производства профильных труб являются Ст3пс и 09Г2С. Предел текучести для Ст3 – 240 МПа по ГОСТ 535-2005 [82], для 09Г2С – 295 МПа по ГОСТ 19281-2014 [83]. Как видно из таблицы 4.4 оптимальными параметрами нагрузки обладают профили 60х30 и 60х40 с толщиной стенки от 3 до 5 мм. Выбирать квадратную профильную трубу 60х60 не рационально, так как при схожей максимальной нагрузке и прогибе она будет занимать много места в опорном кольце крутильной машины. По этой же причине необходимо отказаться от профильных труб большего сечения.

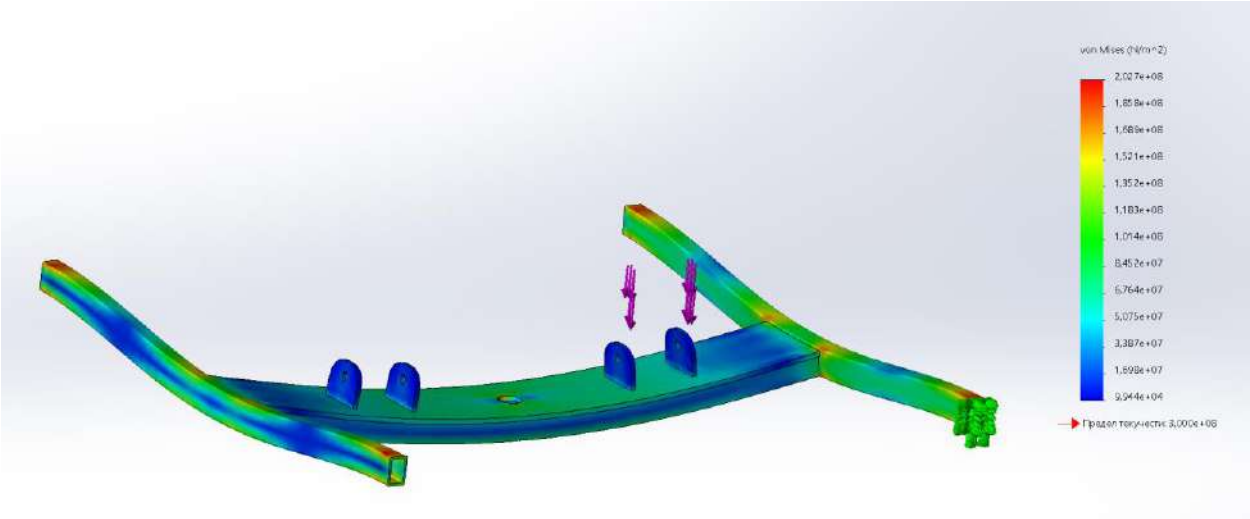


Рисунок 4.8 – Симуляция сборочной модели балки крепления и промежуточной профильной трубы из стали 09Г2С при горизонтальном положении барабана с проводами m = 900 кг

С экономической точки зрения также выгоднее взять профильную трубу 60х30 или 60х40 с толщиной стенки не менее 3 мм. Для исключения вероятности разрыва сварного шва от высокой нагрузки следует использовать холоднокатаную или горячекатаную профильную трубу.

Главный и существенный недостаток труб профильного типа – коррозия, которой подвергаются все металлические изделия. Этот «минус» может нарушить эксплуатационные характеристики профильных труб. Но в данном случае, эту проблему можно решить путем применения технологии оцинкования, благодаря чему срок службы изделий увеличивается в разы.

Тонкий равномерный слой цинка защищает поверхность изделия от окисления, возникающего при контакте с внешней средой. Это может вызвать ржавчину и в конечном итоге полностью разрушить металл. Цинк под воздействием кислорода покрывает его оксидной пленкой, которая предотвращает окисление подложки и, следовательно, повреждение.

Существует два способа нанесения цинка, а именно: горячее и холодное цинкование. В первом случае очищенную трубу опускают в ванну с расплавленным цинком на 5-10 минут. После чего изделие вынимается и сушится. Достоинствами является хорошее качество покрытия и долгий срок службы. Недостатки – большие

энергозатраты на поддержание высокой температуры ванны с цинком, сложность обработки объектов больших размеров, небезопасность рабочей среды как для человека, так и для окружающей природы.

Во втором варианте цинк наносится посредством распылителя, что позволяет выполнять эти работы без организации сложных автоматизированных линий. Достоинствами является простота и стоимость, а также способность обрабатывать сложные изделия. Недостатками являются низкая скорость работы и качество покрытия, которое напрямую зависит от рабочего.

Дальнейшая сварка оцинкованных изделий сопряжена с большими трудностями, но все же можно использовать специальные электроды, позволяющие скрепить металл до выгорания цинкового покрытия. Дополнительно иногда используются специальные флюсы, поглощающие избыточное тепло. Поэтому в процессе сварки флюс испаряется, а цинковое покрытие остается неповрежденным [84].

Выбирая профильную трубу с размерами 60х40х5, барабан для проводов типа 12, была построена модель подвижной части крутильной машины ММК (рисунок 4.9).

Как можно увидеть, 3 блока для крепления трех барабанов типа 12 с проводами соединены друг с другом под углами 60 градусов методом сварки. Барабаны опираются на вращающиеся ролики, находящиеся с каждой стороны от барабана и закрепленные на балке крепления, которая вместе с промежуточной профильной трубой образуют крепление типа «Н» (рисунок 4.10). Крепление типа «Н» приварено к опорным кольцам. Барабан подвешен на фиксирующем валу диаметром 50 мм, который расположен в четырех подшипниках типа UCF-212 через проставочные цилиндры. Закрепление фиксирующего вала происходит болтом М16х90 и гайкой М16 через закаленную шайбу к проставочному цилиндру. Крепление проставочного цилиндра с внутренней частью каждого подшипника UCF-212 происходит двумя винтами М10х8 с шестигранным углублением. Крепление подшипников UCF-212 происходит попарно через сквозные отверстия четырьмя болтами М16х120 и четырьмя гайками М16 через шайбу (рисунок 4.11).

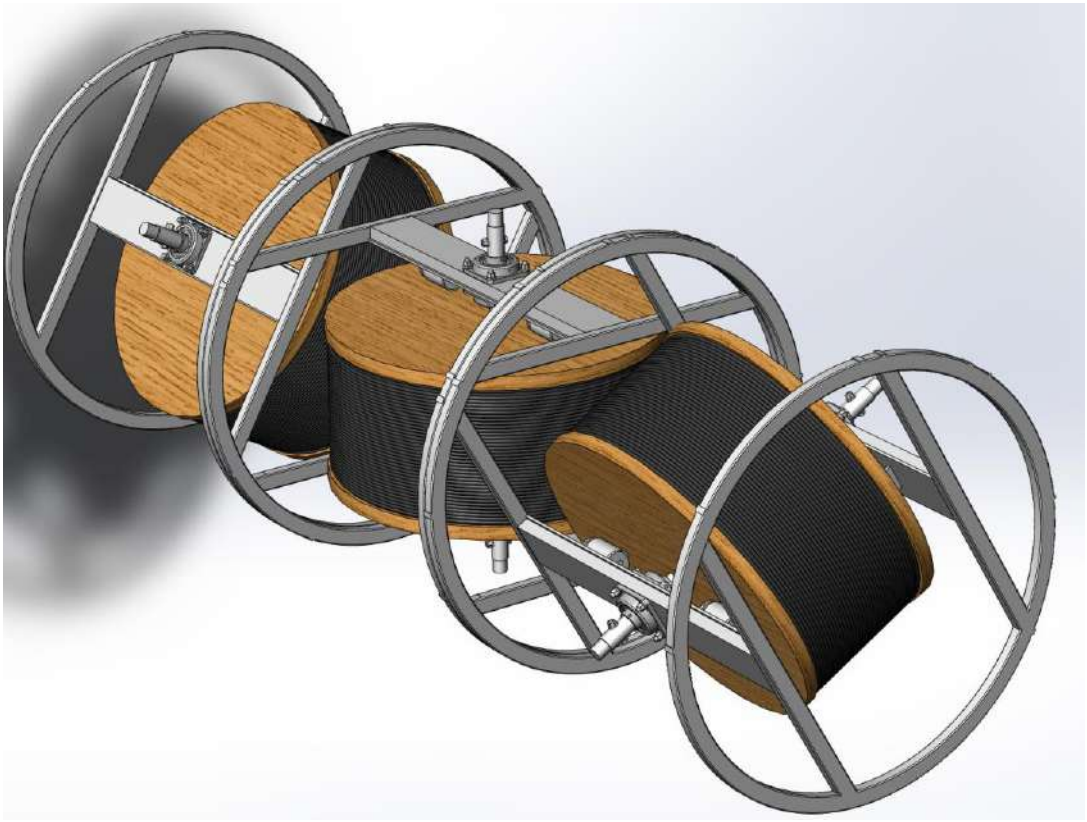
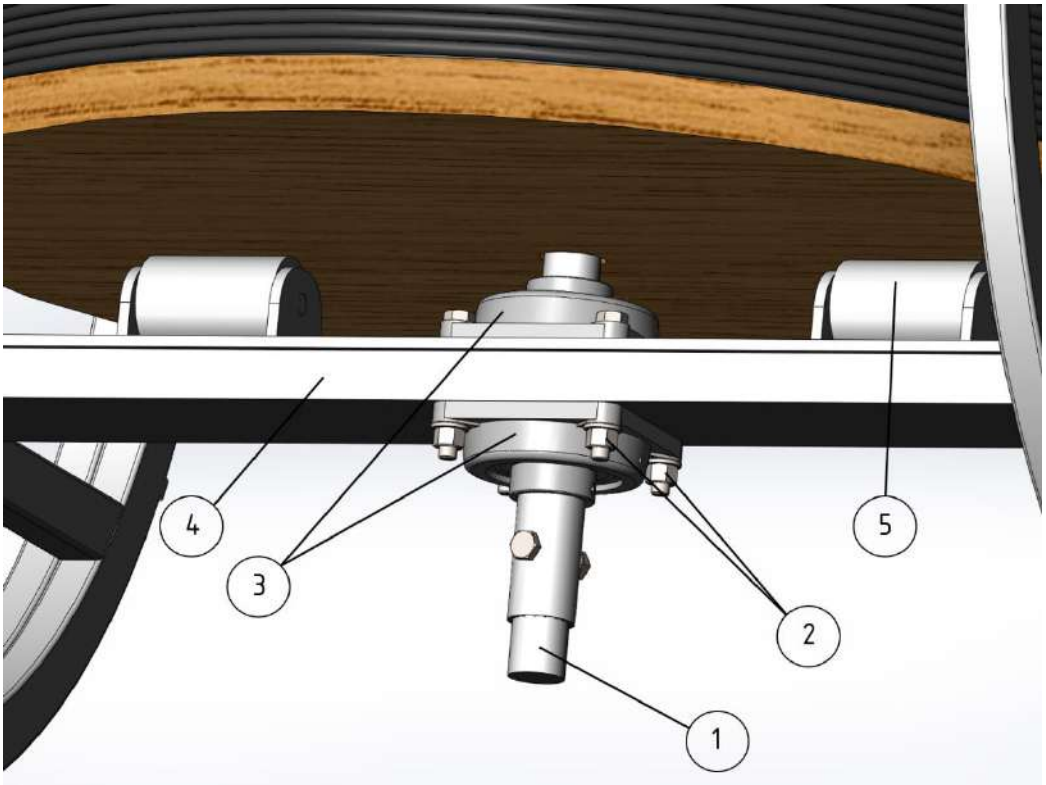
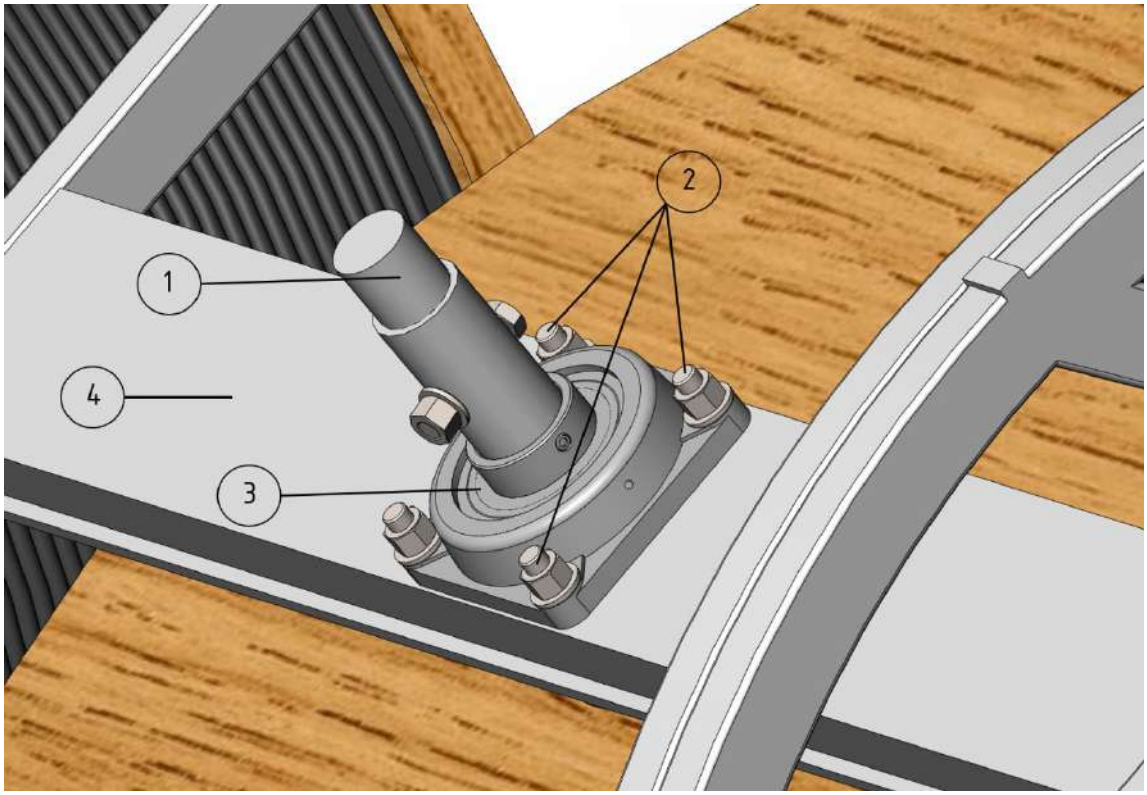


Рисунок 4.9 – Модель подвижной части крутильной машины ММК



1 - вал фиксации; 2 - подшипник UCF-212; 3 - болты крепления;
4 - балка крепления Н-типа; 5 - вращающиеся ролики

Рисунок 4.10 – Вид на внутреннюю сторону боковой части секции крутильной машины



1 - вал фиксации; 2 - подшипник *UCF*-212; 3 - болты крепления; 4 - балка крепления Н-типа

Рисунок 4.11 – Вид на внешнюю сторону боковой части секции крутильной машины

В ходе исследования выявлено, что:

1 крутильная машина состоит из подвижной и неподвижной частей;

2 подвижная часть состоит из опорных колец, формирующих три блока для барабанов с проводами;

3 вместимость подвижной части составляет три барабана типа 10 или 12 с проводами марок из таблицы 4.1 максимальной массой с учтём запаса прочности m = 900 кг;

4 каждый барабан удерживается двумя балками крепления из листового металла, которые располагаются с двух сторон и крепятся к промежуточной профильной трубе;

5 максимальные нагрузки на промежуточную профильную трубу и балку крепления будут возникать при нахождении барабана с проводами в горизонтальном положении при максимальной расчетной массе m = 900 кг;

6 чтобы конструкция сохраняла целостность, балка крепления выполнена с ребрами жесткостями, а промежуточная профильная труба должна быть выполнена с сечением 60х30 или 60х40 с толщиной стенки не менее 3 мм. Желательно использовать горячекатаную или холоднокатаную профильную трубу;

7 для указанных моделей было проведено 3D-моделирование, все элементы успешно прошли статистический расчет и симуляцию нагрузок в программе автоматизированного проектирования SolidWorks.

4.1.2 Манипулятор для комплекса

Для подъема проводов от крутильной машины до места крепления на опоре ММК необходим многозвенный механизм с приводами в каждом сочленении – манипулятор. Обычно манипулятором управляет оператор, который передвигает груз непосредственно, либо при помощи дистанционного управления. В качестве приводов используются электрическое и гидравлическое оборудование [85]. Манипулятор, который монтируется на подвижную платформу (автомобиль, гусеничная техника, рельсовую тележку, плавательное средство) называется краноманипуляторная установка (КМУ). Использование КМУ более эффективно, так как нет необходимости в привлечении к работам дополнительной техники для погрузо-разгрузочных работ.

Монтаж ВЛ с помощью ММК будет производиться с полевой стороны от железнодорожных путей при монтаже ВЛ вблизи опор контактной сети или непосредственно на опорах контактной сети. Также допускается возможность монтажа ВЛ посредством ММК на опорах, не связанных каким-либо образом с контактной сетью. В любом случае необходимо знать максимально возможное расстояние, которое образуется между выходами проводов из крутильной машины и местами крепления на опорах.

Наихудшие условия работы будут возникать при производстве монтажных работ с полевой стороны от железнодорожного полотна, выполненного на песчано-

щебневой насыпи. В этом случае общая высота от основания земли $H_{общ}$ до мест крепления будет складываться из высоты опоры (рисунок 4.12) и высоты насыпи (рисунок 4.13)

$$H_{общ} = H_o + H_д, \quad (4.3)$$

где H_o – высота опоры;

$H_д$ – высота насыпи с учетом откоса.

Расстояние от земли до мест крепления ВЛ на опорах контактной сети составляет (рисунок 4.12) [86]

$$H_o = h_{пр1} = h_{пр2} = 9 \dots 11 \text{ м},$$

Высоту насыпи будем рассматривать H = 3 м (рисунок 4.13). При этом необходимо учитывать ширину откоса насыпи путей. В нашем случае длина откоса между точками M и N будет равна

$$H_д = H * m, \quad (4.4)$$

По СП 32-104-98 [87] m = 1,5, тогда

$$H_д = 4{,}5 \text{ м}.$$

В итоге, подставляя полученные значения в (4.3), получим:

$$H_{общ} = 11 + 4{,}5 = 15{,}5 \text{ м}.$$

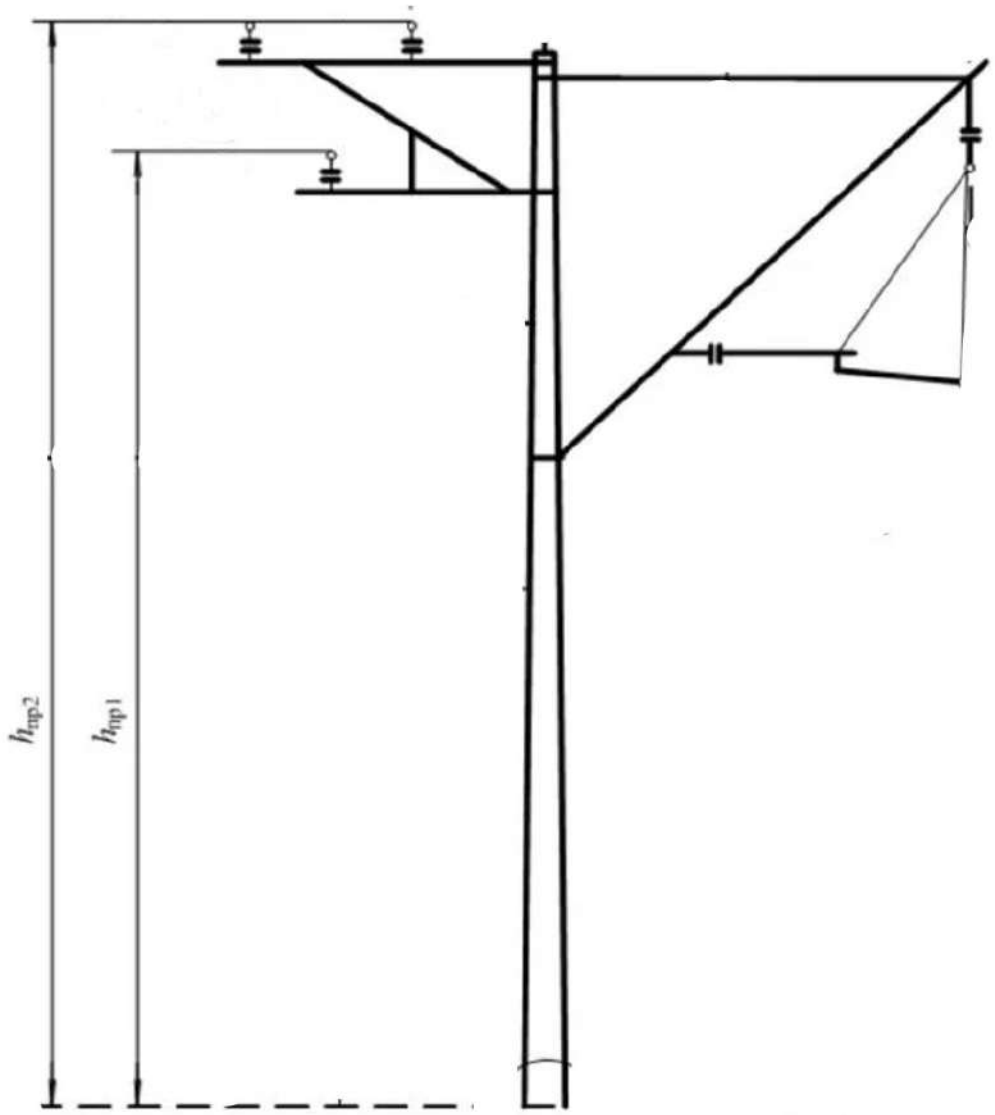


Рисунок 4.12 – Опора контактной сети

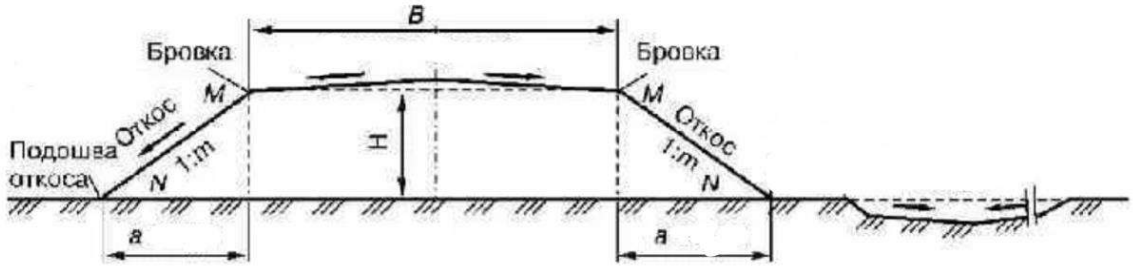


Рисунок 4.13 – Схема насыпи

Чтобы выбрать максимальную длину выдвижения манипулятора необходимо рассчитать рабочую высоту точек крепления проводов $H_{раб}$. Рабочая высота – расстояние от места крепления первого сочленения манипулятора до места крепления проводов с учетом некоторого запаса по длине. Запас длины необходим для возможных отклонения от курса следования монтажных работ или при непредвиденных увеличениях расстояния до мест крепления.

$$H_{\text{раб}} = H_{общ} - h_{\text{к}} + h_{\text{з}}, \tag{4.5}$$

где $h_{\text{к}}$ – высота места крепления сочленения манипулятора над землей;

$h_{\text{з}}$ – запас длины манипулятора.

На рисунке 4.14 приведена схема с габаритными размерами типового серийного грузового автомобиля КАМАЗ 65115 с установленным КМУ. По этой схеме видно, что высота до первого подвижного плеча манипулятора складывается из высоты базы автомобиля от земли и примерно высоты борта автомобиля, которая равна $h_{\text{к}}$ = 2100 мм = 2,1 м. Так как данные КМУ и грузовой автомобиль КАМАЗ 65115 являются типовыми и серийными, то для дальнейших расчетов можно принять $h_{\text{к}}$ за универсальную высоту места крепления сочленения манипулятора над землей.

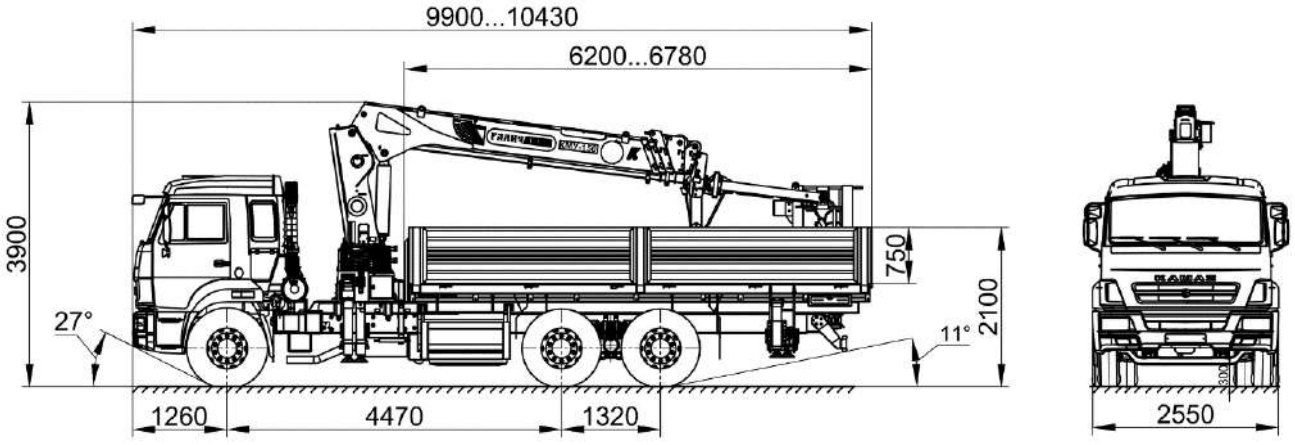


Рисунок 4.14 – Габариты манипулятора КМУ-150 на базе автомобиля КАМАЗ 65115

Запас длины манипулятора выбирается $h_з$ = 2,4 м. Тогда, подставляя найденные значения в (4.5), получается

$$H_{раб} = 15{,}5 - 2{,}1 + 2{,}4 = 16 \text{ м}. \quad (4.6)$$

Манипулятор состоит из стрелы, рабочего органа, органов и системы управления, рамы для опоры.

Рабочий орган в ММК представляет собой совокупность нескольких устройств, совмещенных на конце стрелы для совместной работы. Этими устройствами являются:

- устройство подхвата провода после крутильной машины;
- устройство натяжения провода до необходимой стрелы провеса;
- устройство крепления провода к опоре.

Суммарный вес рабочего органа с учетом нагрузки от натяжения провода не превышает 200 кг.

Органы управления манипулятором выполняются заводом изготовителем манипулятора и в ММК будут использоваться для запуска автоматической системы монтажа проводов, а также для ручного управления ММК в необходимых для этого ситуациях. Основное управление ММК, и, в частности, манипулятором, будет производиться автоматической системой управления с замкнутой обратной связью, которая включает в себя систему датчиков, электроприводы, исполнительные устройства и программу управления с необходимым алгоритмом.

Раму для опоры необходимо спроектировать таким образом, чтобы установку манипулятора можно было производить на разные стороны базы. Базой выступает полуприцеп необходимой конструкции, который будет выбран в разделе ниже.

Стрела манипулятора – элемент, позволяющий удерживать, осуществлять подъем, спуск, перемещение объектов. По способу складывания стрелы все существующие КМУ подразделяют на:

- *L* – образная форма;
- *Z* – образная форма.

L-образная форма. *L*-КМУ состоит из прямой стрелы телескопического типа, имеющей в составе подъемный крюк (рисунок 4.14).

Преимуществами *L*-КМУ являются: равномерно распределенная между осями авто масса; более высокая производительность при больших выносах стрелы (6-8 м) в сравнении с Z-образной формой; высокая точность перемещения грузов; способность перемещать грузы через объекты и опускать их ниже оси опоры; высокое качество работы в узких местах.

Недостатками *L*-образной формы КМУ являются: небольшой полезный объем кузова; транспортировочное положение стрелы находится над кузовом, что мешает перевозке крупногабаритных объектов; небольшой объем перемещаемых грузов.

Z – образная форма. *Z*-КМУ имеет шарнирное сочленение деталей, благодаря чему стрела способна складываться несколько раз (рисунок 4.15).

Преимущества *Z*-образной КМУ: компактные размеры; сложенное состояние не затрудняет использование полезного объема кузова; трехосное сочленение позволяет осуществлять перемещение грузов в труднодоступные места; обладает большей эффективностью при работе с крупногабаритными объектами.

Недостатки *Z*-образной конструкции КМУ: необходимо дополнительно пространство для складывания/раскладывания стрелы; большой вес конструкции.

Важной характеристикой манипулятора является грузовой момент, так как вынос стрелы определяет массу перемещаемого груза. В этом случае стрела играет роль рычага. Например, по рисунку 4.15 можно увидеть, что для КМУ модели *Epsilon Q150L104* (Австрия) при вылете стрелы в 10 метров допустимая нагрузка составляет 1250 кг, что в 3,5 раза меньше максимального допустимого веса груза при работе с вылетом стрелы равным 3 метра.

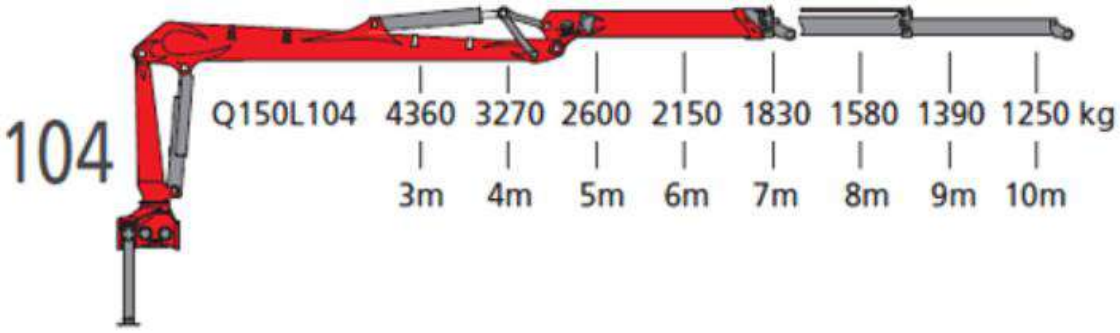


Рисунок 4.15 – Допустимая масса груза, зависящая от вылета стрелы КМУ *Epsilon Q150L104*

По показателю грузового момента КМУ делятся на легкие (до 4 т), средние (4-30 т), тяжелые (30-150 т).

При интегрировании *L*-КМУ в ММК минусы для грузового авто становятся не актуальными, так как отсутствуют габаритные грузы. Выше точность позиционирования по сравнению с *Z*-образной конструкцией.

Исходя из вышеописанного необходимо подобрать манипулятор телескопического *L*-типа, легкого класса, с максимальным вылетом стрелы 16 (±1) метров. Дополнительно стоит учитывать стоимость манипулятора с необходимыми доработками и техническими изменениями для интегрирования в ММК, ремонтопригодность, доступность запасных частей для своевременного планового ремонта и возможность быстрого ремонта в случае экстренного выхода из строя частей манипулятора.

С учетом всех указанных требования для ММК подходят следующие серийные модели КМУ:

- КМУ-150 (рисунок 4.14);
- АНТ 20-5ТЛ (рисунок 4.16);
- *Dongyang SS1956* (рисунок 4.17);
- *HIAB 190TM* (рисунок 4.18).

Основные характеристики выбранных КМУ представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Краткие характеристики КМУ для ММК

Модель	Максимальная длина вылета стрелы Lmax, мм	Допустимая нагрузка при Lmax, кг	Масса, кг	Минимальная длина в сложенном состоянии, мм	Стоимость, руб	Страна изготовитель
КМУ-150	19000	300	3000	4600	3 375 000	Россия
АНТ 20-5ТЛ	20300	350	3970	5120	3 520 000	Россия
Dongyang SS1956	19300	550	3300	4750	4 519 500	Корея
HIAB 190TM	19400	440	3250	5160	3 858 300	Корея

Все указанные КМУ имеют гидравлический тип привода.

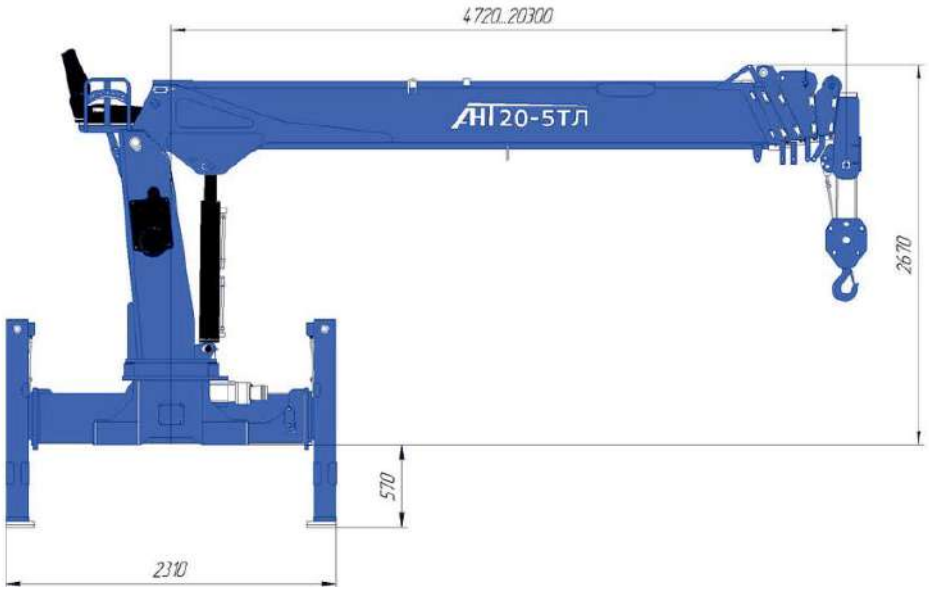


Рисунок 4.16 – Общий вид КМУ АНТ 20-5ТЛ

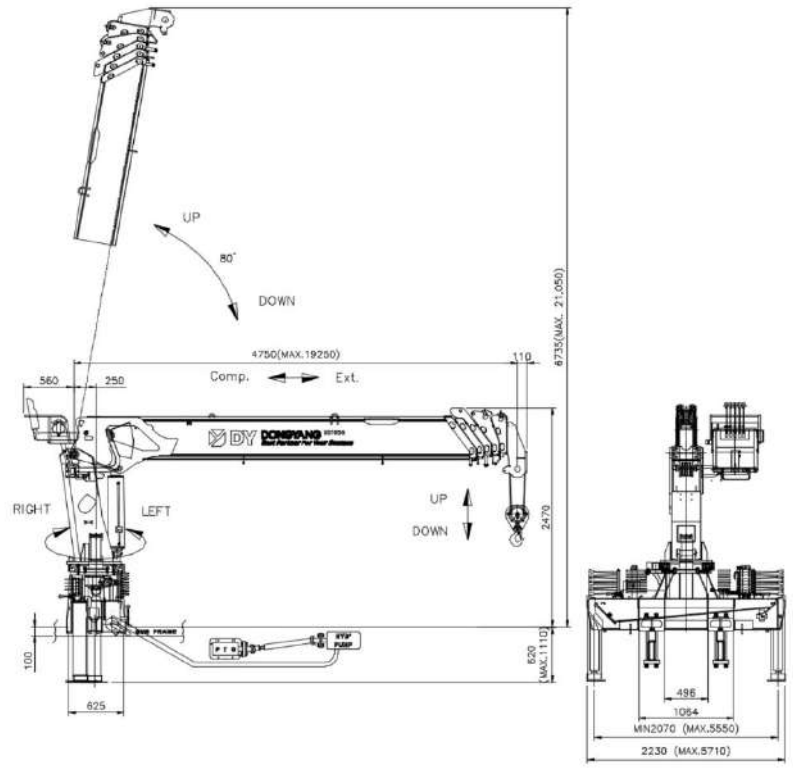


Рисунок 4.17 – Общий вид КМУ *Dongyang SS1956*

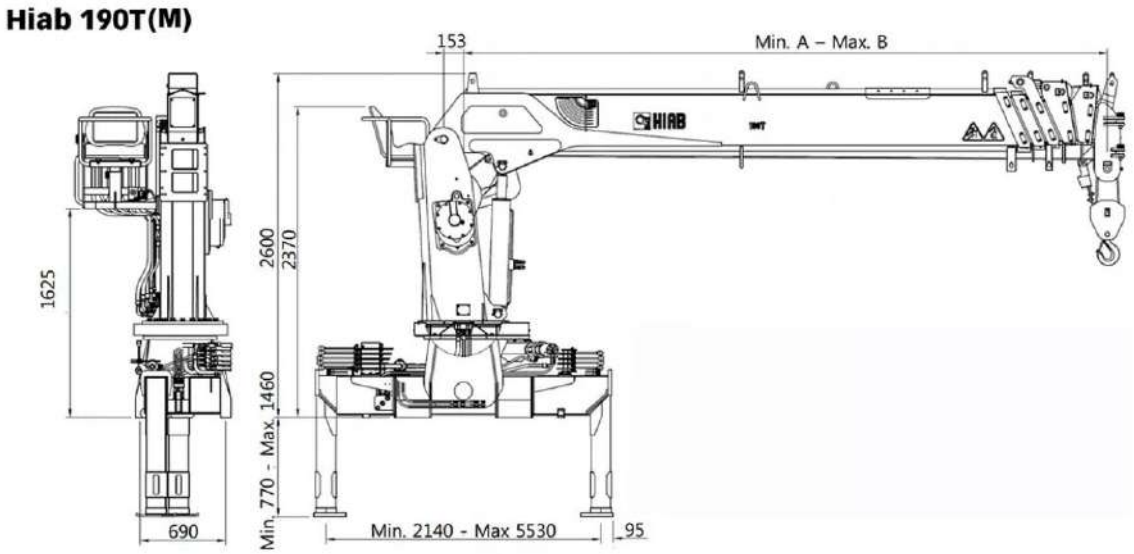


Рисунок 4.18 - Общий вид КМУ *HIAB 190TM*

Общие виды на рисунках 4.14, 4.16-4.18 представлены для наглядного понимания размеров и устройства КМУ в составе ММК.

4.2 Устройство межпролетного натяжения проводов

Перед закреплением на опоре необходимо провести правильное натяжение провода. В этом поможет устройство для автоматического межпролетного натяжения проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с использованием мобильного монтажного комплекса, базирующегося на мобильной платформе (ММК).

Данное изобретение является рядом устройств, позволяющим осуществить автоматизацию и комплексную механизацию работ по строительству конструктивно сложных воздушных высоковольтных линий электроснабжения как на отдельно стоящих опорах, так и с использованием опор контактной сети железной дороги, электрифицированной на переменном токе.

Как описывалось ранее для монтажа проводов комплекс имеет манипулятор, выполняющий монтаж и перемещение проводов от барабанов с проводами, расположенных на платформе ММК, к изоляторам на опоре.

В качестве прототипа выступает система натяжения проводов [88 § E 23-3-21].

В режиме транспортировки комплекса от опоры к опоре должно происходить постоянное подтормаживание бухт для равномерной раскладки проводов по трассе с поворотом крутильной машины на 60°. Эта функция должна выполняться бригадой монтажников или автоматизированным устройством торможения и натяжения подвешиваемых проводов.

На ММК так и без ММК технология монтажа проводов воздушной линии продольного электроснабжения на изоляторы с последующим натяжением до нормируемой стрелы провеса выполняется бригадой монтажников вручную с помощью таких инструментов как ручные рычажные лебедки (рисунок 4.19) и разного рода зажимы (рисунок 4.20).

Рисунок 4.19 – Ручные рычажные лебедки ЛР-1,2 и ЛР-1,6

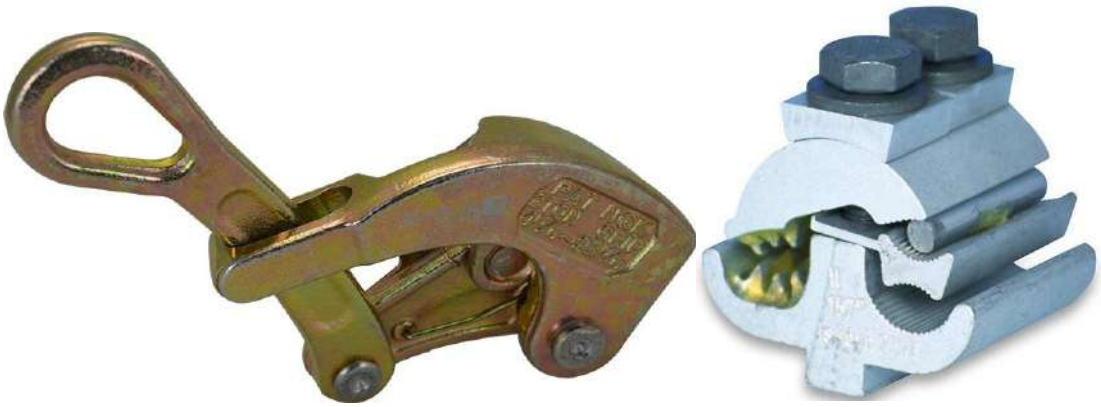


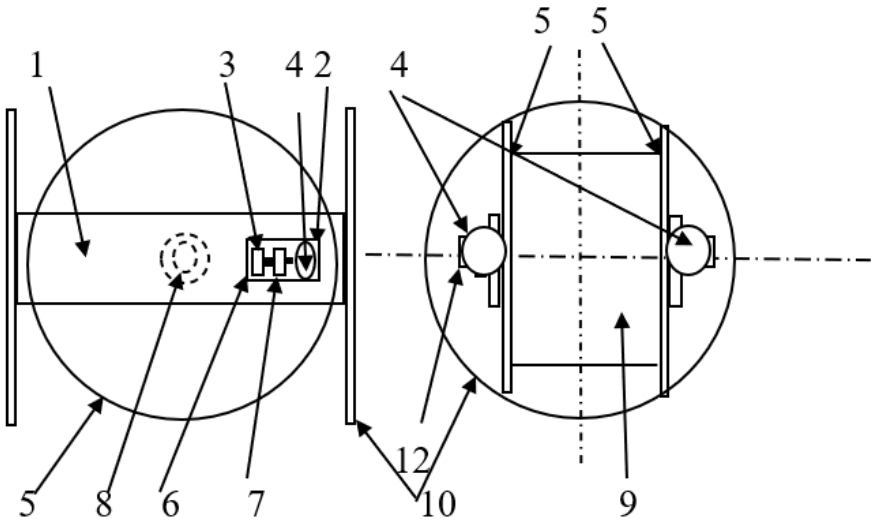
Рисунок 4.20 – Зажим типа «Лягушка» и прокалывающий зажим

Использование автоматизации монтажа провода на изолятор без применения ручного труда способствует увеличению производительности труда при строительстве линии. Такая технология монтажа позволяет значительно сократить время на производство строительных работ. Предлагаемое устройство торможения и натяжения провода в ММК устанавливается по два комплекта на каждый барабан, по одному устройству на каждую щечку барабана с проводом. Это позволяет обеспечить технологические нормативы монтажа в автоматическом режиме без применения ручного труда. Так, при производстве работ манипулятором, производится подтормаживание барабана для выравнивания укладки провода. Подтормаживание барабана с проводом осуществляется при помощи подачи пониженного напряжения на электродвигатель. Электродвигатель включен в реверсивном режиме по отношению к вращению бухт при движении. После

подъема и установки провода в седло изолятора устройство торможения и натяжения провода включает функцию натяжения подвешенного провода до технологического натяжения.

Устройство торможения и натяжения провода (рисунок 4.21) представляет собой ряд конструктивных элементов, выполняющих заданную программу путем подачи напряжения на электродвигатели, которые включены на реверсивный режим вращения по отношению направления разматывания провода при движении по трассе.

Фрикционами (4) передается движение от электродвигателей (3) и редукторов (7) на щечки (5) барабана с проводом (8). Провод подматывается на бухту (8). Технологическое натяжение провода контролируется динамометрическими устройствами (рисунок 4.22), расположенные на концах трубчатых направляющих (4). После выключения функции натяжения производится фиксация провода и положения бухты включением тормозов (12). Тормоза останавливают вращение фрикциона с помощью электромагнитного привода (рисунок 4.21). Установленный провод в седле изолятора фиксируются клином в неподвижном положении.



1 – осевые опоры; 2 – окно; 3 – коллекторный двигатель; 4 – прижимные фрикционы; 5 – щечки барабана; 6 – плата; 7 – редуктор; 8 – ось вращения барабана; 9 – барабана с проводом; 10 – центрирующая пружина ; 12 – электромагнитный тормоз фрикциона

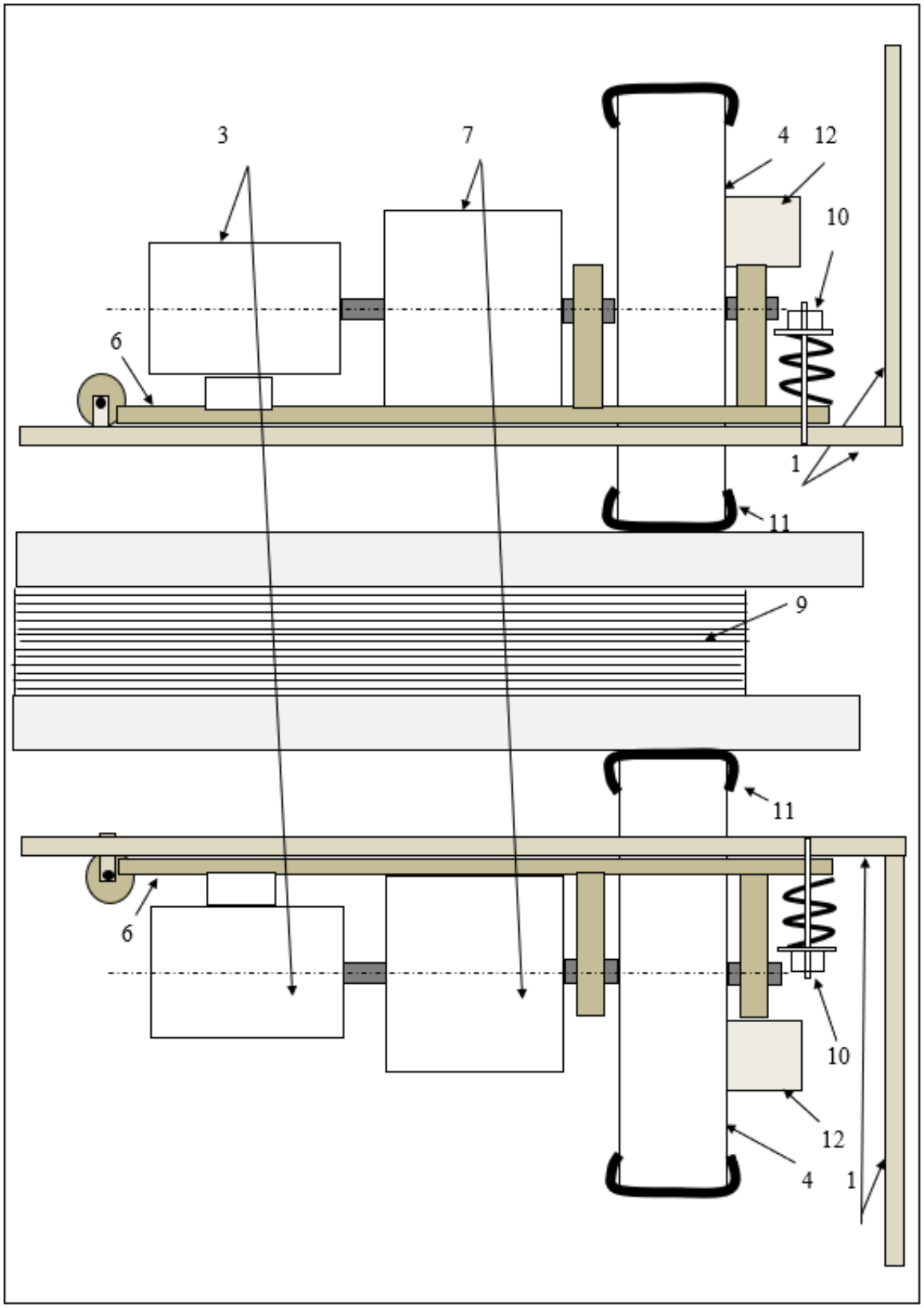
Рисунок 4.21 - Устройство торможения и натяжения провода

На рисунке 4.21 обозначены элементы устройства торможения и натяжения провода: осевые опоры (1), между которыми расположена ось (8) и вращающейся бухта с проводом (9), окно (2), на осевой опоре (1), позволяет создать прижим фрикциона (4) к щечкам (5) бухты с проводом (9). Преобразование электрического сигнала управления в механическое движение осуществляется реверсивным коллекторным электродвигателем (3) с редуктором (7) с возможностью изменения скорости вращения согласно заданной программы управления ММК. На плате (6) установлены двигатель (3), редуктор (7) с фрикционом (4).

На рисунке 4.22 изображено устройство торможения и натяжения провода и его конструктивное решение на барабане с проводом ММК, при этом нумерация элементов продлена с рисунка 4.21: плата (6) с установленными элементами устройства крепится к осевой опоре (1) с одной стороны, а для центровки фрикциона (4) с резиновой обоймой (11) центруется пружиной (10) к барабану с проводом (9). Окончание натяжение провода фиксируется электромагнитным тормозом фрикциона (12).

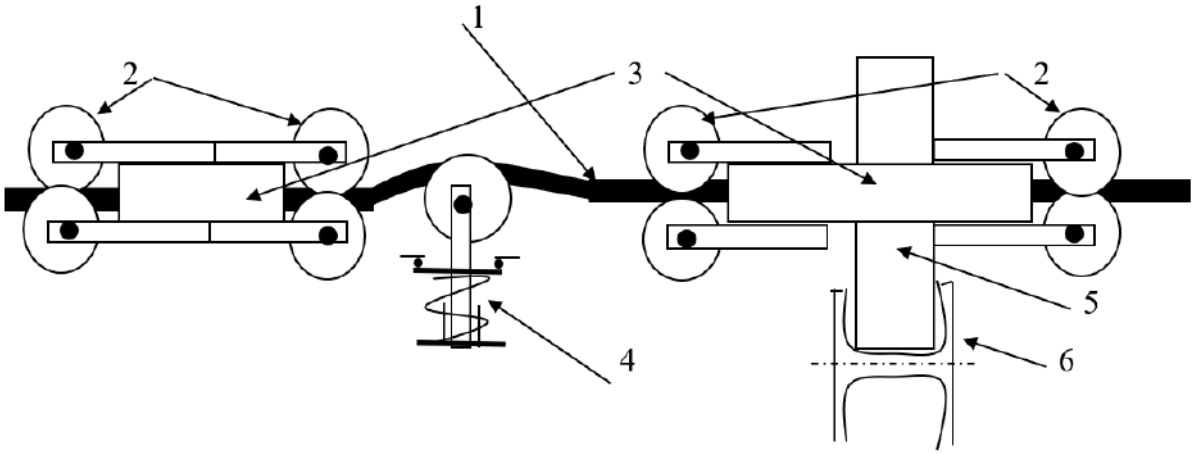
На рисунке 4.23 показано технологическое натяжение провода , которое контролируется динамометрическими устройствами, расположенными на выходах проводов с бухт на элементы динамометрического устройства: провод монтируемый на опоры (1), направляющие шкивы перемещения монтируемого провода (2), трубчатые направляющие защищающие от повреждений провода (3), динамометрический выключатель натяжения (4), опорное кольцо(5), пассивные шкивы перемещения опорного кольца крутильной машины(6).

При достижении заданного уровня натяжения провода, провод в изгибе выравнивается, пружина сжимается, и контакты разрывают цепь питания электродвигателя натяжения провода. Установка уровня натяжения провода производится с помощью изменения упругости пружины. Возможно и бесконтактное динамометрическое устройство на основе тензометрического датчика, который управляется процессором по заданному алгоритму.



1 – осевые опоры; 3 – коллекторный двигатель; 4 – прижимные фрикционы; 6 – плата;
7 – редуктор; 9 – барабана с проводом; 10 – центрирующая пружина;
11 – резиновая обойма; 12 – электромагнитный тормоз фрикциона

Рисунок 4.22 - Конструктивное решение привода вращения бухты с проводом



1 – осевые опоры; 2 – направляющие шкивы перемещения монтируемого провода; 3 - трубчатые направляющие защищающие от повреждений провода; 4 - динамометрический выключатель натяжения; 5 - опорное кольцо; 6 - пассивные шкивы перемещения опорного кольца крутильной машины

Рисунок 4.23 - Динамометрическое устройство автоматического натяжения провода

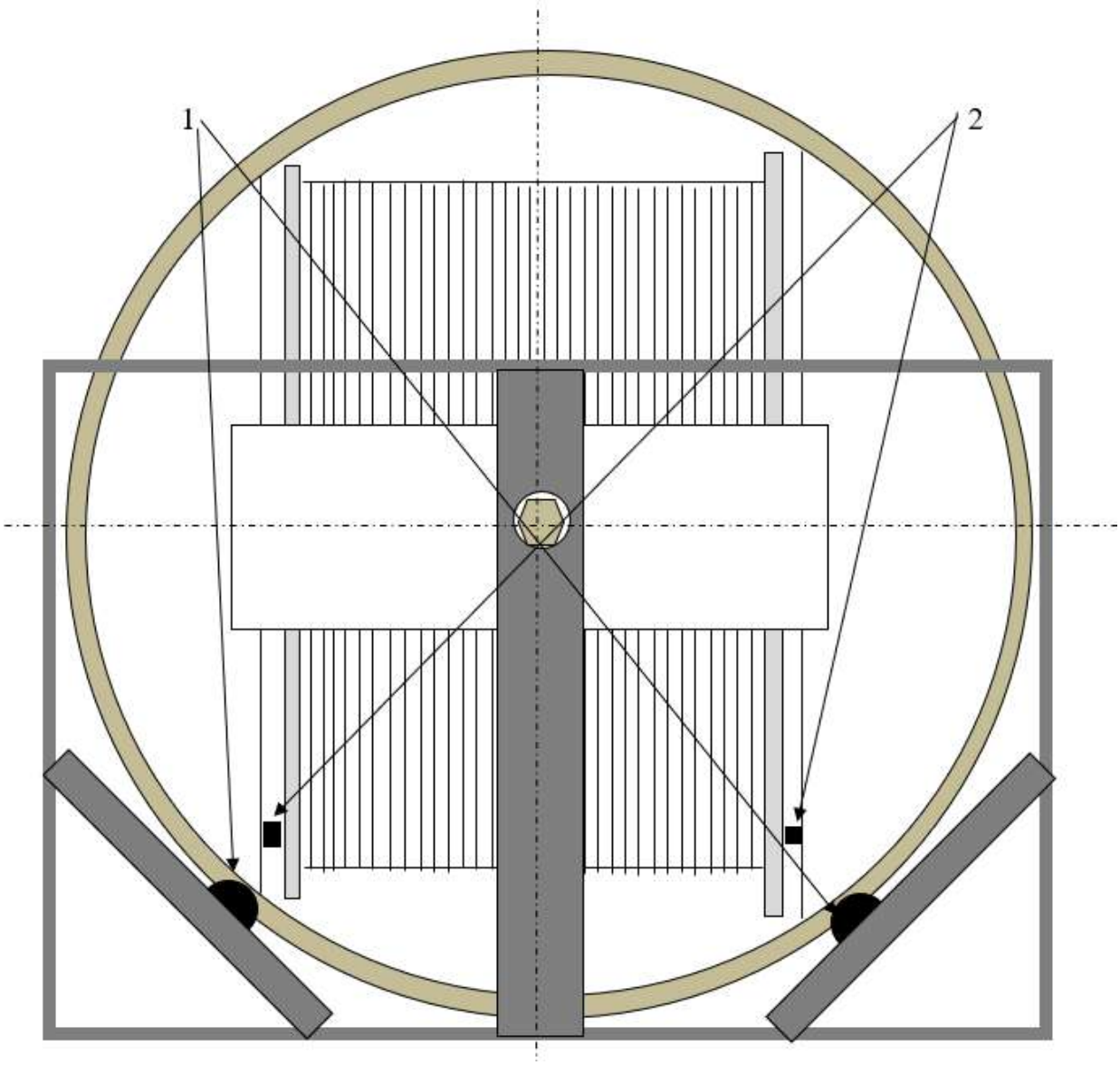
Электропривод фрикциона вращения бухты с проводом выполняется как последовательный каскад, состоящий из коллекторного электродвигателя последовательного возбуждения, далее редуктора с цилиндрическими шестернями и металлический фрикцион, покрытый резиной для сцепления с поверхностью щечки бухты.

Приводы крутильной машины выполняются на той же комплектующей базе, что и приводы вращения барабанов с проводами. Приводы установлены на неподвижной части крутильной машины (рисунок 4.22), которые вращают ведущие опорные кольца подвижной части крутильной машины. Остальные опорные кольца подвижной части крутильной машины не имеют привода. Шкивы этих колец (6) (рисунок 4.23) выполнены из металла. Шкивы ведущих колец подвижной части крутильной машины выполнены по подобию покрытия фрикционов резиной, для плотного сцепления соприкасающихся поверхностей.

Все электродвигатели коллекторного типа на 12 000 об/мин., мощностью на 1200 Ватт. Регулировка напряжения на двигатель осуществляется через тиристорно-фазовый преобразователь - регулятор, управляемый центральным процессором по алгоритму программы.

На рисунке 4.24 представлен вид со стороны манипулятора последней секции с бухтой провода подвижной части крутильной машины, вставленной в неподвижную часть.

Привод поворота на 60° со шкивами (1), привод подтормаживания и натяжения провода (2).



1 – шкивы; 2 - привод подтормаживания и натяжения провода

Рисунок 4.24 - Расположение приводов вращения крутильной машины ММК на 60°

Устройство для автоматического межпролетного натяжения проводов высоковольтной ВЛ электроснабжения с использованием мобильного монтажного комплекса, базирующегося на мобильной платформе (ММК), содержащее

крутильную машину, установленную на мобильной платформе, с последовательно расположенными бухтами с проводами, предназначенными для монтажа на опоры контактной сети, совершающее, при движении ММК по трассе, вращательные движения на 60° за пролет.

От аналогов отличается тем, что для либо операторного, либо автоматического управления процессом натяжения проводов высоковольтной ВЛ электроснабжения, дополнительно оборудовано элементами устройства торможения и натяжения провода, которая представляет собой ряд конструктивных решений выполняющих заданную процессором программу путем получения вращения через щечки барабана с проводами, фрикционы, редукторы от электродвигателей, которые включены на реверсивный режим по отношению к движению платформы, провода подматывается на барабан. В режиме технологического натяжения провода на изоляторе контролируется динамометрическими устройствами, расположенными на концах трубчатых направляющих. После выключения функции натяжения производится фиксация провода клином в седле изолятора. И в неподвижном положении барабана с проводом, включая электромагнитные тормоза фрикционов, производится полная остановка вращения.

Данное устройство является изобретением, обеспечивающим автоматизацию и комплексную механизацию производства строительных работ воздушной высоковольтной линии электроснабжения (с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе).

Предложенное устройство работает в составе ММК в совокупности с крутильной машиной, установленной на мобильной платформе, в которой последовательно расположены подающие барабаны с проводами и которая имеет возможность совершать вращательное движение на 60° при движении на один пролет.

В центрах крутильной машины установлены барабаны с проводами и направляющие проводов, оси которых разнесены в пространстве под углом 120° для транспортировки разнесенных по окружности опорных колец.

Крутильная машина является составной частью базирующегося на мобильной подвижной платформе механизированного комплекса, в состав которого также входит манипулятор, выполняющий вертикальное перемещение проводов для монтажа на изоляторы консолей опор.

ММК перемещается вдоль пролетов строящейся линии, укладывая с небольшим торможением для равномерной раскладки монтируемых проводов. При этом сама крутильная машина посредством вращательного движения совершает поворот своей подвижной части на 60^{0}. Это происходит при передвижении всей платформы на один пролет между опорами для технологического монтажа проводов транспозиции на изоляторы консолей опор с последующим технологическим натяжением до необходимой стрелы провисания проводов.

4.3 Устройство закрепления проводов

После раскрутки крутильной машиной происходит поднятие провода манипулятором до необходимой высоты и перемещение к месту крепления на опоре. Устройством натяжения производится преднатяг провода до необходимой стрелы провеса. После этого проводов необходимо закрепить на опоре.

На сегодняшний день прокладку провода воздушной линии продольного электроснабжения производят ручным методом с использованием инструмента. Раскатка с барабана должна выполняться так, чтобы исключить касание провода земли и стоек опор. Для этого применяется канат-лидер. Соединение канат-лидера и провода производится методом как указано на рисунке 4.25.

Рисунок- 4.25 – Соединение канат-лидера и провода

На конечной анкерной опоре закрепляют мотолебедку, на которую ставят барабан с канат-лидером. Мотолебедка в данном случае выступает механизмом, призванным повысить скорость работы и снизить количество времени на монтажные работы. В первую очередь канат-лидер пропускают через монтажный ролик к последней опоре, после чего поочередно через промежуточные опоры, протягивая его по пазу штыревых изоляторов.

Электролебедка блокируется при прохождении СИП-3 последнего силового монтажного ролика на концевом анкерном кронштейне. Концы проводов закрепляются в анкерных клиновых зажимах типа *DN Rpi* (рисунок 4.26) или *SO255* (рисунок 4.27).

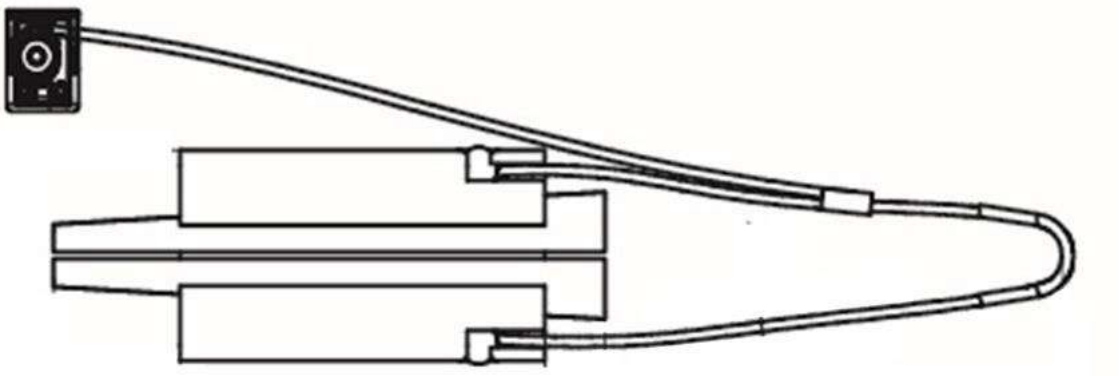


Рисунок- 4.26 – Зажим анкерный *DN Rpi*

Рисунок- 4.27 – Зажим анкерный *SO255*

После закрепления проводят натяжение стрел провеса. Первый метод заключается в натяжении «на глаз», в этом случае способ регулирования является не корректным, так как ошибка может достигать значительных значений из-за большого влияния человеческого фактора.

Для стандартизации натяжения проводов необходимо использовать динамометрические устройства. Усилия выбираются по монтажным таблицам. На данный момент широко распространен ручной метод натяжений, при котором используется ручная лебедка. В этом случае к проводу на барабане, который необходимо немного спустить, закрепляют измерительное устройство и проводят натяжение, следя за показаниями.

Заключительным этапом натяжения является клиновое зажатие провода СИП-3 на опоре электриком.

В свою очередь порядок выполнения необходимых автоматических операций монтажа ММК на подвесные изоляторы, смонтированные на специально установленных консолях опор контактной сети: после остановки платформы ММК у монтажной опоры устройством должен быть выполнен захват провода с соответствующей бухты, и сделано вертикальное перемещение манипулятором ММК, т.е. подъем провода к изолятору, закрепленного на кронштейне опоры, после чего необходимо установить и закрепить провод в седле изолятора.

Размещение проводов на опорах контактной сети с межпролетным шестишаговым транспозиционным симметрированием на каждой опоре показаны на рисунке 4.28.

На рисунке 4.28 представлен общий вид монтажа кронштейнов на опоре контактной сети (1) параметры b_{min} составляет 1685мм и $a_{cm\ min}$ = 1560 мм при межпролетной симметрирующей транспозиции $a_{\ min}$ составит 1794 мм.

Подвесной изолятор (2). Стандартное седло (3) крепления провода к подвесному изолятору кронштейна опоры контактной сети с болтовой фиксацией запорной плашки для зажима провода (4). Монтаж провода в седло и крепление запорной планки выполняется вручную бригадой электромехаников.

Для автоматического и полуавтоматического крепления провода на изолятор необходима другая методика и конструкция оснастки монтажа провода на изолятор.

Использование болтовой фиксации запорной плашки не подходит. Существующие клиновые зажимы предназначены для монтажа проводов ВЛ ручным методом. Для проведения работ в автоматизированном режиме манипулятору ММК потребуется исполнительный механизм по сути своей являющийся также клиновым зажимом.

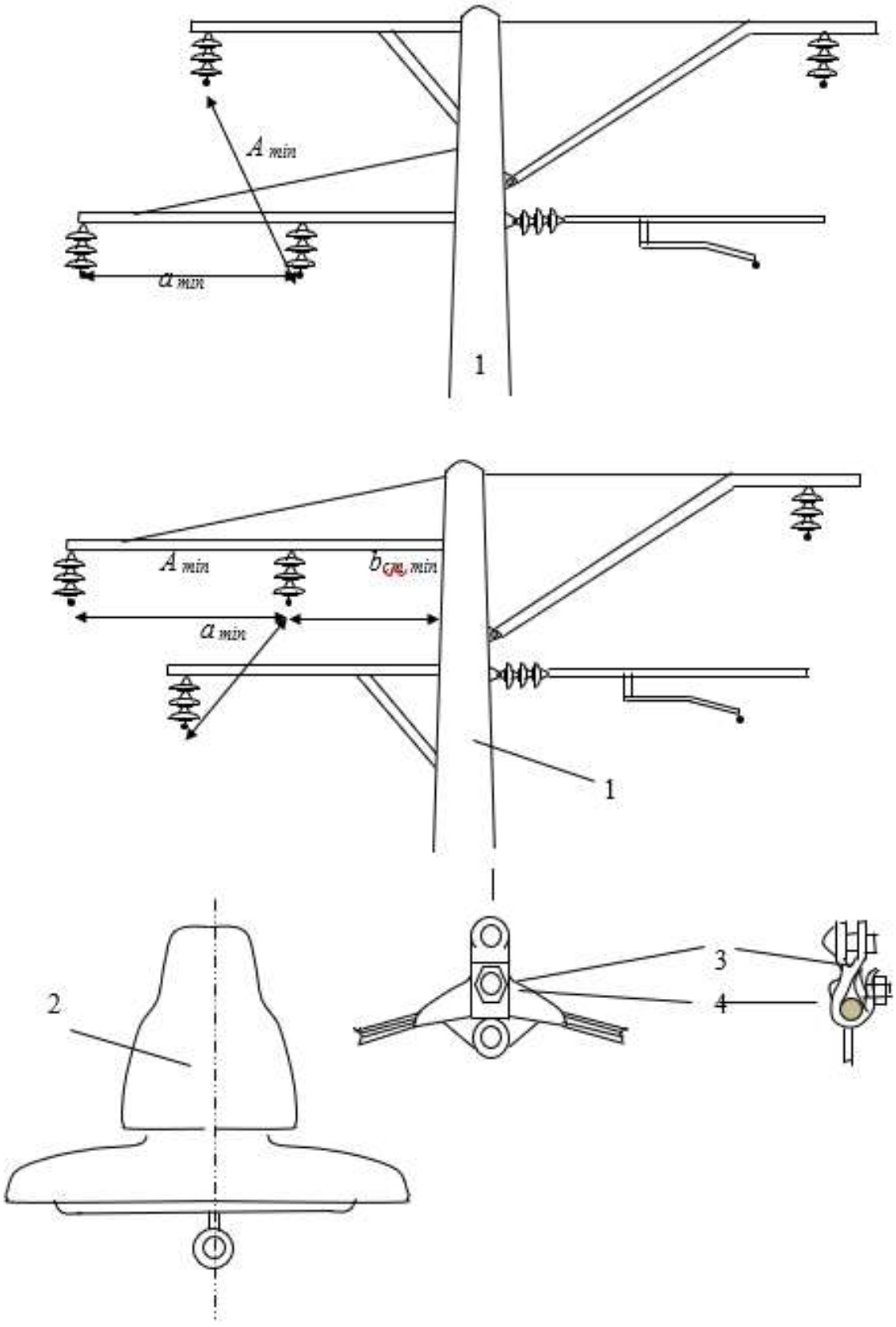
Для закрепления провода ВЛ на опоре при проведении монтажных работ с помощью ММК необходимо разработать устройство, которое отвечало бы следующим действиям:

1 устройство монтажа должно выполнять функцию захвата провода с бухты и сброса провода в седло;

2 типовое седло дополнено элементами автоматического запорного устройства;

3 управление устройством монтажа и фиксации провода в седле с помощью электромагнитных приводов;

4 накопитель запорных элементов и последовательная подача к месту установки в седло.



1 – опора контактной сети; 2 – подвесной изолятор; 3 – стандартное седло крепления;
4 – болтовая фиксация запорной плашки для зажима провода;
A_{min}, a_{min}, $b_{cm\ min}$ – геометрические параметры расположения фазных проводов на опоре

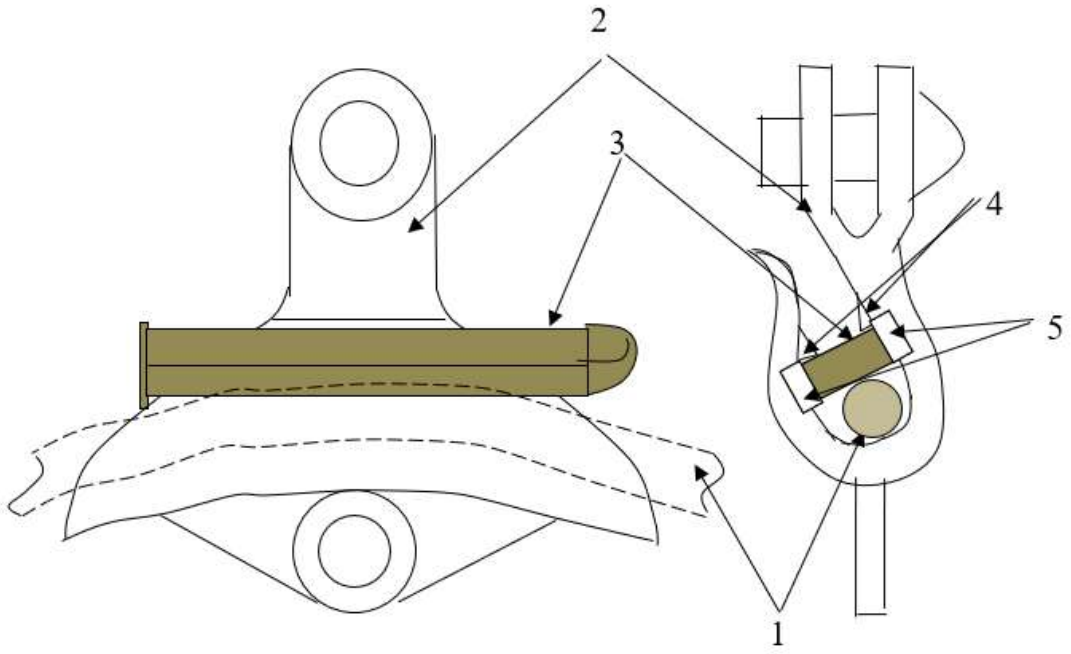
Рисунок 4.28 - Расположение подвесных изоляторов на опорах контактной сети с полевой стороны

Анализ существующих ныне устройств, выполняющих подобные действия выявил, что наиболее близкий принцип используется в обоймах патронташей стрелкового оружия. Принимаем это устройство в качестве аналога.

В аналоге используется патроны, подающиеся из обоймы в ствол, а в предлагаемом устройстве запорные клинья, фиксирующие провод.

На ММК так и без ММК технология монтажа проводов непосредственно на изоляторы выполняется бригадой монтажников вручную. Использование автоматизации монтажа провода на изолятор без применения ручного труда способствует увеличению производительности труда при строительстве линии. Такая технология монтажа позволяет значительно сократить время на производство строительных работ. Предлагается устройство для автоматизации монтажа проводов высоковольтной ВЛ электроснабжения на подвесные изоляторы без применения болтового крепления, которое состоит из двух блоков, крепящихся на монтажном конце манипулятора, имеющие самостоятельные приводы и раздельные цепи управления. Один блок выполняет функцию захвата провода с бухты ММК, подъема и сброса провода в седло, в то время как второй блок выполняет функцию монтажа с обоймы запорных клиньев в запорное устройство седла подвесного изолятора. Первый блок управляется реверсивным электромагнитом. Второй блок управляется мощным импульсным электромагнитом, обеспечивающий подачу запорного клина в запорное устройство седла.

На рисунке 4.29 показаны элементы расположения и монтажа запорных деталей, обеспечивающих надежную фиксацию подвешиваемого провода в седле изолятора: подвешенный провод (1), седло подвесного изолятора (2), запорный клин(3), добавленные в типовое седло направляющие (4) для запорного клина, добавленные в типовое седло запорные приливы(5), которые фиксируют запорный клин в неподвижном положении, зажимая провод. Запорный клин проходит запорные приливы благодаря пружинистости щечек седла.

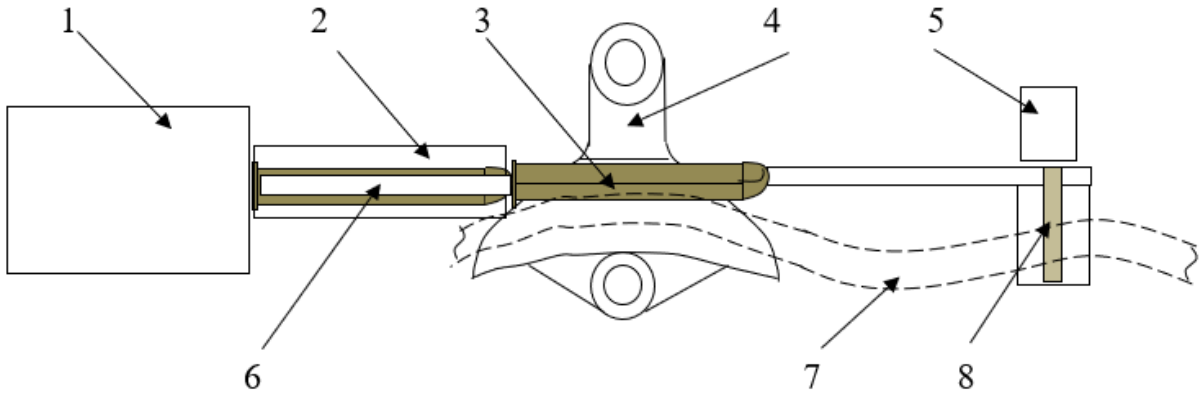


1 – подвешенный провод; 2 – седло подвесного изолятора; 3 – запорный клин;
4 – направляющие; 5 – запорные приливы

Рисунок 4.29 - Доработка типового седла для автоматического режима с использованием клиновой фиксации

Это устройство позволит автоматизировать монтаж проводов высоковольтной ВЛ электроснабжения на подвесные изоляторы и устанавливается на манипулятор ММК для совместной работы без применения ручного труда.

На рисунке 4.30 приведены все элементы и блоки, а так же их взаимодействие при выполнении назначенной функциональной задачи: мощный импульсный электромагнит (1), магазин запорных клиньев (2) выполнен в виде оружейного патронташа стрелкового оружия, в обойме которого находится ряд запорных клиньев, где толщина их зависит от сечения монтируемого провода. Запорный клин (3), седло подвесного изолятора (4), реверсивный электромагнит (5) блока захвата монтируемого провода, стальной забойный стержень импульсного электромагнита (6), подающий из обоймы запорный клин по направляющим седла до фиксации в запорных приливах, монтируемый провод (7), устройство захвата из бухты и сброса в седло монтируемого провода (8) при помощи зажима управляемого реверсивным электромагнитом.



1 – электромагнит; 2 – магазин запорных клиньев; 3 – запорный клин; 4 – седло подвесного изолятора; 5 - реверсивный электромагнит блока захвата монтируемого провода; 6 - стальной забойный стержень импульсного электромагнита; 7- монтируемый провод; 8 - устройство захвата из бухты и сброса в седло монтируемого провода

Рисунок 4.30 - Устройство для автоматизации монтажа проводов

Целиком приведенное устройство монтажа провода в седло на изолятор кронштейна опоры (рисунок 4.30) располагается на верхней части штанги манипулятора ММК подающего провод к седлу изолятора.

Устройство для автоматического монтажа проводов высоковольтной ВЛ электроснабжения на подвесные изоляторы с использованием ММК, базирующегося на мобильной платформе, содержит: манипулятор, обеспечивающий подъем монтируемого провода высоковольтной линии к седлу изолятора, на который необходимо подвесить.

От существующих аналогов отличается тем, что для автоматического производства работ без использования ручного труда на манипуляторе смонтировано устройство монтажа с двумя блоками: первый блок состоит из устройства захвата провода с соответствующей бухты ММК, подъема и сброса в седло подвесного изолятора при помощи реверсивного электромагнита, и второго блока, управляемого мощным импульсным электромагнитом, посылающим железный стержень из обоймы магазина запорных клиньев по установленным

направляющим седла изолятора к запорным приливам, которые зафиксируют монтируемый провод в неподвижном положении в седле.

4.4 Электрический привод для комплекса

Мобильный механизированный комплекс состоит из множества элементов и блоков, которые должны совершать вращательные и поступательные перемещения.

Вращательные движения присутствуют в:

- подвижной части крутильной машины;
- барабанах с проводом;
- позиционировании рабочего органа манипулятора по оси x;
- осевом вращении манипулятора;
- поворотном механизме стрелы манипулятора.

Поступательные движения присутствуют в:

- позиционировании рабочего органа манипулятора по оси y;
- телескопическом движении стрелы манипулятора;
- устройстве закрепления провода.

Как было описано в пункте 4.1.2 манипулятор имеет гидравлический тип привода. Системы движения и вращения в манипуляторе, за исключением рабочего органа, просчитаны, настроены и отлажены заводом изготовителем.

Для обеспечения движения указанные элементы должны быть оборудованы электрическими двигателями, так как для выполнения необходимой задачи пневматический и гидравлический привод не подходят.

Электродвигатели обладают большими возможностями регулирования, просты в ремонте или замене, менее подвержены климатическим условиям, имеют высокую точность позиционирования.

Самая простая классификация делит электродвигатели на постоянные и переменные тока. Последние делятся также еще на синхронные и асинхронные.

Как и все другие электрические машины, коллекторный двигатель постоянного тока состоит из неподвижной (статора) и подвижной (якоря) частей. Статор имеет магнитные полюса. Для маломощных моделей устанавливаются постоянные магниты, для мощных — добавляют обмотки (обмотки возбуждения) для усиления магнитного поля.

Ротор представляет собой магнитопровод, изготовленный из металлических пластин, в его пазах уложено несколько витков медного провода — обмотки ротора. Конец обмотки ротора ведет к токосъемнику, который состоит из медных пластин цилиндрической формы. Пластины изолированы друг от друга и от вала, на котором они установлены. Концы обмоток выведены на коллекторную пластину. Вторая часть коллекторного блока — графитовые щетки с щеткодержателями.

Недостатком данного типа двигателей является скользящий контакт, который возникает в месте прижима щеток к коллекторным пластинам.

К достоинствам можно отнести высокая частота вращения, несложная конструкция и относительно небольшая цена, могут иметь хороший крутящий момент даже на небольших оборотах и простота управления, так как частота вращения напрямую зависит от приложенного напряжения, а момент от тока якоря.

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) с самовозбуждением и независимым возбуждением. По сравнению с другими двигателями имеют меньшие габаритные показатели. ВИД состоит из датчика холла, небольшого современного контроллера, который определяет положение ротора и в зависимости от его положения подаёт питание на ту или другую пару обмоток на статоре.

Достоинства: легкость управления, доступно векторное управление, которое позволяет увеличивать или уменьшать скорость и момент; отсутствие в конструкции дорогостоящих магнитов; отсутствие коллектора и щеток, а следовательно, и скользящего контакта.

Недостатки: невозможно использовать подключение от сети напрямую для работы; на роторе присутствует углубление для обмотки, что является причиной

плохой балансировки ротора после его сборки; плохое теплоотделение от обмотки, которая находится в пазе ротора.

Синхронные двигатели являются лучшим решением для оборудования с постоянной скоростью работы: генераторов постоянного тока, компрессоров, насосов и т. д.

Разные модели синхронных двигателей имеют разные технические характеристики. Диапазон скорости вращения составляет 125–1000 об/мин, а мощность может достигать 10 000 кВт.

В конструкции привода предусмотрены обмотки короткого замыкания на роторе. Его наличие позволяет осуществить асинхронный запуск двигателя.

Преимущества: высокая эффективность и небольшой размер. Работа синхронных двигателей позволяет минимизировать потери мощности в сети.

Недостатки: в конструкции двигателя имеются контактные кольца и дорогие магниты.

Асинхронные двигатели переменного тока наиболее распространены в промышленном производстве. Более высокая частота вращения магнитного поля относительно вращения ротора является особенностью данных приводов.

КПД асинхронного двигателя двукратно снижается в режиме низких нагрузок. Другим недостатком является трехкратное превышение пускового тока относительно рабочих показателей, для решения которого используют частотные преобразователи или устройства плавного пуска.

В процессах с пульсирующей нагрузкой или при повторно-кратковременных режимах могут использоваться асинхронные электродвигатели с повышенными параметрами скольжения [89].

Шаговый двигатель — это вращающийся электродвигатель с дискретными угловыми перемещениями ротора, осуществляемыми за счет импульсов сигнала управления. Представляет собой бесщеточный двигатель с несколькими обмотками (фазами) на статоре и магнитами (обычно постоянными магнитами) на роторе. Подавая напряжение на обмотку статора, мы можем зафиксировать положение ротора, а, подавая напряжение на обмотки последовательно, мы можем

перемещать ротор из одного положения в другое (шаг), причем этот шаг имеет фиксированное значение угла.

Главное достоинство шагового двигателя – возможность точного позиционирования механических узлов, не прибегая к помощи обратных связей и точным измерениям.

Недостаток привода с шаговым двигателем: при сбое импульса дальнейшее слежение происходит с ошибкой в угле, пропорциональной числу пропущенных импульсов [90].

Для выбора типа электродвигателя необходимо проанализировать задачу, которую он будет выполнять. В случае выхода из строя любого узла ММК, в частности электродвигателя, он должен обладать способностью быть отремонтированным или заменен на аналогичный в кратчайшие сроки. Так как электродвигатели обладают достаточно высокой надежностью, и их замена не требуется на плановых технических ремонтах, то хранение на складском помещении электродвигателя для замены в ММК не является рациональным действием. Следовательно, выбираемый электродвигатель должен быть хорошо распространен в области эксплуатации ММК, быть ремонтопригодным, его запасные части должны быть в свободном доступе.

Также стоит учитывать местонахождение электродвигателя в ММК, который представляет собой комплекс, базирующийся на некотором высокотоннажном шасси, передвигаемое грузовым автомобилем с бортовым питанием 12/24 В. Из этого следует, что система управления должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать беспроблемное и надежное питание электродвигателей ММК, учитывая питание бортовой сети автомобиля и, непосредственно, самих электродвигателей.

Изначально можно исключить синхронные двигатели и векторно-индукторные двигатели с независимым возбуждением ввиду их ограниченного распространения по сравнению с аналогами. Их используют в основном как генераторы.

Вес подвижной части крутильной машины с барабанами типа 12 с полной намоткой проводов составляет приблизительно $m_{пкм}$ = 8 т. Вращение происходит медленно на 1/6 полного оборота. Электродвигатели на барабанах с проводами должны работать непрерывно, изменяя направление своего вращения для устройства натяжения провода. Момент, необходимый для начала вращения крутильной машины и барабанов, будет изменяться во времени, так как у крутильной машины будет изменяться вес, а у барабанов с проводами еще и частота вращения. Для позиционирования рабочего органа необходимы небольшие электродвигатели с простым управлением, которые обеспечат высокую точность. Рассмотрим вышеописанные типы двигателей для использования в ММК.

Асинхронные двигатели имеют широкое распространение, низкую стоимость, высокую ремонтопригодность. Подходят для поддержания постоянной частоты вращения или напряжения, чего в нашей системе не требуется. Недостатком является питание от 220/380 В и малый момент на старте. Высокое напряжение питания потребует установку дополнительных инверторов, которые повысят стоимость и сложность системы управления. Небольшой момент на старте является более существенным недостатком, так как пуск электродвигателей подвижной части крутильной машины будет совершаться на короткое время для вращения тяжёлого объекта [91].

ВИД с самовозбуждением на сегодняшний день набирает популярность в виду схожести своих характеристик с асинхронным двигателем при условии меньшей стоимости. Также обязательно требуется преобразователь и датчик положения ротора. Другой проблемой являются пульсации вращающегося момента. В силу зубчатой структуры и импульсного тока момент редко получается стабильным – чаще всего он пульсирует [92]. Поэтому данный тип двигателя также не подходит для ММК.

Двигатель постоянного тока, а именно коллекторный тип исполнения, является широко распространенным, ремонтопригодным. Управление моментом происходит путем изменения напряжения. Недостатком является наличие щеток, которые при большом числе оборотов быстро изнашиваются [93]. В ММК этот

недостаток не актуальный, а при выходе из строя щеток - можно произвести их быструю замену в любых условиях. Данный тип двигателя является оптимальным вариантов для ММК, так как в отличии от асинхронного и ВИД с самовозбуждением обладает большим начальным моментом, что является необходимым для начала вращения тяжелых элементов ММК. Другим достоинством является более простая система управления питанием двигателя от бортовой сети автомобиля.

Рассматривая задачу точного позиционирования рабочего органа ММК по двум осям наилучшим решением, будет использовать шаговый гибридный двигатель [94]. При более высокой стоимости, чем другие типы шаговых двигателей обладают большим крутящим моментом, большей скоростью и более мелким размером начального шага. Если скорость нам не так актуальная, то более мелкий размер начального шага позволит производить точное позиционирование, а большой крутящий момент справится с нагрузкой от веса рабочего органа.

Для функционирования устройства фиксации провода на опоре следует использовать импульсный электропривод, по своей задаче, строению и принципу схожий с электромагнитным монтажным пистолетом [95]. Данный тип электропривода не является серийным и требует дальнейших расчетов в совокупности всего устройства фиксации провода на опоре.

Следующей важной характеристикой является определение режима работы электродвигателя, который определяет нагрузку на электродвигатель. Характер предполагаемой нагрузки обязательно учитывается при выборе двигателя. Действующими стандартами предусмотрено 9 режимов работы [96].

Большинство моделей современных электроприводов, эксплуатируемых продолжительное время, адаптированы к изменяющемуся уровню нагрузки.

Вращение подвижной части крутильной машины необходимо совершать после прохода каждой опоры. После каждого вращения ММК должен попеременно поднять каждый провод из выводов крутильной машины, поднять на высоту монтажа, произвести позиционирование рабочего органа и места крепления, зафиксировать провод в месте крепления, произвести его натяжение и

последующую фиксацию. После чего начать движение к следующей опоре, совершая по пути вращение подвижной части крутильной машины на 60 °. В этом случае между включениями двигателей будет проходить не менее 10 минут, а время работы – кратковременным. Следовательно, работа двух электродвигателей, которые отвечают за поворот барабанов на 60 ° каждую опору, будет соответствовать режиму *S*2 (кратковременный).

В барабанах с проводом двигатели будут работать на номинальной нагрузке при раскатке провода во время движения ММК, а также при вертикальном перемещении провода от крутильной машины к опоре. Во время натяжения провода (перед фиксацией) должен включаться реверсный режим работы этих электродвигателей. Следовательно, режим работы двигателей барабанов с проводом соответствует *S*8 (периодически-непрерывный с одновременным изменением нагрузки и частоты вращения).

Электродвигатели для позиционирования рабочего органа по осям *X* и *Y* будет работать только вблизи опоры. При этом нагрузка будет небольшой, а временные интервалы работы электродвигателя для регулирования кратковременными. В данном типе стоит учитывать также количество включений за единицу времени. Следовательно, режим работы двигателя для позиционирования рабочего органа по осям *X* и *Y* будет *S*3 (периодически-кратковременный).

В механизме фиксации провода на опоре используется импульсный электромагнитный привод. Время работы будет очень мало, так как на каждой опоре необходимо совершить всего три кратковременных запуска. Режим работы *S*2 (кратковременный).

Необходимо также учитывать климатические условия эксплуатации ММК. В тропических районах и районах с повышенной влажностью электродвигатели должны иметь исполнение, позволяющее функционировать при наличии конденсата.

В холодных районах и областях с сильным среднесуточным изменением температуры электродвигатели должны иметь исполнение для функционирования при образовании инея и конденсата [89].

Дополнительно, электродвигатели ММК должны иметь защиту от воды и пыли *IP*44, *IP*54, *IP*55. В случае отсутствия этой защиты необходимо спроектировать корпус, который исключит попадание воды и пыли на электродвигатели, редукторы и блоки управления.

Итоги выбора электроприводов для ММК представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Выбор привода ММК

Элемент ММК	Тип привода	Режим работы
Подвижной части крутильной машины	Двигатель постоянного тока коллекторного типа	*S*2
Барабанах с проводом	Двигатель постоянного тока коллекторного типа	*S*8
Позиционировании рабочего органа манипулятора по оси X	Шаговый гибридный электродвигатель	*S*3
Позиционировании рабочего органа манипулятора по оси Y	Шаговый гибридный электродвигатель	*S*3
Устройстве закрепления провода	Импульсный электропривод	*S*2

Для выбора конкретного электродвигателя, чтобы можно было производить дальнейшие расчеты редукторов, системы управления, массы и стоимости ММК следует произвести расчет электродвигателя. Для начала необходимо рассчитать необходимый для вращения момент.

Подвижная часть крутильной машины в поперечном виде представляет собой окружность (рисунок 4.2 и 4.9). На рисунке 4.2 цифрой 7 указано местоположение электропривода. Вес конструкции (рисунок 4.9) в полной загруженности составляет $m_{пкм}$ = 8 т. Каждое опорное кольцо опирается на 4 вращающихся ролика,

смонтированных на кольцах фиксации неподвижной части крутильной машины. 2 ролика выполняют роль курсовой стабилизации опорного кольца, другие два ролика воспринимают основную нагрузку. Опорных колец – 6 шт. Соответственно, роликов, которые воспринимают нагрузку – 12 штук.

Если заменить в уравнениях для равноускоренного движения переменные поступательного движения на переменные вращательного движения, то можно получить следующую формулу момента $M_д$, необходимого для начала вращения подвижной части крутильной машины и барабана с проводом

$$M_д = \frac{I * 2 * \pi * n}{t}, \tag{4.7}$$

где $I_и$ – момент инерции, кг*м^2;

n – число оборотов в минуту, которого необходимо достичь;

t – время, которое будет потрачено на операцию, сек.

Так как в приближенном значении подвижную часть крутильной машины и барабан с проводом можно принять как полнотелый цилиндр, то момент инерции будет рассчитываться по следующей формуле

$$I_и = \frac{m * R^2}{2}, \tag{4.8}$$

где R – радиус цилиндра, м;

m – масса цилиндра.

Тогда, подставляя (4.8) в (4.6), получим:

$$M_д = \frac{m * R^2 * \pi * n}{t}. \tag{4.9}$$

Как можно заметить по (4.9) момент, в данном случае, зависит от постоянных переменных π, n, t и изменяющихся:

- для подвижной части крутильной машины m – по мере разматывания барабанов с проводами будет уменьшаться общая масса крутильной машины, основной частью которого является 3 провода ВЛ в виде бабин на барабанах;

- для барабана с проводом m – по причине разматывания барабана, а также R – радиус, формирующий полнотелый цилиндр для расчета момента инерции, будет уменьшаться с уменьшением провода, намотанного на барабан.

Радиус подвижной части крутильной машины составляет $R_{пкм}$ = 1550 мм. Масса проводов, которая будет изменяться, принимается по таблице 4.3

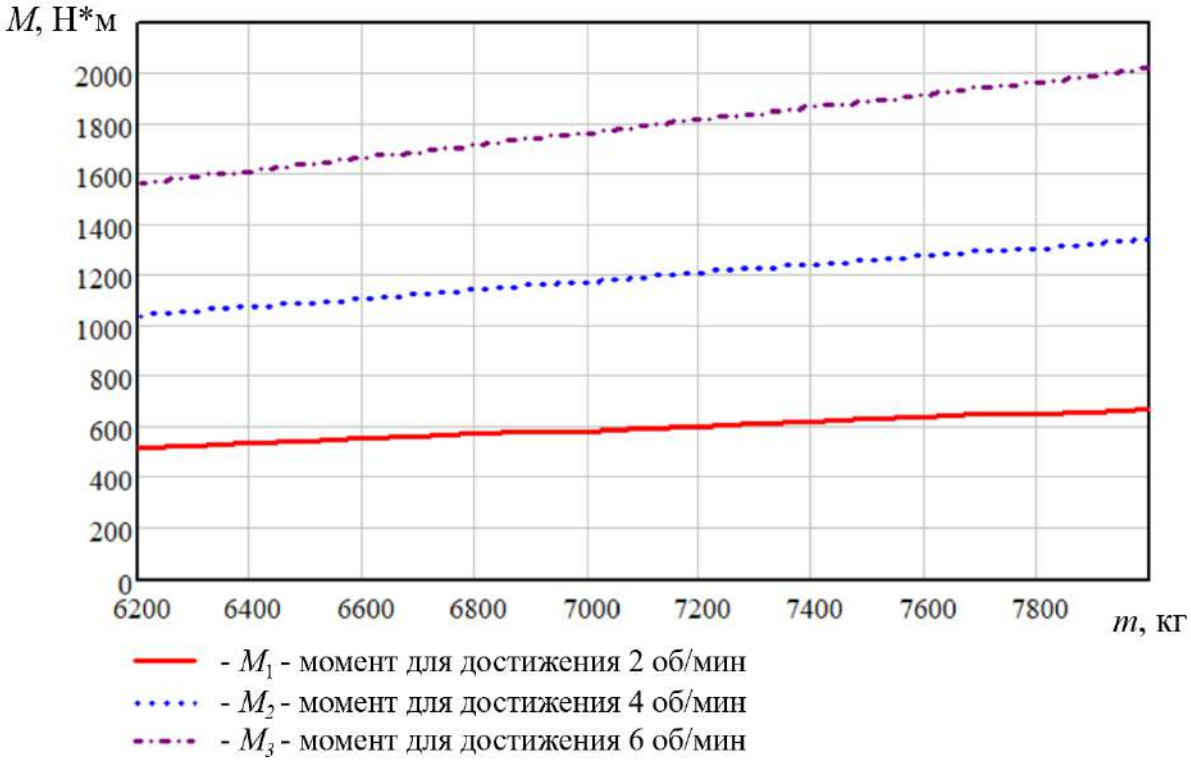
$$m = 600 \text{ кг} * 3 = 1800 \text{ кг}.$$

Число оборотов в минуту принимается:

- для крутильной машины 2 об/мин;

- для барабана с проводом будет зависеть от оставшегося радиуса намотанного провода и линейной скорости движения провода, которая примерно равна скорости движения ММК между опорами и составляет Vммк = 10 км/ч.

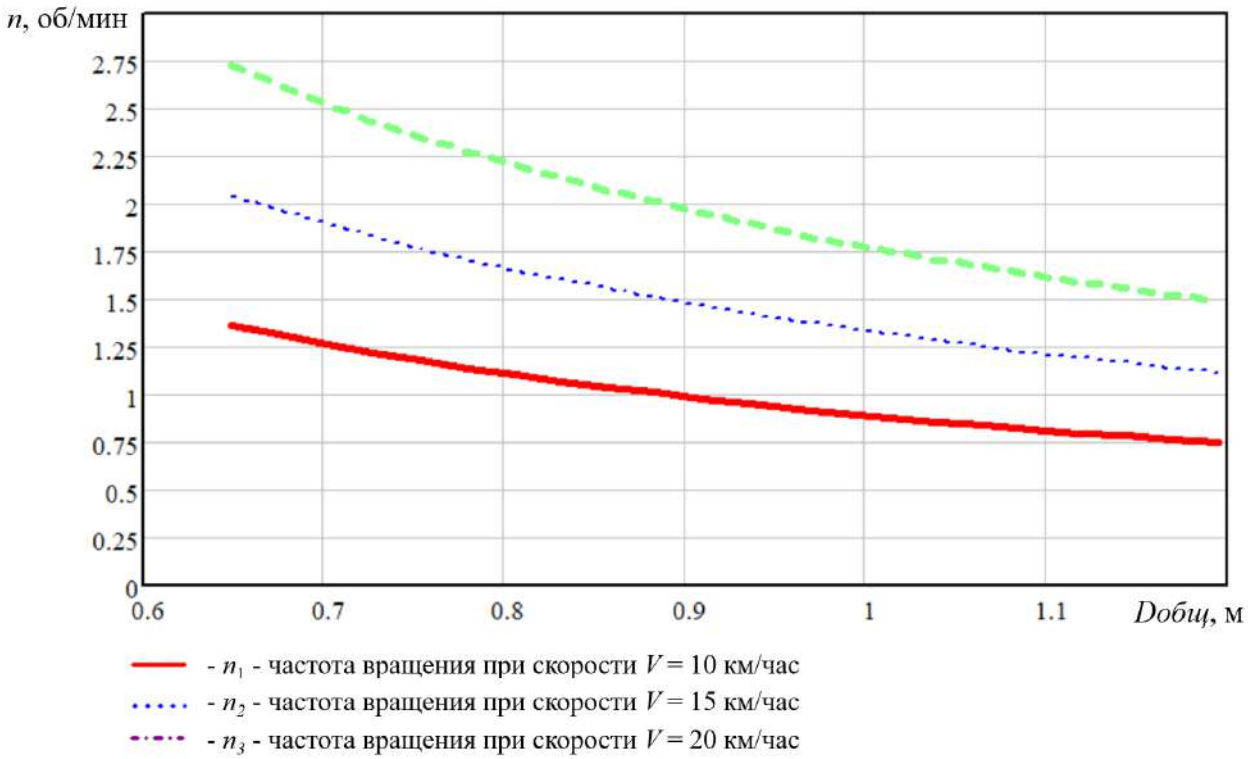
В результате математического моделирования были построены зависимости необходимых моментов от массы подвижной части крутильной машины для начала ее движения. На рисунке 4.31 M_1, M_2, M_3 – рассчитанные моменты в Н*м для достижения 2 об/мин, 4 об/мин, 6 об/мин, соответственно, за время t = 3 с. Как можно заметить, чтобы достичь 6 об/мин за 3 секунды, необходимо приложить момент более 2 кН*м при полной загрузке с общей массой m = 8 т. Так как совершать быстрые вращения данной конструкции не следует, то можно остановиться на достижении 2 об/мин за t = 3 с, тогда момент при полной загрузке крутильной машины составляет около 700 Н*м.



M – момент, необходимый для вращения; *m* – масса барабана с проводом

Рисунок 4.31 – Требуемый момент для начала вращения подвижной части крутильной машины

На рисунке 4.32 получена зависимость частоты вращения барабана типа 12 с проводом СИП-3 1х35 от количества намотанного провода (на оси абсцисс отложен суммарный диаметр шейки барабана и провода в метрах *Добщ*). При этом рассмотрены случаи с тремя разными скоростями движения автомобиля с ММК: n_1 – скорость движения 10 км/ч, n_2 – скорость движения 15 км/ч, n_3 – скорость движения 20 км/ч. По этой зависимости видно, что при уменьшении провода в барабане для сохранения скорости движения ММК между опорами следует регулярно увеличивать частоту вращения барабана путем ускорения электродвигателя.

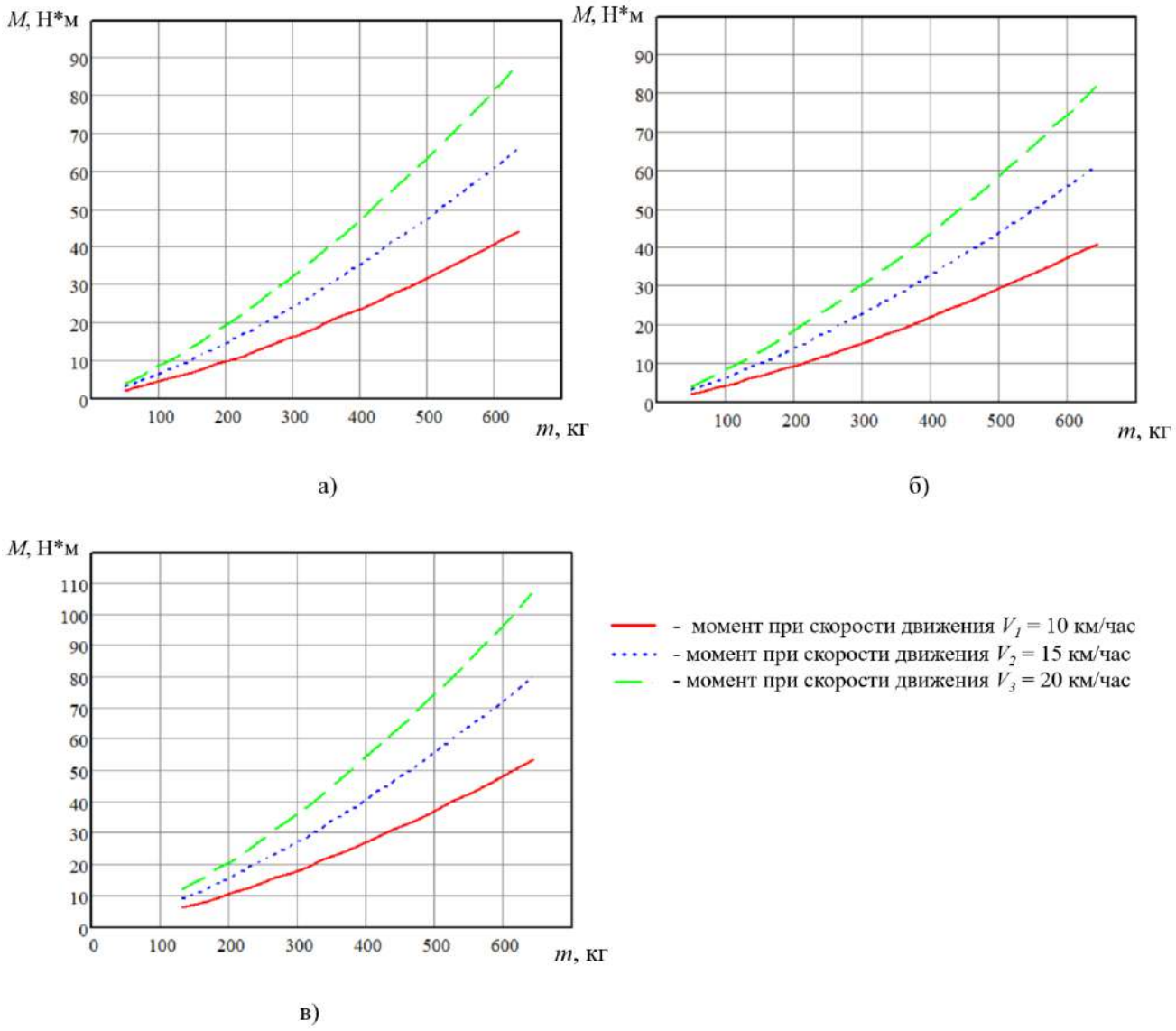


n – число оборотов барабана; *D*общ – общий диаметр оставшегося провода на барабане

Рисунок 4.32 – Зависимость частоты вращения барабана типа 12 с проводом СИП-3 1х35 от количества намотанного провода при разных скоростях движения автомобиля с ММК

На рисунке 4.33 представлены графики зависимостей необходимых моментов от количества провода на барабане для его вращения с разными скоростями движения ММК вдоль монтажной полосы (красные кривые – скорость движения ММК V_1 = 10 км/ч, синие кривые – скорость движения ММК V_2 = 15 км/ч, зеленые кривые – скорость движения ММК V_3 = 20 км/ч). Графики *а)* и *б)* были рассчитаны с условием барабана тип 10, поэтому минимальная масса без провода составляет 50 кг, график *в)* был просчитан для барабана тип 12, вес которого составляет 132 кг. Максимальный вес барабана с проводом АС-35, АС-50 и СИП-3 1х35 в соответствии с данными из таблицы 4.3 не превышает 650 кг.

Как видно из графиков на рисунке 4.33 максимальный момент для барабана тип 10 составляет *M* = 88 Н*м при скорости движения ММК *V*3 = 20 км/ч и с заполненным барабаном. А для барабана тип 12 с максимальным количеством провода СИП-3 1х35 максимальный момент, который необходим для раскрутки провода при скорости движения ММК *V*3 = 20 км/ч, составляет *M* = 107 Н*м.



а) провод АС-35 с барабаном тип 10; б) провод АС-50 с барабаном тип 10; в) провод СИП-3 1х35 с барабаном тип 12
M – момент, необходимый для вращения; *m* – масса барабана с проводом

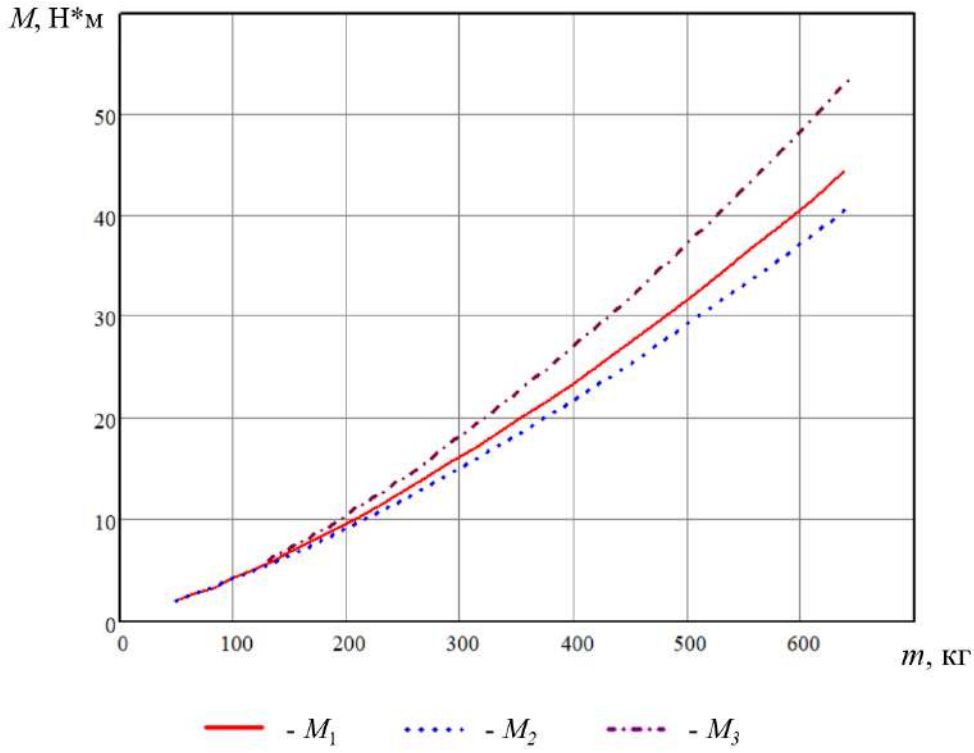
Рисунок 4.33 – Зависимости момента *M* от общей массы барабана

Дополнительно на рисунке 4.34 приведена сравнительная характеристика моментов для проводов АС-35 (барабан тип 10), АС-50 (барабан тип 10), СИП-3 1х35 (барабан тип 12) при скорости движения ММК V = 10 км/ч.

Использование вращающихся роликов, которые воспринимают нагрузку, на кольцах фиксации делает похожей эту систему на подшипник качения. В случае с барабанами с проводами, то вал, на котором они совершают вращение установлен в подшипники.

Дополнительно с двух сторон барабан прижат вращающимися роликами. По результатам работы [97] использование трения качения позволяет снизить момент

трогания в 10-15 раз по сравнению с моментом, необходимым для трогания при трении скольжения.



M_1 – момент для барабана тип 10 с проводом АС-35; M_2 – момент для барабана тип 10 с проводом АС-50; M_3 – момент для барабана тип 12 с проводом СИП-3 1х35

Рисунок 4.34 – Зависимость момента от массы барабана с проводами

Расчетная мощность сопротивления нагрузки при заданной частоте вращения n об/мин [98]

$$P_{\text{рас}} = 0.1 * M_{\text{рас}} * n, \tag{4.10}$$

где $M_{\text{рас}}$ – момент, рассчитанный для элемента.

При этом расчетная мощность должна быть меньше номинальной мощности выбираемого электродвигателя. Соединение электродвигателя с механизмом будет производиться посредством зубчатой передачи.

Так как номинальная частота вращения электродвигателя обычно $n_{\text{ном}}$≥750 об/мин, то необходимо установить редуктор для понижения количества оборотов до необходимого значения. Выбор редуктора происходит по стандартным значениям коэффициента передачи i, который необходимо определить по следующей формуле

$$i = \frac{n_{\text{ном}}}{n}. \quad (4.11)$$

Для подвижной части крутильной машины максимальный момент, полученный при расчетах составил 2000 Нм. Расчет производился с учетом качения подвижной части. Указанный момент будет делится между двумя приводными электродвигателями. В результате расчета электродвигателя была подобрана модель 4ПБМ112МО4 отечественного производства (таблица 4.7).

При подборе электродвигателя на барабан с проводом необходимо также учитывать деление общего момента на два электродвигателя и коэффициент трения резинового ролика на выходном вале о деревянную поверхность барабана.

Таблица 4.7 – Характеристики подобранных электродвигателей

	Местоположение электродвигателя	
	Подвижная часть крутильной машины	Барабан с проводом
Необходимый момент, Нм	1000	250
Модель двигателя	4ПБМ112МО4	
Степень защиты	Закрытого типа, IP44	
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	1.0	1,40
Напряжение якоря, В	110	
Частота вращения, ном/макс мин-1	1550/4000	2240
КПД, %	75	76
Ток якоря, А	11,5	15,3
Стоимость, руб	89 900	95700
Вес, кг	43	

Регулировка напряжения на двигатель осуществляется через тиристорно-фазовый преобразователь - регулятор, управляемый центральным процессором по алгоритму программы [99].

4.5 Структурная схема и алгоритм управления комплекса

Для выполнения описанных задач комплекса необходима информация об окружающей среде и блок управления для преобразования полученных данных в управляющее воздействие. Для сбора информации из окружающей среды на ММК должна быть установлена система датчиков. Для повышения безопасности монтажного процесса на монтажный комплекс следует смонтировать систему датчиков-радаров ближнего действия (ДР). Они позволят в автоматическом режиме осуществлять контроль слепых зон по всему периметру ММК.

Также необходимы датчики частоты вращения (ДЧ) и температуры двигателей (ТД). Обычно они уже установлены на двигателе, поэтому в нашем случае их просто необходимо подключить к клеммам блока управления.

Помимо описанных, одним из важнейших в системе является датчик конечного положения, который отображает допустимые границы установки блоку управления ММК. На рабочем органе необходим датчик конечного положения для определения момента перенатяжения при достижении новой опоры.

Дополнительно датчик концевого положения (ДКУ) необходим для того, чтобы контролировать правильный угол поворота крутильной машины. Еще два нужны для контроля границ манипулятора при движении в вертикальной плоскости (ДВ1 и ДВ2). Если по какой-либо причине трос перетянут, должен сработать соответствующий датчик изгиба манипулятора. Поскольку ММК должен иметь возможность прокладки проводов в обоих направлениях, необходимо установить четыре датчика натяжения, по два с каждой стороны изгиба (ДН1, ДН2, ДН3, ДН4).

Чтобы полученная информация была правильно использована, необходим блок управления. Для этих задач подходит одноплатный компьютер *Raspberry Pi*. Он распространяется полностью собранным на четырёхслойной печатной плате размером с банковскую карту. Выпускается в нескольких комплектациях и оснащен поддержкой *WiFi* и *Bluetooth*. Для работы можно выбрать *Raspberry Pi 3B+*. Оснащена процессором *ARM Cortex A*53 x64 с частотой 1.4 ГГц, имеет 4 порта USB, 1 Гб оперативной памяти, вход *Ethernet*, порт *GPIO* (*general purpose input/output*), состоящий из 40 пинов. Благодаря этому порту будет производится получение информации с датчиков и отправка управляющих воздействий на двигатель, тормозную систему, бортовой компьютер и манипулятор. На *Raspberry Pi* существует большое количество операционных систем. Подключение датчиков и блока управления (БУ) представлено на рисунке 4.35.

Алгоритм методики геометрического монтажа ТП проводов ВЛ электропередач посредством ММК:

- все расчетные процессы выполняются автоматизированным блоком управления (АБУ);
- за разделение программы на подпрограммы управления занимается главный вычислительный процессор (ГВП);
- вся входная и выходная информация отображается на панели управления оператора в кабине.

Перед началом работы проверяется датчик скорости, тормозная система базы манипулятора и датчики расстояния. После успешной проверки ММК последовательно перемещает три провода-фазы из крутильной установки вертикально и предварительно фиксирует их на опоре. Выполнив эти задачи, ММК производит натяжение кабелей и устройством для закрепления производит окончательную фиксацию провода в седле изолятора на опоре. Затем подвижная часть крутильной установки производит поворот бухт на 60°, после чего проезжает до следующей опоры, где процесс повторяется.

Raspberry Pi поддерживает программирование на многих языках. Для написания программы по управлению мобильного механизированного комплекса для монтажа проводов воздушной линии можно использовать язык программирования *Python* - высокоуровневый язык программирования, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода. Единственным минусом этого языка является скорость работы программы, написанной на языке *Python*. В случае невозможности оптимизирования кода для достаточной скорости работы присутствует возможность реализовать проблемное место на *Cython*/*C*. Любой код *Python* является валидным кодом и на *Cython*, который транслируется в *C*, благодаря чему осуществляется прирост производительности другим языком в узких проблемных местах кода.

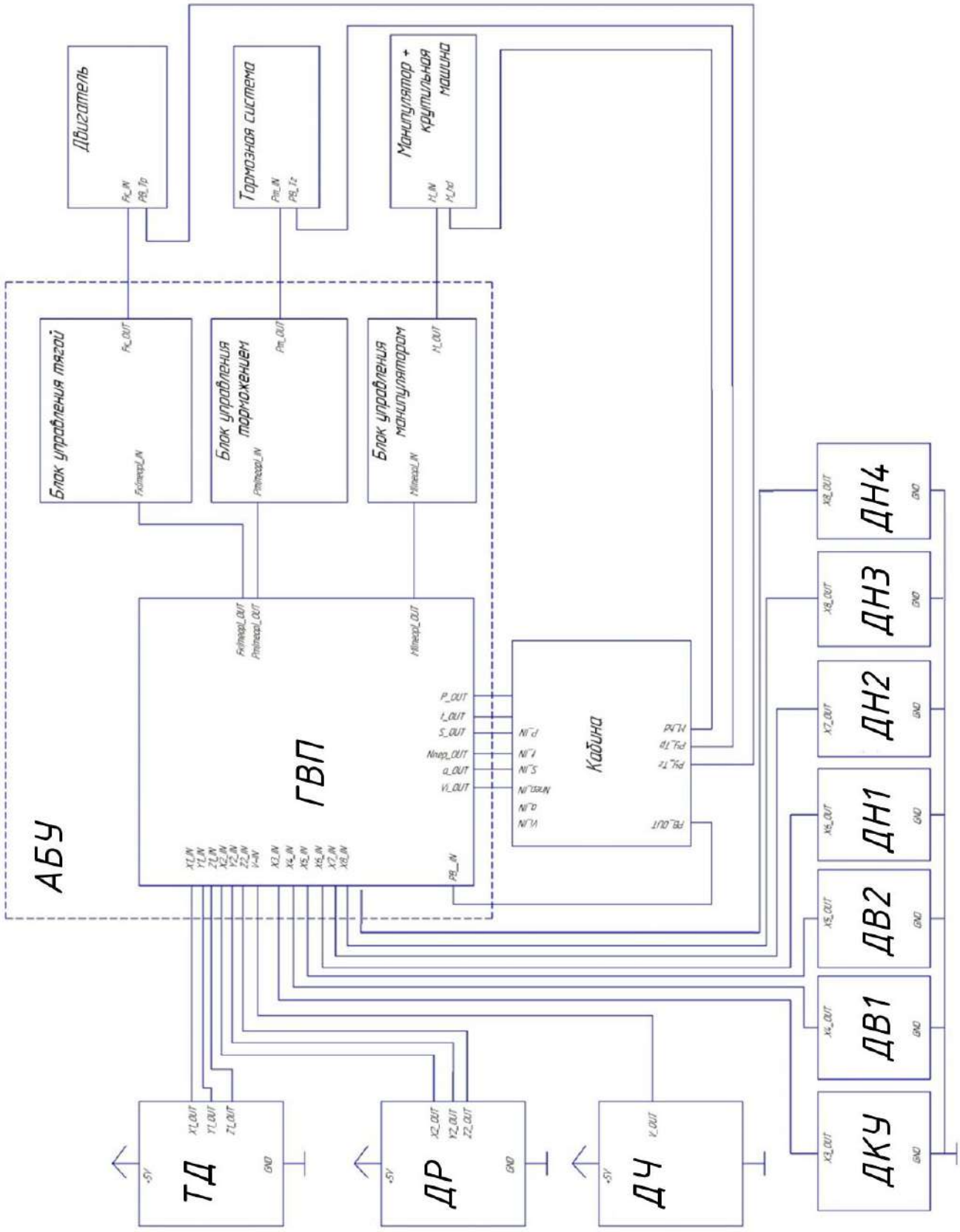


Рисунок 4.35 - Структурная схема датчиков и БУ мобильного механизированного комплекса

Таким образом, получается модель механизированного комплекса на мобильной платформе для монтажа проводов воздушной линии с необходимыми датчиками для получения информации из окружающей среды для верного интерпретирования действительности и блока управления для верного преобразования входных сигналов в выходные.

4.6 Эффективность внедрения мобильного механизированного комплекса

Плановая стоимость ММК, направленного на обеспечение одновременного и непрерывного устройства трех проводов ВЛ, и, как результат, улучшение симметричности линейных электрических параметров, составляет 20 млн руб (без НДС).

Срок полезного использования монтажного автоматизированного комплекса – бессрочно.

Срок полезного использования оборудования, включенного в монтажный механизированный комплекс, составляет 30 лет. Оборудование является «типовым» и определяется заводами-изготовителями по основному оборудованию.

Амортизационные отчисления

$$\text{Норма АО} = \frac{30}{\sum_{i=1}^{30} i} * 100\% = 6{,}45;$$

$$\text{Годовые АО} = \frac{20\,000\,000 * 6{,}45}{100} = 1\,290\,000 \text{ рублей};$$

$$\text{Ежемесячные АО} = \frac{1\,290\,000}{12} = 107500 \text{ рублей}.$$

Уменьшение эксплуатационных расходов при внедрении монтажного механизированного комплекса достигается за счет:

- снижение ручного труда монтажников и количества человек в монтажной бригаде;

- сокращается время погрузки за счет использования собственного манипулятора, комплекса, транспортировки, т.к. комплекс располагается на автомобильном ходу и в трое снижается время выполнения монтажа проводов на опору за счет монтажа трех проводов одновременно без перемещения комплекса.

На данный момент монтажная бригада воздушных линий состоит в среднем из девяти человек. Автоматизация процесса с помощью ММК позволит снизить этот показатель до 6 человек: бригадир, оператор-водитель ММК, водитель манипулятора, рабочие для окончательного закрепления провода в количестве 2-х человек по правилам монтажа.

Средняя зарплата электромонтажника в России составляет 70 000 рублей. Тогда при снижении количества рабочих в бригаде на 3 человека экономия составит

$$См(З) = 70000*3*12 = 2.520.000 \text{ руб. в год.} \quad (4.12)$$

Помимо этого, монтаж будет производиться в три раза быстрее, что позволит снизить затраты на человеко-часы соответственно в три раза.

При графике работы 5/2 за год наработка составляет 1749 часов одним рабочим. Соответственно, три человека нарабатывают

$$ЧЧ(З) = 1749 * 3 = 5247 \text{ часов.}$$

Стоимость одного часа при средней заработной плате в 70000 рублей составляет

$$Счч = \frac{70000 * 12}{1749} = 480{,}27 \text{ рублей.}$$

При снижении количества человеко-часов экономия составит

$$\text{Счел}(3) = \frac{\text{ЧЧ}(3) * 2}{3} * \text{Счч} = \frac{5247 * 2}{3} * 480{,}27 = 1\ 680\ 000 \text{ рублей.}$$

Итого: экономия благодаря автоматизации за счет использования ММК без устройств натяжения и закрепления проводов за год будет составлять

$$\text{Смик}(3) = \text{См}(3) + \text{Счел}(3) = 2\ 520\ 000 + 1\ 680\ 000 = 4\ 200\ 000 \text{ рублей.} \quad (4.13)$$

Срок окупаемости составит

$$T\text{ммк}(3) = \frac{20\ 000\ 000}{\text{Смик}(3)} = \frac{20\ 000\ 000}{4\ 200\ 000} = 4.8 \text{ года.} \quad (4.14)$$

При использовании устройств закрепления и натяжения провода в автоматическом режиме количество рабочих можно снизить до 3 человек: бригадир, оператор-водитель ММК, водитель-механик манипулятора. Тогда по формуле 4.12 экономия составит

$$\text{См}(6) = 70000*6*12 = 5\ 040\ 000 \text{ руб. в год.}$$

Шесть человек нарабатывают за год

$$\text{ЧЧ}(6) = 1749 * 6 = 10\ 494 \text{ часов.}$$

При снижении количества человеко-часов экономия составит

$$\text{Счел}(6) = \frac{\text{ЧЧ}(6) * 2}{3} * \text{Счч} = \frac{10\ 494 * 2}{3} * 480{,}27 \approx 3\ 360\ 000 \text{ рублей.}$$

По формуле (4.13) экономия благодаря автоматизации за счет использования ММК без дополнительных рабочих по натяжению провода за год будет составлять

Смик(6) = См(6) + Счел(6) = 5 040 000 + 3 360 000 = 8 400 000 рублей.

И подставляя Смик(6) в (4.14) получаем срок окупаемости без дополнительных рабочих по натяжению провода

$$Tмик(6) = \frac{20\ 000\ 000}{Смик(6)} = \frac{20\ 000\ 000}{8\ 400\ 000} = 2.4 \text{ года.} \quad (4.15)$$

Как видно из формул (4.14) и (4.15) срок окупаемости составляет 4.8 года при оплате труда двух рабочих, выполняющих крепление и натяжение провода, и 2.4 года без этих рабочих, когда натяжение и закрепление провода происходит в автоматическом режиме.

4.7 Выводы по разделу 4

1 Мобильный механизированный комплекс, который позволяет использовать технологию беспрерывного, безразрывного и одновременного монтажа всех трех проводов ВЛ, представляет собой совокупность отдельных агрегатов, которые базируются на общей платформе и отвечают за индивидуальную задачу в общем процессе автоматизированного монтажа транспозиционной геометрии проводов воздушной линии.

2 Основной частью ММК является крутильная машина сигарного типа, которая состоит из подвижной и неподвижной частей. Был произведен расчет типов, количества, веса, длин используемых проводов для ВЛ, а также параметры барабанов, на которые производится намотка проводов для транспортировки и

хранения. С учетом полученных данных был произведен расчет и выбор трубы для каркаса крутильной машины ММК. Была построена 3-D модель крутильной машины и проведена симуляция нагрузок. В ходе проведённых исследований были получены результаты, подтверждающие верность и достаточность выбранного материала, характеристик трубы, размеров крутильной машины.

3 В ходе исследования были подобраны манипулятор из ряда производимых заводами изготовителями по отлаженной технологии для осуществления вертикального перемещения проводов от крутильной установки до опор контактной сети для их последующего натяжения и закрепления в соответствии с новой методикой шестишаговой транспозиции.

4 Разработаны устройства межпролетного натяжения проводов и устройство закрепления проводов на опорах. Данные устройства позволяют сконцентрировать монтажный процесс на трех основных работниках бригады, в которую входят бригадир, водитель-механик манипулятора и оператор-водитель ММК, и не использовать автовышку с еще одним водителем и двумя рабочими для натяжения и закрепления проводов на опорах. Таким образом повышается уровень автоматизации, безопасности, качество, снижается время монтажа воздушной линии.

5 Был проведен анализ существующих электродвигателей по типовому устройству и режиму работы, в ходе которого был рассчитаны и подобраны электродвигатели для всех составных частей ММК, требующих для работы электропривод.

6 Сформирована структурная схема ММК, включающая все описанные выше блоки, датчики для контроля граничных условий работы. Описан алгоритм монтажного процесса для разнообразных условий работы ММК.

7 В ходе расчета эффективности внедрения были получены результаты снижения материальных затрат и срока окупаемости для двух вариантов компоновки ММК. В первом случае количество рабочих в бригаде снижается на 3 человека, провод в автоматизированном режиме только перемещает провода из крутильной машины до опор, а натяжение и закрепление осуществляет бригада

рабочих. В этом случае снижение материальных затрат на дополнительный персонал составит примерно 2.5 млн руб. в год. Снижение затрат за счет более эффективной работы - 1.7 млн руб. в год. При этом срок окупаемости ММК составит 4.8 года. Во втором случае снижение затрат на дополнительный персонал – 5 млн руб. в год, от эффективности автоматизации монтажного процесса с учетом натяжения и закрепления проводов на опоре с помощью ММК – 3.4 млн руб. в год. В этом случае срок окупаемости ММК составит 2.4 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

1 Обобщены результаты научных исследований, технических и технологических решений по повышению качества передаваемой электроэнергии по воздушным линиям переменного тока, которые находятся под интенсивным электромагнитным влиянием контактной сети, приводящее к несимметрии электрических параметров линии.

2 Установлено, что современный монтаж ВЛ подразумевает выполнение работ ручным методом. Это снижает безопасность, скорость работы, качество, увеличивает время, материальные затраты. Актуальным является вопрос автоматизации процесса монтажа, благодаря чему, в первую очередь, вырастет безопасность и скорость работ.

3 Разработана математическая модель напряженностей электрического и магнитного полей контактной сети, подтверждающая, что решением проблемы несимметрии погонных электрических параметров в воздушной линии продольного электроснабжения, находящейся под интенсивным электромагнитным влиянием контактной сети, способно новое устройство транспозиционной геометрии проводов (Патент № 2460654 РФ) [24].

4 Выявлено, что при осуществлении транспозиции проводов воздушной линии на каждой опоре вместо 3 км по современному методу и при этом совершать смещение каждого провода-фазы на 60°, то уровни наведенных напряжений двух составляющих электромагнитного поля (магнитной и электрической) будут уравниваться, так как воздействующее электромагнитное поле оказывает одинаковое воздействие на все три фазные линии. При этом само потребляющее устройство сохраняет только питающее напряжение, обеспечивая в конечном итоге максимальное качество передаваемой электроэнергии потребителям.

5 Разработано устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов – ММК (Патент № 2701601) [28] для обеспечения высокой точности транспозиции нового типа. В ходе исследования были рассчитаны параметры крутильной машины ММК, проведена их успешная симуляция в виртуальной среде на изломы и прогибы. Были подобраны электродвигатели и манипулятор. Составлена структурная схема и алгоритм для работы ММК.

6 Разработана методика монтажа транспозиции нового типа, сутью которой является раскатка, поднятие, предзакрепление, натяжение и окончательная фиксация всех трех проводов воздушной линии на опорах в автоматизированном режиме посредством ММК.

7 Рекомендуется применение разработанных технических решений в качестве типового испытательного оборудования, так как расчетный экономический эффект от внедрения показал, что наибольший экономических эффект будет при использовании ММК в полном комплекте для автоматизации всего цикла монтажного процесса. В этом случае снижение материальных затрат на рабочих составит 5 млн руб. в год., а за счет более эффективной работы ММК по сравнению с ручным методом экономия достигнет 3.4 млн руб. в год, тогда срок окупаемости ММК составит 2.4 года.

8 Перспективной дальнейшей разработки темы исследования является проработка систем интеллектуального управления ММК, которое включает в себя сбор статистических данных работы ММК с контрольных датчиков для последующей коррекции монтажного процесса, что в свою очередь даст полезную статистическую информацию по работе узлов ММК.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АС – марка сталеалюминевого провода, цифра после сокращения указывает на площадь поперечного сечения

АСУ – автоматизированная система управления

АБУ – автоматизированный блок управления

БУ – блок управления

ВСЖД – Восточно-Сибирская железная дорога

ВЛ – воздушная линия

ВЛ АБ – высоковольтная линия автоблокировки

ВЛ ПЭ – воздушная линия продольного электроснабжения

ГВП – главный вычислительный процессор

ДВ1, ДВ2 – концевые датчики в вертикальной плоскости

ДКУ – концевой датчик угла поворота крутильной машины

ДН1, ДН2, ДН3, ДН4 –датчики перенатяжения провода в пролете между опорами

ДР – система датчиков-радаров ближнего действия

ДЧ – датчик частоты вращения двигателя

КМУ – краноманипуляторная установка

КС – контактная сеть

КПД – коэффициент полезного действия

ЛЭП – линии электропередач

ММК – мобильный механизированный комплекс

НДС – налог на добавочную стоимость

ОАО РЖД – открытое акционерное общество «Российские железные дороги»

ПАО – публичное акционерное общество

ПУЭ – правила устройства электроустановок

САУ – система автоматического управления

СУ – система управления

СЦБ – устройства сигнализации, централизации и блокировки

ТП – транспозиция

ТД – датчик температуры двигателя

УПУ - усилительно-преобразующее устройство

ЭДС – электродвижущая сила

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Бадёр, М.П.** Электромагнитная совместимость : монография / М.П. Бадёр ; Учебно-методический корпус Министерства путей сообщения России. – Москва : УМК МПС РФ 2002. – 637с. – ISBN 5-89035-065-X. - Текст : непосредственный.

2 Правила устройства электроустановок : издание седьмое : официальное издание : утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002 №204 : введены в действие 01.01.2003. – Текст : непосредственный.

3 **Говорков, В.А.** Электрические и магнитные поля : монография : изд. 3, перераб. и доп. / В.А. Говорков ; - Москва : «Энергия», 1968. – 488 с. – Текст : непосредственный.

4 **Александров, Г.Н.** Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения : монография / Г.Н. Александров, А.В. Горелов, В.В. Ершевич и др. ; под ред. Г.Н. Александрова ; Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 1993. – 560 с. – Текст : непосредственный.

5 **Тихонов, П. Д.** Особенности эксплуатации гибридных высоковольтных воздушных линий. Влияние транспозиции фазных проводов на напряжение прикосновения / П. Д. Тихонов, С. И. Хренов. – Текст : непосредственный // Энергетика. Технологии будущего: Сборник трудов III научно-технической конференции студентов, Москва, 20–22 мая 2020 года / Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ". – Москва : Издательство ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ", 2020. – С. 255-260. – EDN OXHLBF.

6 **Гершенгорн, А.И.** Транспозиция длинных линий электропередачи / А.И. Гершенгорн, Н.А. Мельников, А.Н. Шеренцис. – Текст : непосредственный // — Электричество. – Москва, 1953 – № 1.

7 **Зильберман, С. М.** Транспозиция линий электропередачи и ее неожиданный эффект / С. М. Зильберман, Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов, Г. И. Самородов. – Текст : непосредственный // Электричество / Издательство : Национальный исследовательский университет "МЭИ". – Москва : 2006. – № 5. – С. 11-16. – EDN KVAGYN.

8 **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому

регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. N 400-ст : введен впервые : дата введения 2014.07.01 / Разработан Обществом с ограниченной ответственностью "ЛИНВИТ" и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 "Электромагнитная совместимость технических средств". – Москва : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2013. – 20 с. – Текст : непосредственный.

9 **Жарков Ю. И.** Особенности защиты от замыканий на землю ВЛ СЦБ при электромагнитном влиянии контактной сети / Ю. И. Жарков, Е. П. Фигурнов, Н. В. Ожиганов. – Текст : непосредственный. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 1(29). – С. 113-117. – EDN JPJCVD

10 **Богданов, Е. П.** Технологии автоматизации рабочих процессов в архитектурно-строительной отрасли / Е. П. Богданов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2021. — № 35 (377). — С. 25-27.

11 **Пузина, Е. Ю.** Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций : монография / Е. Ю. Пузина, А. Г. Туйгунова, И. А. Худоногов. — Иркутск : ИрГУПС, 2020. — 184 с. — ISBN 978-5-98710-376-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/157877 (дата обращения: 20.02.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

12 **Ступицкий, В.П.** Повышение достоверности диагностирования состояния несущего троса контактной сети / В.П. Ступицкий, И.А. Худоногов, В.А. Тихомиров, О.В. Лобанов. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.1(65).136-143. – Текст : электронный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2020. – № 1 (65). - С. 136-143. – URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-dostovernosti-diagnostirovaniya-sostoyaniya-nesuschego-trosa-kontaktnoy-seti/viewer (дата обращения 20.01.2024).

13 **Овечкин, И. С.** Автоматизация тяговых подстанций ВСЖД с применением SCADA-системы / И. С. Овечкин. – Текст : электронный // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». – 2022. - №3 (17). – URL: https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/786/671 (дата обращения 20.01.2024).

14 Sneps-Sneppe, M. Digital Railway and How to Move from GSM-R to LTE-R and 5G / M. Sneps-Sneppe, D. Namiot // Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1140. – P. 392-402. – DOI 10.1007/978-3-030-37436-5_34. – EDN GRGQCV.

15 **Китаева, А. Т.** Применение систем автоматизации на железнодорожном транспорте / А. Т. Китаева, И. В. Ларина. – Текст : непосредственный // Экономика и общество: современные исследования и инновационное развитие : Материалы всероссийской научно-практической конференции, Омск, 06–07 декабря 2022 года.

– Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 138-145. – EDN WDEOCS.

16 **Волдинер, Ю. Р.** Применение искусственного интеллекта на железнодорожном транспорте / Ю. Р. Волдинер. – Текст : непосредственный // Современные тенденции развития инвестиционного потенциала в России : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 23 марта 2021 года. – Москва: Государственный университет управления, 2021. – С. 129-131. – EDN GXQLFQ.

17 **Епрынцева, Н. А.** Искусственный интеллект для железнодорожного транспорта / Н. А. Епрынцева. – Текст : непосредственный // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2021. – № 1(23). – С. 100-104. – EDN WUPPTJ.

18 **Бикбулатов, Р. И.** Автоматическая система управления движением поезда на основе искусственного интеллекта / Р. И. Бикбулатов, А. С. Марченко. – Текст : непосредственный // Перспективы науки. – 2023. – № 4(163). – С. 59-64. – EDN IKJJBW.

19 **Тазеев, Н. Ф.** Автоматизация в строительстве: ее влияние на безопасность рабочих / Н. Ф. Тазеев. – Текст : непосредственный // Мировые исследования в области естественных и технических наук : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 30 апреля 2023 года. – Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "Ставропольское издательство "Параграф", 2023. – С. 52-54. – EDN CTVBHN.

20 **Соловьев, А.Е.** Виды аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте и их причины / А.Е. Соловьев. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005 : No 5. - С. 156-159.

21 **Лундалин, А. А.** Направления развития релейной защиты и автоматики в Российских электрических сетях / А. А. Лундалин, Е. Ю. Пузина, И. А. Худоногов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 2(62). – С. 77-85. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.2(62).77-85. – EDN ZYRWNF.

22 **Гаврюшин, С. С.** Моделирование работы монтажного комплекса строительства воздушных линий электропередач / С. С. Гаврюшин, Е. В. Арбузов, А. В. Картовенко. – Текст : электронный // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 6(37). – С. 90. – EDN XXYGZD. – URL: https://naukovedenie.ru/PDF/90TVN616.pdf (дата обращения 12.01.2024)

23 **Душин, С. Е.** Теория автоматического управления : учебник для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др. : Под ред. В.Б. Яковлева. – 2-е изд., перераб //. – Москва : ФГУП издательство «Высшая школа», 2009. – 567 с. – ISBN 5-06-004096-8. – Текст : непосредственный.

24 **Малков, А. В.** Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез : монография / А. В. Малков, И. М. Першин. – Москва : Научный мир, 2012. – 476 с. : 28 л. цв. ил. – ISBN 978-5-91522-301-0. – Текст : непосредственный.

25 **Першин, И. М.** Анализ и синтез систем с распределенными параметрами : монография / И. М. Першин. - Пятигорск : Рекламно-информ. агентство на КМВ, 2007. - 243 с., [1] цв. портр. : ил.; 21 см.; ISBN 978-5-89314-075-0 (В пер.). – Текст : непосредственный.

26 **Юревич, Е.И.** Теория автоматического управления : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Е.И. Юревич. – 2 изд. перераб. и доп. – Ленинградское отделение : Энергия, 1975. – 476 с. : ил. – Текст : непосредственный.

27 **Думлер, С.А.** Управление производством и кибернетика [Текст] : Создание автоматизир. систем управления в машиностроении и приборостроении : монография / С. А. Думлер. - Москва : Машиностроение, 1969. - 420 с. : ил.; 22 см. – Текст : непосредственный.

28 **Марквардт, К.Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог : [Учеб. для вузов ж.-д. трансп.] / К. Г. Марквардт. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Транспорт, 1982. - 528 с. : ил.; 22 см. – Текст : непосредственный.

29 **Бодров, П.А.** Моделирование электромагнитного влияния контактной сети в схеме замещения воздушной линии электропередачи / П. А. Бодров, Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов, Н. А. Попова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1(69). – С. 119-125. – EDN YUGKTJ.

30 **Патент № 2460654 Российская Федерация, МПК B60M 3/00 (2006.01).** Устройство транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе : №. 2011101198/11 : заявл. 2011.01.12 : опубл. 2012.09.10 / Семенова Е.Ю., Иодко Ю.В., Карпенко В.И., Семенова Д.В. : заявитель Семенова Е.Ю., Иодко Ю.В., Карпенко В.И., Семенова Д.В. / Бюл. - №25 от 10.09.2012. – 7с. : ил. – Текст : непосредственно.

31 **Бадер, М. П.** Автоматизация монтажа проводов высоковольтной линии тягового электроснабжения на переменном токе / М. П. Бадер, А. А. Куликов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2022. – № 9. – С. 2-7. – DOI 10.53891/00135860_2022_9_2. – EDN BHDJFN.

32 **Свод Правил СП 226.1326000.2014.** Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции : официальное издание : утвержден и введен в действие Приказом Министерства транспорта Российской Федерации № 332 от «2» декабря 2014 г. : введен впервые :

дата введения 2014.12.01. / разработан федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО РГУПС). – Москва : 2014. – 83 с. ; – Текст : непосредственно.

33 **Шевлюгин, М. В.** Снижение экономических потерь в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе / М. В. Шевлюгин, А. А. Куликов, Д. В. Семенова. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 975-986. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-975-986. – EDN VCTLZY.

34 **Шинаков, Ю.С.** Теория передачи сигналов электросвязи : монография / Ю.С. Шинаков, Ю.М. Колодяжный. - Москва : Радио и связь, 1989. – 287 с. – ISBN 5-256-00100-0. – Текст : непосредственный.

35 **Попов, П.А.** Теория связи по проводам: учебник для техникумов связи / П.А. Попов. - Москва : «Связь», 1978. – 272 с. – Текст : непосредственный.

36 **Гаврилюк, В.В.** Кабели связи для электрических железных дорог переменного тока : монография / В. В. Гаврилюк, К. А. Любимов, А. Н. Малочинская, А. А. Снарский ; Под общ. ред. А. А. Снарского. - Москва : «Транспорт», 1965. – 160 с. - Текст : непосредственный.

37 **Гольдштейн, Л.Д.** Электромагнитные поля и волны : монография / Л. Д. Гольдштейн, Н. В. Зернов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Сов. радио, 1971. - 662 с. : ил.; 22 см. – Текст : непосредственный.

38 **Патент № 2701601 Российская федерация, МПК B60M 1/28(2006.01), B61D 15/00(2006.01), B66F 11/00(2006.01).** Устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе № 2018131018 : заявл. 2018.08.28 : опубл. 2019.09.30 / Семенова Е.Ю., Иодко Ю.В., Семенова Д.В., Куликов А.А. : заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта (МИИТ)" РУТ (МИИТ). – 5с. : ил. – Текст : непосредственно.

39 **Куликов, А. А.** Инновационные решения для контактной сети ВСМ и инфраструктуры железной дороги на магистральных линиях, электрифицированных на переменном токе / А. А. Куликов, Д. В. Семенова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XLVII Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 июля 2021 года. – Пенза: Общество с ограниченной ответственностью "Наука и Просвещение", 2021. – С. 110-114. – EDN OSNZTO.

40 Журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» : [сайт] / учредитель ООО «Кабель». – Москва, 2010. – URL: https://eepir.ru/new/vorovstvo-provoda-i-nbsp-metallicheskih-ugolkov-lep-grozit-realnym-srokom-v-nbsp-tjurme/ (дата обращения 02.02.2024). – Текст : электронный.

41 Газета «Коммерсантъ» : [сайт] / учредитель АО «Коммерсантъ». – Москва, 1995. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/6000869 (дата обращения 12.01.2024). – Текст : электронный.

42 Интернет-газета «Newslab» : [сайт] / учредитель Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Новостей». – Красноярск, 2001. - URL: https://newslab.ru/news/1167734 (дата обращения 20.07.2023)). – Текст : электронный.

43 **СТО НОСТРОЙ 2.33.216-2016.** Работы по строительству объектов нетягового электроснабжения : стандарт организации : издание официальное : утвержден и введен в действие решением Совета Ассоциации «Национальное объединение строителей» от 14.12.2016 №91 : введен впервые : дата введения 2016.12.14 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Северо-Западный научный информационно-консалтинговый центр» (ООО «СЗНИКЦ»). - Москва : БСТ, 2020 – 50 с. – Текст : непосредственный.

44 **Патент № 2286891 Российская Федерация, МПК B60M 3/00 (2006.01), H02J 3/01 (2006.01).** Высоковольтная проводная система продольного электроснабжения, совместимая с электромагнитным полем контактной сети электрических железных дорог, электрифицированных на переменном токе : № 2004136356/11 : заявл. 2004.12.15 : опубл. 2006.11.10 / Бадёр М.П., Семенова Е.Ю., ЕрмоленкоД.В., Иодко Ю.В. ,Гетта Ю. Н. , Добровольскис Т.П. : заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта МПС России. – 7с. : ил. – Текст : непосредственный.

45 MathCad v13 : система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования [для домашнего моделирования и учебных целей] / разработчик PTC, Inc. – Москва : 1С, 2020. – 1 CD-ROM. – (1С: Электронная дистрибьюция). – Загл. С титул. Экрана. – Электронная программа : электронная.

46 **Крюков, К.П.** Конструкции и механический расчет линий электропередач : учебник для ВУЗов : 2-е изд., перераб. и доп. / К.П. Крюков, Б.П. Новгородцев. – Ленинград : «Энергия» Ленинградское отделение, 1979. - 310 с. – Текст : непосредственный.

47 **Гаврюшина, Н.Т.** Численное моделирование процесса прокладки воздушных линий электропередач / Н. Т. Гаврюшина, С. С. Гаврюшин, Е. В.

Арбузов [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 11(83). – С. 1. – DOI 10.18698/2308-6033-2018-11-1818. – EDN YPEETB.

48 **Минаков, А.П.** Основы механики нити : монография / А.П. Минаков ; (Научно-исследовательские труды / Моск. текстил. ин-т / Кафедра теорет. механики; т. IX, вып. 1). – Ленинград : Гизлегпром, 1941 (Ленинград). - 88 с. : черт.; 22 см. – Текст : непосредственный.

49 **Меркин, Д.Р.** Введение в механику гибкой нити : монография / Д.Р. Меркин. – Москва : Наука, 1980. – 240 с. – Текст : непосредственный.

50 **Светлицкий, В.А**. Механика гибких стержней и нитей : монография / В.А. Светлицкий. - Москва : Машиностроение, 1978. - 222 с. : ил.; 22 см. – Текст : непосредственный.

51 **Allgower, E.L.** Introduction to Numerical Continuation Methods. Classics in Applied Mathematics : monograph / E. L. Allgower, Kurt Georg. – Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2003. - №45. – 413 p. – ISBN 0-89871-544-X (pbk).

52 **Корн, Гранино А**., Справочник по математике для научных работников и инженеров : Определения. Теоремы. Формулы / Г. Корн, Т. Корн ; [Пер. И. Г. Арамановича (ред. пер.) и др.]. - 6. изд., стер. – Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2003. - 831 с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-8114-0485-9 : 5000. – Текст : непосредственный.

53 **Валишвили, Н.В.** Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ : монография / Н.В. Валишвили. - Москва : Машиностроение, 1976. - 278 с. : черт.; 23 см. – Текст : непосредственный.

54 **Гаврюшин, С.С.** Численный анализ элементов конструкций машин и приборов : монография / С. С. Гаврюшин, О. О. Барышникова, О. Ф. Борискин. - 2-е изд., испр. - Москва : Издательство Московский Государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2014. - 479 с. : ил.; 22 см.; ISBN 978-5-7038-3979-9. – Текст : непосредственный.

55 Механизация работ в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог. Методическое пособие по устройству, эксплуатации автомотрис, автодрезин, специальных машин, механизмов и средств малой механизации, применяемых в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог Российской Федерации : методическое пособие / Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги». — Москва : «ТРАНСИЗДАТ», 2004 г. — 456 с. – Текст : непосредственный.

56 **Ратнер, М.П.** Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог : монография / М. П. Ратнер, Е. Л. Могилевский. - Москва : Транспорт, 1985. - 295 с. : ил.; 22 см. – Текст : непосредственный.

57 **Glover, J. D.** Power system analysis & design : monograph / J. D. Glover, T. Overbye, M. S. Sarma. – 6-th edition. – Boston : Cengage Learning, 2017. – 962 p. – ISBN 978-1-305-63213-4.

58 **Bryant, D.** Grid Congestion / D. Bryant // Electricity Today T & D Magazine. – 2013. - №26. - pp. 58–60.

59 Электроснабжение нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Устройство, обслуживание, ремонт : учебное пособие / под редакцией В. М. Долдина. — 2-е изд. — Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. — 304 с. — ISBN 978-5-9994-0102-1. – Текст : непосредственный.

60 Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств электроснабжения сигнализации, централизации, блокировки и связи на федеральном железнодорожном транспорте : (ЦЭ 881) : официальное издание : утверждена Министерством путей сообщения РФ 14 марта 2002 г. : введена в действие 14.03.2002. – Москва : «Трансиздат», 2002. – 40 с. : ISBN 5-900345-17-X. – Текст : непосредственный.

61 Электротехнический справочник : В 4-х т. / Под общ. ред. И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. - 10. изд., испр. и доп. - Москва : Изд-во МЭИ, 2009. - 27 см.

Т. 2 : Электротехнические изделия и устройства. Т. 2. – 2009. – 518 с. – Текст : непосредственный.

62 **СТО РЖД 07.020-2014.** «Линии электропередачи напряжением выше 1000 В, предназначенные для электроснабжения нетяговых потребителей электроэнергии. Методика расчета потерь напряжения и мощности» : утверждено и введено распоряжением ОАО РЖД от 10.01.2014 №2623р : введен впервые :дата введения 2015.01.01. / разработан Проектно-конструкторским бюро по электрификации железных дорог (ПКБ ЭЖД) - филиалом ОАО "РЖД". – Москва, 2015. – 15 с. – Текст : непосредственно.

63 **Смоловик, С. В.** Анализ технического состояния электрических сетей 0,38-110 кв Российской Федерации / С. В. Смоловик, Ф. Х. Халилов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 2(5). – С. 24-29. – EDN PCRHQR. – Текст : непосредственый.

64 **Аржанников, Б. А.** Технико-экономическое обоснование применения кронштейна вл сцб и пэ, выполненного из композитного материала / Б. А. Аржанников, Н. А. Афанасьева, Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2015. – № 2(45). – С. 92-95. – EDN TXOYOF. – Текст : непосредственый.

65 **ГОСТ 839-2019.** Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия = Uninsulated wires for aerial power lines. Specifications : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и

метрологии от 29 ноября 2019 г. N 1285-ст : введен взамен ГОСТ 839-74 : дата введения 2020.05.01 / разработан Открытым акционерным обществом "Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности" (ОАО "ВНИИКП"). – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.

66 **ТУ 16-705.500-2006.** Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи : технические условия : издание официальное : утвержден и введен председателем технического комитета по стандартизации ТК 46 "Кабельные изделия" Г.Г. Саваловым и президент ассоциации "Электрокабель" И.Б. Пешковым : введен взамен ТУ 16.К71-268-98 и ТУ 16.К71-272-98 : дата введения 2006.07.01 / разработан Открытым акционерным обществом "Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности" (ОАО "ВНИИКП"). – Москва : Стандартинформ, 2006. – Текст : непосредственный.

67 EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above // Electric Power Research Institute (EPRI). – Palo Alto, CA, 2008. – P. 1210.

68 **Михайлюк, М. В.** Моделирование датчиков в системах виртуального окружения / М. В. Михайлюк, Е. В. Страшнов, Д. М. Логинов. – Текст : непосредственный // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. – 2018. – Т. 8. – № 2. – С. 70-76. – DOI 10.25682/NIISI.2018.2.0009.

69 **Туктаров, М. Ф.** Применение энкодерного датчика в системах управления линейного электропривода зерноочистительной машины / М. Ф. Туктаров, Ш. Ф. Сираев, А. Р. Газизов. – Текст : непосредственный // Энергетика - агропромышленному комплексу России : материалы международной научно-практической конференции, Челябинск, 05–07 июня 2017 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Департамент научно-технологической политики и образования; ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет. – Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2017. – С. 189-195.

70 **Ambrož, M.** Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human powered vehicles / M. Ambrož // Measurement. – Ljubljana, 2017. – vol. 100. – pp. 7-18. – URL: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.037 (date of the application 2024.01.12).

71 **ГОСТ 8731-74.** Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования = Seamless hot-deformed steel pipes. Specifications : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от

19.11.74 № 2560 : введен взамен ГОСТ 8731-66 : дата введения 1976.01.01 / разработан Министерством черной металлургии СССР. – Москва, Издательство Стандартов, 1995. – 8 с. – Текст : непосредственный.

72 **ГОСТ 8732-78.** Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент = Seamless hot-deformed steel pipes. Range of sizes : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 22.03.78 N 757 : введен взамен ГОСТ 8732-70 : дата введения 1979.01.01 : с Изменениями N 1, 2, утвержденными в феврале 1982 г., сентябре 1988 г. (ИУС 5-82, 1-89) / разработан Министерством черной металлургии СССР. – Москва, Издательство Стандартов, 1988. – 11 с. – Текст : непосредственный.

73 **ГОСТ 8733-74.** Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные и теплодеформированные. Технические требования = Seamless cold and warm deformed pipes. Specifications : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 19.11.74 N 2561 : введен взамен ГОСТ 8733-66 : дата введения 1976.01.01 : с Изменениями № 1, 2, 3, 4, утвержденными в марте 1976 г., феврале 1980 г., декабре 1985 г., апреле 1992 г. (ИУС 4-76, 4-80, 4-86, 7-92). – Москва, Издательство Стандартов, 1992. – 5 с. – Текст : непосредственный.

74 **ГОСТ 8734-75.** Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент = Seamless steel tubes cold deformed. Range : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 13.10.75 N 2604 : введен взамен ГОСТ 8734-58 : дата введения 1977.01.01 : с Изменениями № 1, 2, 3, утвержденными в августе 1978 г., ноябре 1981 г., марте 1988 г. (ИУС 9-78, 2-82, 6-88) / разработан Министерством черной металлургии СССР. – Москва, Стандартинформ, 2007. – 12 с. – Текст : непосредственный.

75 **ГОСТ 5151-79.** Барабаны деревянные для электрических кабелей и проводов. Технические условия = Wooden drums for electrical cables and wires. Specifications : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 22.02.79 N 685 : введен взамен ГОСТ 5151-71 : дата введения 1980.01.01 : с Изменениями № 1, 2, 3, утвержденными в июне 1986 г., июле 1990 г., мае 1998 г. (ИУС 10-86, 11-90, 1-99)). – Москва, Стандартинформ, 2008. – 18 с. – Текст : непосредственный.

76 **ГОСТ 18690-2012.** Кабели, провода, шнуры и кабельная арматура. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение = Cable, wires, cord and armature. Marking, packing, carriage and storage : национальный стандарт Российской

Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06.09.2013 г. N 907-ст : введен взамен ГОСТ 18690-82 : дата введения 2014.07.01. / разработан Открытым акционерным обществом "Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности" (ОАО "ВНИИКП"). – Москва, Стандартинформ, 2014. – 20 с. – Текст : непосредственный.

77 **Короткевич, М.А.** Монтаж электрических цепей [Текст] : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по электротехническим специальностям / М. А. Корткевич. - Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 510 с. : ил., табл. - ISBN 978-985-06-2085-9 – Текст : непосредственный.

78 **ГОСТ 8645-68.** Трубы стальные прямоугольные. Сортамент = Rectangular steel tubes. Range : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен Постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 25.04.68 : введен взамен 8645-57 : дата введения 1969.01.01. / разработан Министерством металлургии СССР. – Москва, ИПК Издательство Стандартов, 2004. – 14 с. - Текст : непосредственный.

79 **ГОСТ 30245-2003.** Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия = Steel bent closed welded square and rectangular section for building constructions. Specifications : государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен постановлением Госстроя России от 30 июня 2003 г. № 130 : введен взамен ГОСТ 30245-94 : дата введения 2003.10.01. / разработан Центральным научно-исследовательским и проектным институтом строительных металлоконструкций им. Н.П. Мельникова (ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова»). – Москва, Стандартинформ, 2008. – 19 с. – Текст : непосредственный.

80 **Кудишин, Ю.И.** Металлические конструкции : учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по направлению "Строительство" / Ю. И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева ; под ред. Ю. И. Кудишина. - 13-е изд., испр. - Москва : Академия, 2011. - 680, с. : ил., табл.; 24 см. - ISBN 978-5-7695-8483-1. – Текст : непосредственный.

81 SolidWorks 2019 / SolidWorks Simulation : система трехмерного моделирования [для домашнего моделирования и учебных целей] / разработчик «Dassault Systèmes SE – 3DS». – Москва : 1С, 2016. – 1 CD-ROM. – (1С: Электронная дистрибьюция). – Загл. с титул. экрана. – Электронная программа : электронная.

82 **ГОСТ 535-2005.** Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия = Common quality carbon

steel bar and shaped sections. General specifications : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июля 2007 г. № 186-ст : введен взамен ГОСТ 535-88 : дата введения 2008.07.01. / разработан Научно-исследовательским институтом «УкрНИИмет» Украинского государственного научно-технического центра «Энергосталь» Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 327 «Прокат сортовой, фасонный и специальные профили». – Москва, Стандартинформ, 2007. – 16 с. – Текст : непосредственный.

83 **ГОСТ 19281-2014.** Прокат повышенной прочности. Общие технические условия = High strength rolled steel. General specification : национальный стандарт :утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24.10.2014 г. № 1430-ст : введен взамен ГОСТ 19281-89 : дата введения 2015.01.01. / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П.Бардина» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина»). – Москва, Стандартинформ, 2016. – 51 с. –Текст : непосредственный.

84 **Сиренко, Е. Р.** Сравнительный анализ технологий сварки оцинкованных труб водоснабжения / Е. Р. Сиренко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 8. – С. 297-300. – EDN EUFFAZ.

85 **Попов, Е.П.** Робототехника и гибкие производственные системы : монография / Е. П. Попов. - Москва : Наука, 1987. - 190 с. : ил.; 21 см. –Текст : непосредственный.

86 **ГОСТ 19330-2013.** Стойки для опор контактной сети железных дорог. Технические условия = Masts (poles) for overhead contact line supports of railways. Specfications : национальный стандарт :утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 08.11.2013 г. №1480-ст : введен впервые : дата введения 2014.06.01. / подготовлен Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ВНИИНМАШ). – Москва, Стандартинформ, 2014 – 51 с. –Текст : непосредственный.

87 **СП 32-104-98.** Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм : утвержден зам. директора ОАО «ЦНИИС» 27.12.96 : одобрен Минземстроем России (письмо № 13-498 от 08.09.98 г.) : официальное издание : введен впервые : дата введения 1999.01.01. / разработан институтом ОАО «ЦНИИС» С участием ВНИИЖТ, ОАО «Мосгипротранс», АО «Ленгипротранс», АО «Сибгипротранс», Киевгипротранс, Московского государственного

университета путей сообщения, РИСИ, Промтрансниипроект, ТашИИТ. – Москва, Государственный комитет российской федерации по строительной, архитектурной и жилищной политике (госстрой россии), 1999 – 91 с. - Текст : непосредственный.

88 Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник Е23. Электромонтажные работы. Выпуск 3. Воздушные линии электропередачи и строительные конструкции открытых распределительных устройств напряжением 35 кВ и выше : (ЕНиР Е23) : официальное издание : утвержден и введен в действие постановлением Государственного строительного комитета СССР, Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам и Секретариата Всесоюзного Центрального Совета Профессиональных Союзов от 5 декабря 1986 г. № 43/512/29-50 : введены в действие 1986.12.05 / разработаны Центром по научной организации труда и управления в энергетическом строительстве (Энергостройтруд) Министерства энергетики и электрификации СССР и нормативно-исследовательскими станциями № 4 при тресте «Южэлектросетьстрой» (НИС № 4) и № 10 при тресте «Уралэлектросетьстрой» (НИС № 10) с использованием нормативных материалов других министерств и ведомств под методическим руководством и при участии Центрального бюро нормативов по труду в строительстве (ЦБНТС) при ВНИПИ труда в строительстве Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1988. – 64 с. – Текст : непосредственный.

89 **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины : учебник для вузов в двух томах / А. В. Иванов-Смоленский. - 3-е изд., стер. - Москва : Изд. дом МЭИ, 2006 - (Москва : Типография "Наука" РАН). - 22 см. - ISBN 5-903072-66-6. – Текст : непосредственный.

Т. 1 : Электрические машины. Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах и их устройство. Основные вопросы теории и конструкции трансформаторов и асинхронных машин. – 2006. – 656 с.

90 **Кармушев, Р. Р.** Обзор конструкций шаговых двигателей / Р. Р. Кармушев, Т. А. Бучельникова // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы XIV Национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 28 апреля 2023 года / Под общей редакцией С.М. Бакирова. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2023. – С. 128-133. – EDN PVOGMX. – Текст : непосредственный.

91 **Белов, М. П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" направления подготовки дипломированных специалистов "Электротехника, электромеханика и

электротехнологии" / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. - 2-е изд., стер. - Москва : Academia, 2004. - 574, [1] с. : ил.; 22 см. - (Высшее профессиональное образование. Электротехника).; ISBN 5-7695-1314-4 : 5100 экз. – Текст : непосредственный.

92 **Кузнецов, В.А**. Вентильно-индукторные двигатели : учебное пособие по курсу "Специальные электрические машины" для студентов, обучающихся по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исследовательский ун-т "МЭИ". - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Изд. дом МЭИ, 2011. - 71, [1] с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-383-00656-6. – Текст : непосредственный.

93 **Фираго, Б.И.** Теория электропривода : учебное пособие для студентов специальности "Автоматизированные электроприводы" учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск : Техноперспектива, 2007. - 585с. – ISBN 978-985-6591-46-7. – Текст : непосредственный.

94 **Емельянов, А. В.** Шаговые двигатели: учеб. пособие / А. В. Емельянов, А. Н. Шилин; Федеральное агентство по образованию, Волгоградский гос. технический ун-т. - Волгоград : Политехник, 2005. - 45 с. : ил.; 21 см. - ISBN 5-230-04591-4. – Текст : непосредственный.

95 **Ряшенцев, Н. П**. Соленоидные молотки / Н.П. Ряшенцев, Е. М. Тимошенко. – Текст : непосредственный. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1959. – Том № 108. – С. 177-188.

96 **Москаленко, В. В**. Электрический привод : учебник для студентов высших учебных заведений / В. В. Москаленко. - Москва : издательский центр «Академия», 2007. – 368 с. ; 22 см. - ISBN 978-5-7695-2998-6. – Текст : непосредственный.

97 **Решетов, Д. Н.** Детали машин : учебник для машиностроительных и механических специальностей вузов / Д. Н. Решетов. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1989. - 496 с. : ил.; 24 см. - ISBN 5-217-00335-9. – Текст : непосредственный.

98 **Касаткин, А. С.** Электротехника : учебник для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 9-е изд., стер. – Москва : издательский центр «Академия», 2005. – 544 с. – ISBN 5-7695-2144-9. – Текст : непосредственный.

99 **Зимин, Е. Н.** Автоматическое управление электроприводами : учебное пособие для вузов по спец. "Электропривод и автоматизация пром. установок" / Е.Н. Зимин, В.И. Яковлев. - Москва : Высшая школа, 1979. - 318 с. : ил.; 22 см. – Текст : непосредственный.