

На правах рукописи

**Картовенко Алла Валерьевна**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ  
МОНТАЖА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре компьютерных систем автоматизации производства в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

**Арбузов Евгений Васильевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем автоматизации производства федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты:

**Балык Владимир Митрофанович**

Доктор технических наук, профессор кафедры проектирования аэрогидрокосмических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Шилин Алексей Александрович**

Кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Защита состоится 12 октября 2022 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1. Телефон для справок: 8(499) 267-09-63.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с печатью организации просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.331.02,  
кандидат технических наук, доцент

А.В. Богданов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационного исследования.** Сегодня в воздушных линиях электропередачи (ЛЭП ВЛ) применяется новая инновационная кабельно-проводниковая продукция, включающая высокотехнологичные оптоволоконные информационные кабели, композитные провода с сердечниками из углеволокна и алюминиевой керамики и нанокompозитные провода. Она потребовала применения нового метода монтажа «под тяжением».

Процесс монтажа ЛЭП ВЛ связан с большими рисками: обрывом кабеля или провода в процессе работ при неверно выбранном режиме прокладки, тяжением ЛЭП ВЛ над различными объектами (жилыми и промышленными зданиями, через реки, трассы и горы), короткими сроками проведения строительных работ, влиянием неблагоприятных погодных условий (обледенением, ветровой нагрузкой, колебаниями температуры), отключением от электричества в случае аварии городов и регионов, строгой процедурой приемки работ и финансовыми потерями за сорванные сроки строительства ЛЭП.

Иностранные производители автоматизированных технологических монтажных комплексов (МК) и входящих в их состав мощных гидравлических машин не раскрывают свою фирменную техническую документацию.

Провод является, по сути, гибкой нитью. Тем не менее, чаще всего в инженерных задачах встречаются провода с двумя закрепленными концами, реже – провода с одним закрепленным и одним свободными концами.

Особенностью диссертационной работы является свободное перекачивание провода или кабеля в принимающих роликах опор ЛЭП ВЛ.

В современных специализированных МК для строительства ЛЭП ВЛ контролируется усилие тяжения, которое индивидуально для стрелы провеса в каждом пролете строительной длины провода или кабеля и контролируется при приемке работ. Учитывая, что стоимость новой кабельно-проводниковой продукции до 5 и более раз выше традиционной и что монтаж провода или кабеля связан с отключением электричества, заменой отдельных фаз сети при высоком напряжении на остальных фазах, ведущие компании (Tescmec, CBS, TE.MA, Carabelli, Jakob Thaler и др.) оснащают гидравлическое оборудование МК электронными системами автоматизированного управления (САУ).

Таким образом, разработка методики моделирования МК и САУ МК, основанной на теории гибкой нити и представлениях производства гидравлического оборудования МК для монтажа ЛЭП ВЛ методом «под тяжением», является **актуальной научной проблемой**.

**Степень разработанности темы.** Вопросам теоретического и практического решения задач моделирования гибкой нити, проектирования автоматизированных систем посвящено много исследований авторов в отечественных и зарубежных работах.

Вопросами теории гибкой нити, представляющей широко разветвленную дисциплину, занимались Д.Р. Меркин, В.А. Светлицкий, Н.И. Алексеев,

В.Г. Имшенецкий, В.К. Качурин, В.И. Куркин, А.П. Минаков, И.А. Биргер, С.С. Гаврюшин и др.

В численных методах изучаются приближенные методы решения задач алгебры, анализа, дифференциальных уравнений и их приложений в задачах механики и математической физики.

Управлению инженерных систем посвящена теория автоматического управления (ТАУ), предназначенная для синтеза систем автоматического регулирования (САР).

Методы разработки САР нашли применение при решении задач управления систем в разработках И.И. Ползунова, Д. Уатта, В.А. Бесекерского, А.А. Воронова, В.К. Титова и Б.Н. Новогранова, А.П. Минакова, И.П. Норенкова, Е.П. Попова, В.В. Солодовникова, В.Н. Плотникова, В.Ю. Зверева и др.

До настоящего времени не проводилось исследований, объединяющих эти задачи с целью моделирования и автоматизации МК с использованием многочисленных современных методик и средств.

**Целью диссертационной работы** является повышение производительности, качества и безаварийности работы гидравлических МК для прокладки ЛЭП ВЛ методом монтажа «под тяжением» путем разработки и исследования модели МК и САУ МК для его эксплуатации и проектирования новых видов гидравлического оборудования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) анализ существующей кабельно-проводниковой продукции, метода проектирования ЛЭП ВЛ и основных требований к монтажу ЛЭП ВЛ;
- 2) анализ методов монтажа ЛЭП, используемого гидравлического оборудования, зарубежных аналогов, современных средств автоматизации гидравлических систем;
- 3) разработка методики моделирования пролетов ЛЭП ВЛ, пакета прикладных программ для их моделирования; математических моделей кабельного тормозного домкрата с барабаном и строительной длиной провода или кабеля, натяжной и тормозной машин МК;
- 4) разработка структуры, состава САУ МК и алгоритма управляющей программы САУ МК;
- 5) разработка рекомендаций по управлению МК.

**Методы исследования** основаны на использовании результатов теории гибкой нити, теоретических основ механики, динамики систем, теории автоматического управления, методов разработки систем автоматического регулирования, методов математического моделирования сложных систем с применением вычислительных средств. Исследования проводились с использованием математических моделей и в реальных условиях эксплуатации МК в составе комплекса для строительства контактных линий железных дорог. Математическое моделирование проводилось в средах Mathcad и MATLAB.

**Объектом исследования** является монтажный комплекс для строительства ЛЭП ВЛ.

**Предметом исследования** является моделирование пролетов ЛЭП ВЛ, автоматизация управления МК с применением современных средств автоматизации гидравлических систем.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Предложена методика моделирования пролетов ЛЭП ВЛ с возможностью свободного перекачивания кабель-проводов в роликах опор ЛЭП ВЛ для расчета силы тяжения и стрелы провеса проводов в опорах ЛЭП ВЛ.
2. Методика моделирования пролетов реализована в прикладном пакете программ в среде MATLAB, позволяющий показать состояние кабеля или провода в пролетах.
3. Получены новые теоретические результаты моделирования пролетов ЛЭП ВЛ для различных конфигураций строительных трасс.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработанные математические модели пролетов и гидравлического оборудования использованы для определения необходимых параметров МК. Они позволили запрограммировать и настроить работу оборудования МК для достижения проектных значений стрел провеса в пролетах ЛЭП, указываемые в документации на строительно-монтажные работы по созданию ЛЭП ВЛ.
2. В результате проведенных исследований модели МК содержат данные для описания и его моделирования как объекта автоматизированного управления. Они позволяют как на стадии проектирования, так и при эксплуатации определять режимы и законы управления МК.
3. Определен момент начала торможения на основном этапе монтажа.
4. Разработана структура САУ МК, состав ее компонентов, алгоритм ее управляющей программы.
5. Предложены рекомендации по управлению МК и другим гидравлическим оборудованием.
6. Разработанная САУ МК нашла применение для управления МК для строительства контактных сетей железных дорог.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика моделирования и расчета пролетов ЛЭП ВЛ с возможностью свободного перекачивания кабель-проводов в роликах опор ЛЭП ВЛ.
2. Прикладной пакет программ в среде MATLAB для расчета усилия тяжения и стрел провеса в пролетах ЛЭП ВЛ.
3. Структура и состав САУ МК и алгоритм управляющей программы.
4. Рекомендации по управлению МК большой протяженности с гидравлическим оборудованием большой мощности.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует пунктам паспорта специальности «Автоматизация технологических процессов и производств»: п. 2 «Автоматизация контроля и испытаний», п. 3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства

(АСТПП) и т. д.» и п. 19 «Разработка методов обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП и других систем и средств управления».

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**, приводимых в работе, обеспечивается принятыми за основу объективно существующими физическими законами, известными уравнениями динамики, непротиворечивостью результатов, полученных теоретическим путем, совпадением результатов машинного эксперимента с экспериментальными данными. Достоверность основных положений диссертации подтверждена положительным опытом внедрения результатов диссертационной работы в конструкторской работе изготовителя гидравлического оборудования МК, в т.ч. контактных и поддерживающих проводов электрифицированных железных дорог для ПАО «Тихорецкий машиностроительный завод им. В.В. Воровского».

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на научных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции «Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами» (г. Уфа, 2011 г.), 9-ой ежегодной конференции «Эффективные методы автоматизации подготовки и планирования производства» (г. Москва, 2012 г.), а также на XVIII и XXI Московском Международном Салоне «АРХИМЕД», (г. Москва) в 2015 и 2018 г.

**Внедрение результатов работы.** Полученные результаты и материалы диссертационной работы используются предприятиями, которые являются разработчиками и производителями такого оборудования: ООО «СИ» и ПАО «Тихорецкий машиностроительный завод им. В.В. Воровского».

**Личный вклад автора.** Диссертация является законченной работой, в которой приводятся результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 15 научных публикациях, из них 6 в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, основные результаты и выводы, список условных обозначений и сокращений, список литературы и приложение. Общий объем диссертации составляет 235 печатных страниц, содержит 6 таблиц и 71 рисунок, список литературы включает 168 наименований, из них 20 иностранных источников. Приложение на 59 печатных страницах содержит листинг программ и акты о внедрении.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, дана оценка научной новизны и практической ценности полученных результатов и сформулированы положения защиты.

**В первой главе** излагается состояние вопроса. Представлен обзор методов монтажа ЛЭП ВЛ и расчета гибкой нити. Основным для ВЛ является метод монтажа «под тяжением», т.к. отсутствуют повреждения на проводе, «эффект короны» уменьшается, провод не портится, т.к. он висит над землей. В результате проведенного обзора в качестве объекта исследования выбран гидравлический МК, состоящий из провода или кабеля и специального мощного гидравлического и вспомогательного оборудования.

Исходные данные рассчитываются на этапе проектирования перед строительством ЛЭП с помощью специальных программ. Результатом является техническая документация с указанием марки провода, напряжения, количества и координат опор, температурных условий. Номинальное значение усилия тяжения соответствует **проектным заданиям** на монтаж строительной длины. Точность соответствия монтажных и проектных значений стрел провеса влияет на монтаж и на дальнейшую эксплуатацию ЛЭП ВЛ. Стрела провеса провода зависит от усилия тяжения.

Перед началом работ целесообразно программировать, настраивать гидравлические натяжные и тормозные машины на режим работы с номинальным значением усилия тяжения для прокладываемой марки провода. Программирование САУ МК под определенный тип провода обеспечивает соответствие параметров монтажа (длины, скорости и усилия тяжения, стрел провеса) проектным значениям для каждой строительной длины. Строительная длина – общая длина провода, поставляемого на кабельном барабане с завода-изготовителя.

Определены параметры управления (усилие и скорость тяжения) и критерии качества монтажа (обеспеченная стрела провеса согласно проектным данным, как можно меньшее время и безаварийность монтажа). В понятие «безаварийности» входит отсутствие повреждения и падения ЛЭП ВЛ на леса, сооружения, отсутствие короткого замыкания, неблагоприятных погодных условий, наличие охранной зоны вдоль прокладываемых линий, правильный режим торможения.

**Во второй главе** рассматривается методика моделирования и расчета пролета ЛЭП ВЛ в статической постановке задачи. Задача решается двумя способами: задачей Коши и численным методом – методом Ньютона. Методика анализа многопараметрической задачи реализована в разработанном прикладном пакете программ в среде MATLAB. Провод или кабель заменяется касательной к его кривой. Процесс статического деформирования нерастяжимого провода представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{ds} = \cos\theta, \\ \frac{dy}{ds} = \sin\theta, \\ \frac{dU}{ds} = 0, \\ \frac{d\theta}{ds} = -q_v \frac{\cos^2\theta}{U}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Необходимо задать такие значения горизонтальной составляющей усилия тяжения  $U$  и угла поворота провода  $\theta$ , чтобы проложить провод в пролете ЛЭП из т.  $A$  в т.  $B$  (см. Рисунок 1).

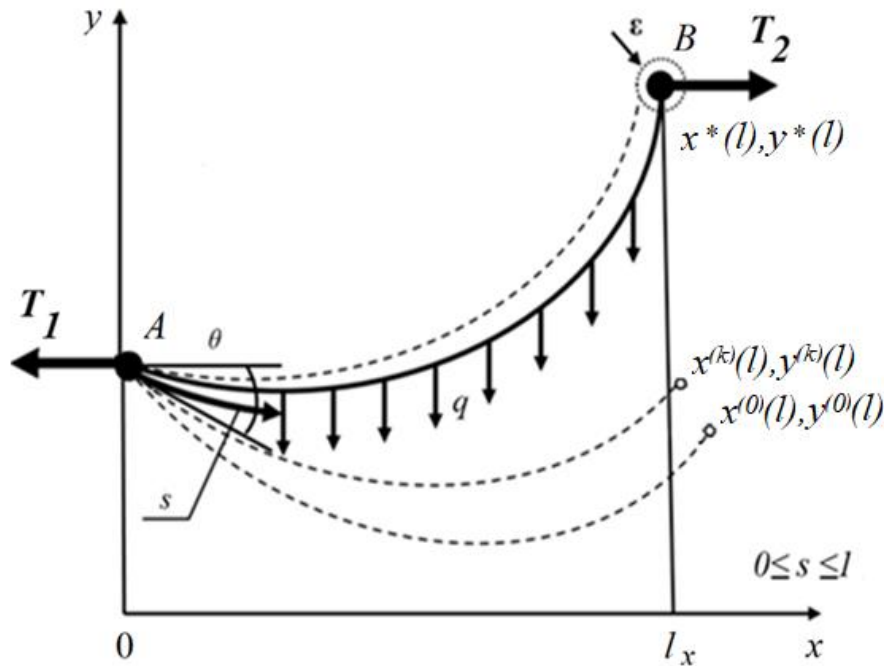


Рисунок 1. Модель пролета: т.  $A$  и  $B$  – опоры ЛЭП с роликами,  $T_1$  и  $T_2$  – горизонтальные составляющие усилия торможения и тяжения,  $q$  – удельный вес провода,  $x$  и  $y$  – координаты опор,  $s$  – координата, отсчитываемая вдоль дуги провода,  $\theta$  – угол поворота провода,  $l_x$  – проекция провода на ось  $x$ ,  $l$  – максимальная длина дуги провода,  $\varepsilon$  – ошибка попадания в т.  $B$ ,  $(0)$ ,  $(k)$ ,  $(*)$  – номера итерации,  $x^{(0)}; y^{(0)}$  – начальное решение,  $x^{(k)}; y^{(k)}$  – текущее приближение,  $x^*; y^*$  – конечное приближение (решение)

Для этого определены приращения невязок по  $U$  и  $\theta$ . После того как начальный вектор «невозмущенных»  $U$  и  $\theta$  задан, интегрируется система уравнений (1) с приращением силы  $\left\{ \begin{matrix} U^{(0)} + \delta U^{(0)} \\ \theta^{(0)} \end{matrix} \right\}$ , далее с приращением угла поворота  $\left\{ \begin{matrix} U^{(0)} \\ \theta^{(0)} + \delta \theta^{(0)} \end{matrix} \right\}$ . В итоге получается приращение векторов:

$$\Delta x_1 = \begin{Bmatrix} \frac{\delta x_1}{\delta r_1} \\ \frac{\delta x_1}{\delta r_2} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Delta x_2 = \begin{Bmatrix} \frac{\delta x_2}{\delta r_1} \\ \frac{\delta x_2}{\delta r_2} \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Для исследования поведения системы нелинейных дифференциальных уравнений использована матрица Якоби  $[J^{(0)}]$ , состоящая из частных производных:

$$[J^{(0)}] = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_1}{\delta x_1} & \frac{\delta r_1}{\delta x_2} \\ \frac{\delta r_2}{\delta x_1} & \frac{\delta r_2}{\delta x_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$



Заранее количество итераций  $k$  неизвестно, в общем виде итерационный процесс для  $k$  итераций выглядит следующим образом:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - [J^{(k)}]^{-1} \cdot r^{(k)}. \quad (5)$$

Для быстрой сходимости процесса, необходимо задавать такие начальные приближения, чтобы невязки уменьшались, и на каждом шаге приближались к решению.

**Методом продолжения решения по параметру** проведено моделирование для нескольких пролетов ЛЭП ВЛ. Последовательность строится таким образом, что первая система имеет решение  $\{X^0\}$ , а последняя система совпадает с исходной задачей. Исходная задача заменяется последовательностью задач, каждая последующая задача при этом незначительно отличается от предыдущей. Поскольку системы отличаются незначительно, то решение предыдущей задачи оказывается хорошим начальным приближением для последующей. Решая такую последовательность задач методом Ньютона, получается решение исходной системы уравнений.

Рассмотрим применяемый способ построения указанной последовательности задач. При решении системы  $F(\{X\}) = 0$  используется начальное приближение  $\{X^0\}$ . Исходное уравнение заменяется уравнением с параметром:

$$H(\{X\}, t) = 0, t \in [0, 1], \quad (6)$$

которое при моменте времени  $t = 0$  имеет решение  $\{X^0\}$ , а при  $t = 1$  совпадает с решением исходной задачи, т.е.

$$H(X^0, 0) = 0, \text{ и } H(X^*, 1) = F(X^*) = 0. \quad (7)$$

$$H(X^*, 1) = F(X^*) = 0. \quad (8)$$

Отрезок  $[0, 1]$  разбивается точками  $t_0 = 0, t_1, t_2, \dots, t_M = 1$  на  $M$  интервалов:

$$H(X, t_i) = 0, i = 0, 1, \dots, M. \quad (9)$$

**В третьей главе** выполнено машинное тестирование методики моделирования пролетов ЛЭП ВЛ методом решения по параметру и предложено решение задачи оптимизации времени тяжения провода. Излагаемая численная методика определения рациональных параметров управления процессом протяжки кабель-проводов на многопролетном участке ЛЭП опирается на следующие положения:

- 1) В качестве исходных параметров при моделировании задаются геометрические характеристики пролетов по координатам контактов провода с раскаточными роликами, а также физико-механические характеристики провода и нагрузки, которые испытывает МК в процессе прокладки ЛЭП ВЛ.
- 2) Согласно математической модели, не требуется фиксация провода или лидер-троса при прокладке в межпролетных роликовых опорах ЛЭП, что обеспечивает возможность перекачивания провода по роликам опор ЛЭП с одного участка на другой. Иными словами, длина провода в пределах пролета – величина переменная и априори неизвестная.

В качестве искомой величины рассматривается усилие тяжения натяжной гидравлической машины МК как важнейший параметр системы управления, который должен изменяться таким образом, чтобы с заданной точностью обеспечивать требуемое изменение перемещений и усилий и раскатываемом

проводе. Усилие тяжения может быть определено по уравнению цепной линии или по эмпирическим соотношениям. Как расчетные модели лидер-троса и провода используются модели абсолютно гибкой нерастяжимой нити, успешно применяемые для решения многих прикладных технических задач. Рассматриваемая методика предназначена для использования в САУ МК в целях обеспечения рационального выбора параметров процесса, снижающих риск появления аварийных ситуаций и повышающих эффективность работы МК.

**Математическая модель однопролетного участка.** С использованием известных допущений механики гибкой нити описание процесса нелинейного деформирования при больших перемещениях провода или лидер-троса можно проводить с помощью расчетной схемы абсолютно гибкой, однородной и нерастяжимой нити. При двумерной (плоской) постановке задачи о нахождении формы нити в поле сил тяжести решением является уравнение цепной линии. Однако непосредственное применение этого решения затруднено по причине наличия особенностей в постановке задачи — априори неизвестной длины провода в пределах пролета, многопролетности и возможности перетекания провода в роликах между пролетами ЛЭП ВЛ. Следует отметить, что такие параметры, как общая длина провода, усилие тяжения, координаты расположения роликов и углы схода провода с роликов, — варьируемые.

Рассмотрена статическая задача об определении формы провода в пределах **одного пролета**. Провод, находящийся в поле сил тяжести, закреплен в точках  $A (x_A; y_A)$  и  $B (x_B; y_B)$ , координаты которых известны. Кроме того, известны погонный вес провода —  $q$ , а также горизонтальные составляющие усилия тяжения и торможения, которые в статической постановке задачи можно принять равными:  $T_1 = T_2 = T$ . Длина провода  $l$  считается неизвестной величиной.

Вектор основных неизвестных в текущем сечении провода представляется в виде:

$$\{X(s)\} = \{x, y, U, \theta\}^T, \quad (10)$$

где  $s$  — дуговая координата, отсчитываемая вдоль провода;  $x, y$  — декартовы координаты текущего сечения;  $\theta$  — угол наклона провода, отсчитываемый от оси  $x$  против часовой стрелки;  $U$  — горизонтальная компонента растягивающего усилия в текущем сечении, связанной с усилием растяжения  $N (T_2)$  в проводе тяжения соотношением (1).

Дополняя (1) краевыми условиями в начале и в конце участка:

$$x_n = x_A^*, y_n = y_A^*, x_k = x_B^*, y_k = y_B^*, \quad (11)$$

осуществлен переход к нелинейной двухточечной краевой задаче.

Варьируемыми переменными являются горизонтальная составляющая усилия  $U$  и угол наклона  $\theta$  касательной к проводу в левой опоре.

Нелинейная задача решается **методом продолжения решения по параметру** по двухшаговой схеме в соответствии с программой, созданной в среде MATLAB: на первом шаге с помощью интерполяции по предыдущим решениям вычисляется начальное приближение, на втором происходит итерационное уточнение решения (см. Рисунок 2).

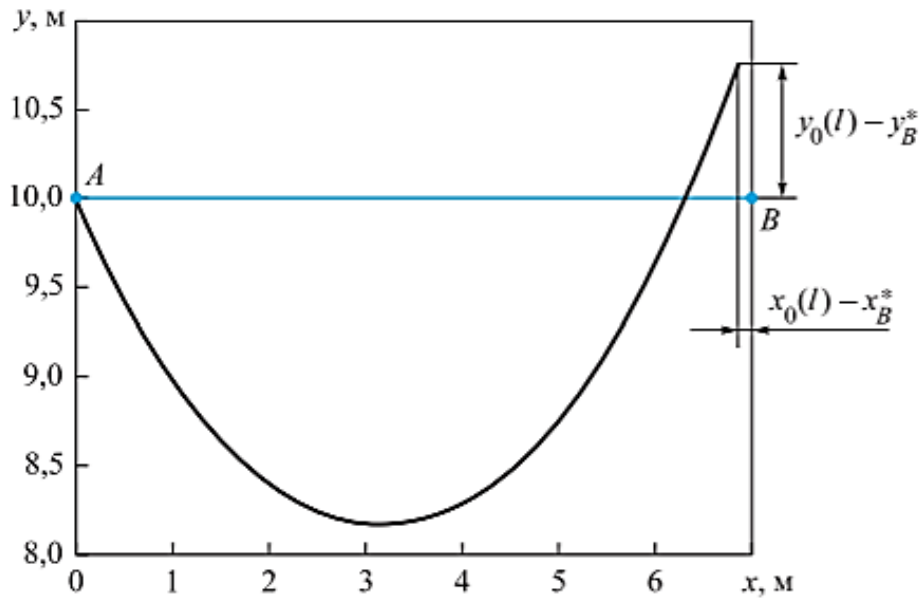


Рисунок 2. Результат интегрирования с невозмущенным начальным вектором

Итерация прекращается по достижении заданной точности. Для начала первого итерационного цикла необходимо задавать начальное приближение. Для этого используется решение по уравнению провода. Отметим, что усилие  $T = U(0)$  зависит от длины провода  $l$ , в данном случае априори неизвестной. На первом шаге вводится начальный вектор:

$$\{X^{(0)}\} = \{x_A^*, y_A^*, U^{(0)}, \theta^{(0)}\}^T, \quad (12)$$

где  $U^{(0)}, \theta^{(0)}$  – начальные приближения, получаемые в соответствии с решением по уравнению цепной линии для начального значения длины нити  $l^{(0)}$  (верхний индекс (0) обозначает номер шага итерации).

Алгоритм решения на конкретном примере. Как начальное приближение задаются следующие исходные данные:

$$x_A^* = 0, y_A^* = 10, x_B^* = 7, y_B^* = 10, U^{(0)} = -3q, \theta^{(0)} = -0.9, \quad (13)$$

где  $U^{(0)}$  – отрицательная величина, т.к. направлена против оси  $x$ , угол  $\theta^{(0)}$  задается в радианах, а координаты  $x$  и  $y$  – в метрах.

Интегрируя систему дифференциальных уравнений (10) с начальными условиями (11), вычисляем вектор невязки, а на правом конце пролета —  $\{r^0\}$ :

$$\{r^0\} = \begin{Bmatrix} x^{(0)(l)} - x_B^* \\ y^{(0)(l)} - y_B^* \end{Bmatrix}. \quad (14)$$

Для реализации итерационного решения используется модифицированный метод Ньютона. Рекуррентная формула для вычисления  $k$ -го приближения имеет вид:

$$\{X^{(k+1)}\} = \{X^{(k)}\} - [J^{(0)}]^{-1} \cdot \{r^{(k)}\}, \quad (15)$$

где  $\{X^{(k)}\}$  – вектор неизвестных на  $k$ -том шаге,  $\{r^{(k)}\}$  – вектор невязки на  $k$ -м шаге,  $[J^{(0)}]$  – матрица Якоби.

Для построения матрицы  $[J^{(0)}]$  проводим два интегрирования начальной задачи с возмущенными значениями неизвестных компонент начального вектора (возмущение сначала по усилию  $U$ , затем по углу поворота  $\theta$ ).

Найденные невязки для возмущения по горизонтальной составляющей усилия  $U - \{r_1\}$  и углу поворота  $\theta - \{r_2\}$  позволяют вычислить соответствующие приращения невязок по усилию и углу:

$$\{\Delta r_1\} = \{r_1\} - \{r_0\}, \{\Delta r_2\} = \{r_2\} - \{r_0\}, \quad (16)$$

и построить численный аналог матрицы Якоби, матрицу Гато:

$$[J^{(0)}] = \begin{bmatrix} \frac{\Delta r_1}{\Delta X_1} & \frac{\Delta r_1}{\Delta X_2} \\ \frac{\Delta r_2}{\Delta X_1} & \frac{\Delta r_2}{\Delta X_2} \end{bmatrix} = \left[ \frac{\Delta r_i}{\Delta X_j} \right]. \quad (17)$$

В уравнениях (16) номер строки матрицы соответствует номеру уравнения невязки, номер столбца – номеру варьируемой переменной. Итерация (15) продолжается до выполнения условия окончания:

$$|r^{(k)}| \leq \varepsilon, \quad (18)$$

где  $\varepsilon$  – заданная погрешность.

При построении итерационной последовательности решений используется допущение о локальной сходимости решения. При фиксированном значении  $T_2$ , отличающегося от соответствующего значения по уравнению цепной линии, необходимо найти такую длину провода  $l^*$ , чтобы по достижении дуговой координатой  $s$  значения, равного этой длине нити, координаты сечения, найденные численно, совпали с координатами правой опоры.

Заключительное численное моделирование позволяет определить компоненты вектора состояния в текущем сечении провода, представить на графиках найденную линию провеса провода в пролетах. Блок-схема алгоритма решения задачи для одного пролета приведена на Рисунке 3.

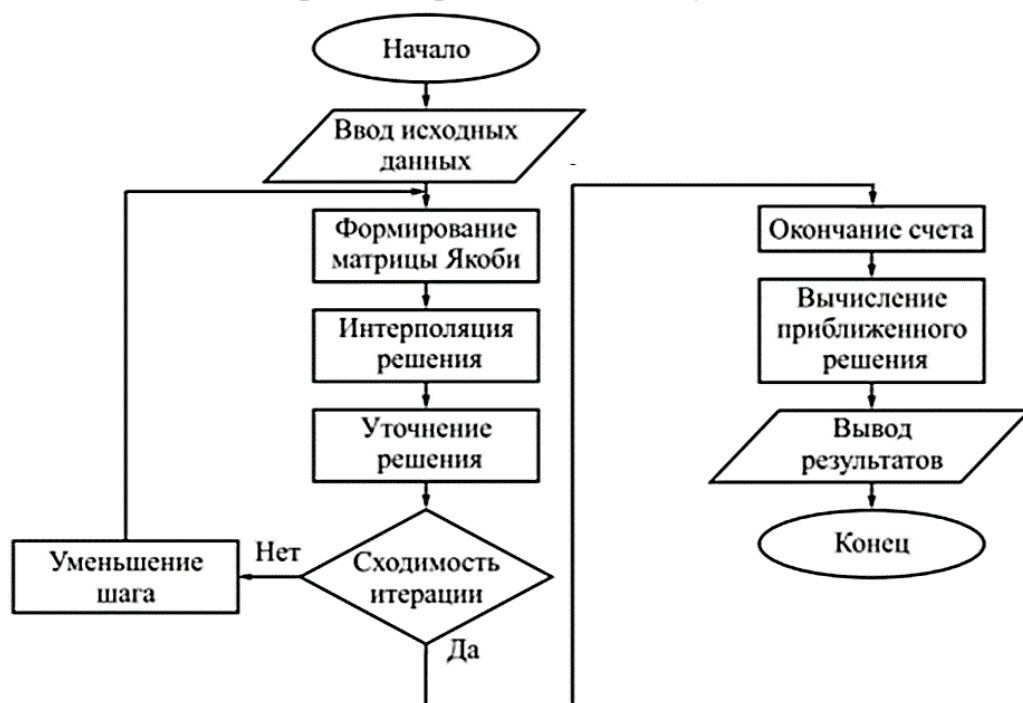


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма решения задачи для одного пролета

**Численное моделирование многопролетной задачи.** При моделировании многопролетного участка с числом пролетов  $ns$  порядок системы

дифференциальных уравнений составит  $ns \times 4$ . В краевые условия помимо условий в крайних сечениях будут входить  $(ns - 1) \times 4$  условий стыковки.

Блочно-ленточная структура матрицы Якоби, используемая в данной задаче, представлена на Рисунке 4. Первый  $[J_1]$  и последний  $[J_{ns}]$  имеют размерности  $2 \times 4$  и  $4 \times 2$ , размерность остальных ненулевых блоков матрицы –  $4 \times 4$ . Блоки  $[E]$  соответствуют единичным матрицам. Остальные элементы – нулевые.

$$\begin{bmatrix} [J_1] & [E] & [0] & \dots & [0] \\ [0] & [J_2] & [E] & \dots & [0] \\ [0] & [0] & [J_3] & \dots & [0] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & [E] \\ [0] & [0] & [0] & [0] & [J_{ns}] \end{bmatrix}$$

Рисунок 4. Структура блочно-ленточной матрицы Якоби

С помощью предложенного алгоритма определена геометрия нити на трехпролетном участке с переменным межпролетным расстоянием (см. Рисунок 5). Предложенная методика математического моделирования пролетов с разработанным алгоритмом и пакетом прикладной программы в MATLAB позволяет на стадии проектирования выполнить виртуальное моделирование технологического процесса монтажа с помощью оборудования МК.

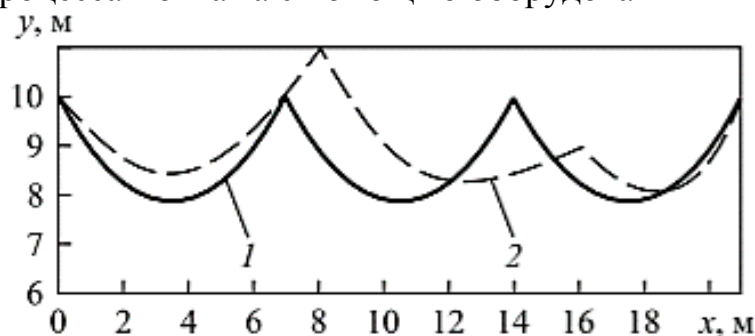


Рисунок 5. Стрелы провеса ЛЭП: (1) – равное и (2) – переменное расстояния

**В четвертой главе** определены связи между узлами и агрегатами гидравлического МК, задающие режимы его работы. Установлены параметры гидравлических МК, которые существенно влияют на их программирование и автоматизацию управления. Длина провода или кабеля в пролёте строительной длины – величина переменная, нелинейно зависящая от приложенного к гибкой связи усилия. Получены уравнения движения узлов и агрегатов технологических МК для строительства ЛЭП ВЛ новым методом («монтаж под тяжением») (кабельного домкрата, монтажных роликов, барабанов тормозной и натяжной гидравлических машин) для переменных масс и моментов инерции, исследованы нелинейные упругие параметры провисающих по законам цепной линии тросов и проводов.

Общая строительная длина монтируемого участка ВЛ равна сумме переменных длин провода и лидер-троса, она является постоянной длиной. При увеличении усилия тяжения в цепи МК длина и масса провода уменьшается. В одном пролете стрела провеса уменьшается с увеличением силы тяжения.

Приведены графики-результаты исследования модели тормозного гидравлического домкрата. Рассчитаны масса барабана, его моменты инерции. Представлен способ определения времени смотки-размотки провода на барабане, усилие тяжения, применяемое при размотке каждого слоя провода или лидер-троса. Кабельный домкрат может моделироваться массой, приведенной к точке схода с кабельного барабана провода или кабеля. Радиус приведения момента инерции кабельного барабана к радиусу смотки провода меняется в процессе работы комплекса. Исследована зависимость усилия тяжения при использовании тормоза сухого трения. Разработаны и исследованы модели отдельных элементов МК: гидравлического кабельного тормозного домкрата, гидравлических натяжной и тормозной машин. Полученные модели пролетов и оборудования МК позволили использовать их параметры в качестве входных в САУ МК: была определена зависимость усилия тяжения и стрел провеса, а постоянство мощности оборудования МК позволяет выбирать режимы: работа при низкой скорости, но высоком усилии тяжения или же наоборот.

**Пятая глава** посвящена вопросу автоматизации МК. Требуемое значение усилия тяжения провода в МК для каждой стрелы в пролете было определено при моделировании пролетов. Развиваемое натяжной машиной усилие тяжения определяется ее конструкцией, тормозным моментом на тормозной площадке и выбранным режимом работы, основными параметрами машин МК являются давление масла в системе натяжной и тормозной машин и его расход, т.е. усилие и скорость тяжения. Для подтверждения правильности расчетов модели для кабеля на установке в цеху изготовителя оборудования для монтажа ЛЭП ВЛ был проведен натурный эксперимент, схема которой представлена на Рисунке 6.

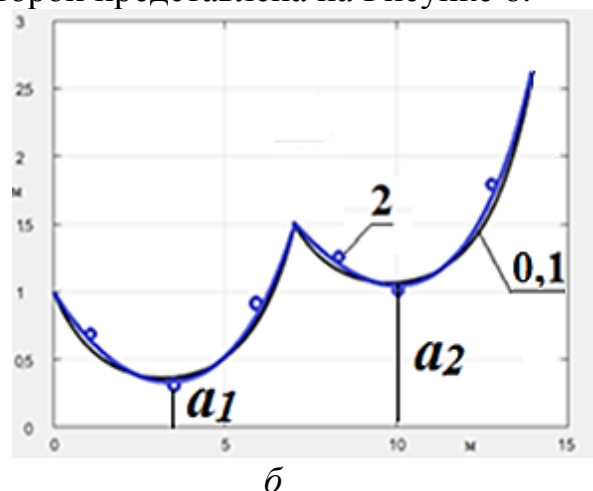


Рисунок 6. Натурный эксперимент: *а* - установка и *б* – результаты натурного эксперимента для 2-х опор: график 0 – данные проектировщиков (совпадают с графиком 1), график 1 – данные моделирования, график 2 – данные натурного эксперимента,  $a_1$ ,  $a_2$  – расстояния от нижней точки провода в каждом пролете до горизонтальной оси



Натяжение провода через ролики опор проводили в два этапа:

- 1) Лидер-трос был проложен по всем трем опоры, проходя через ролики, а провод АС, находящийся на кабельном барабане, закрепили с концом лидер-троса на участке до первой опоры.
- 2) Лидер-трос натягивался натяжной машиной МК на ее барабан, одновременно с этим процессом провод разматывался с кабельного барабана и натягивался через ролики между всеми опорами установки. На пульте натяжной машины задавалось необходимое усилие тяжения, которое отображалось на динамометре натяжной машины и записывалось регистратором усилия тяжения.

После окончания монтажа было проведено вручную измерение стрелы провеса провода с помощью рулетки с точностью до 1 мм в каждом пролете установки. Измеренные в ходе натурного эксперимента расстояния (Рисунок 6 б, график 2,) в каждом пролете в мм  $a_1$ ,  $a_2$  после проведения монтажа, отличаются от проектировочных (Рисунок 6 б, график 0,) на 3-5%, что соответствует требованиям, установленным лидерами-фирмами по изготовлению оборудования для монтажа ЛЭП ВЛ. Погрешность характеризует объективный уровень несовершенства приборов (точность динамометра, измерительной рулетки), а также неидеальность методики обработки. Выводы: многократно проведенный эксперимент подтверждает совпадение данных моделирования, полученных расчетным путем и экспериментальных данных с точностью до 5%. Таким образом, модель может быть использована для использования в САУ МК.

Разработка САУ МК выполнена на основе существующих стандартных инженерных комплексов на основании микропроцессорной системы управления (см. Рисунок 7).

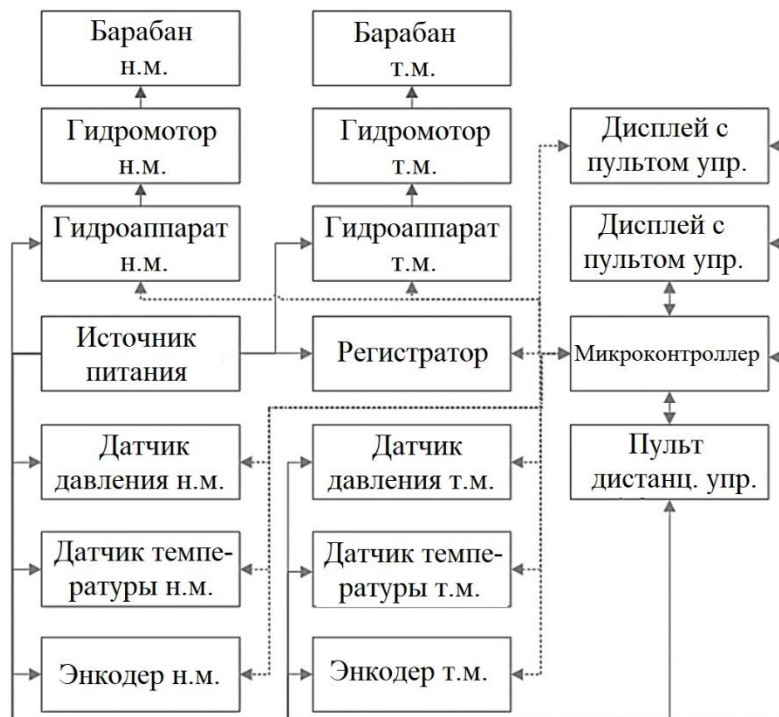


Рисунок 7. Структурная схема автоматизированного МК: н.м. – натяжная машина, т.м. – тормозная машина

Гидроаппараты регулируют работу двигателя внутреннего сгорания (ДВС), насоса и гидромотора. Датчики обеспечивают обратную связь о состоянии системы. Скорость и усилие тяжения влияют на стрелу провеса в пролете ЛЭП ВЛ: с увеличением силы и уменьшением скорости стрела провеса уменьшается.

Усилие тяжения и скорость тяжения связаны между собой уравнением мощности, где их произведение – постоянная величина, которая зависит от конструкции натяжного оборудования МК и определяется на этапе создания машин.

Схема программно-аппаратного комплекса представлена на Рисунке 8. В результате получаем область допустимых значений (Рисунок 8 а), которые можно представить в виде 3d-поверхности, отображающей числовые значения для усилия и скорости тяжения гидравлического оборудования МК, которые обеспечивают стрелу провеса.

В диссертационной работе сделан выбор состава компонентов САУ МК (Рисунок 8 б) и разработан алгоритм программы для САУ МК.

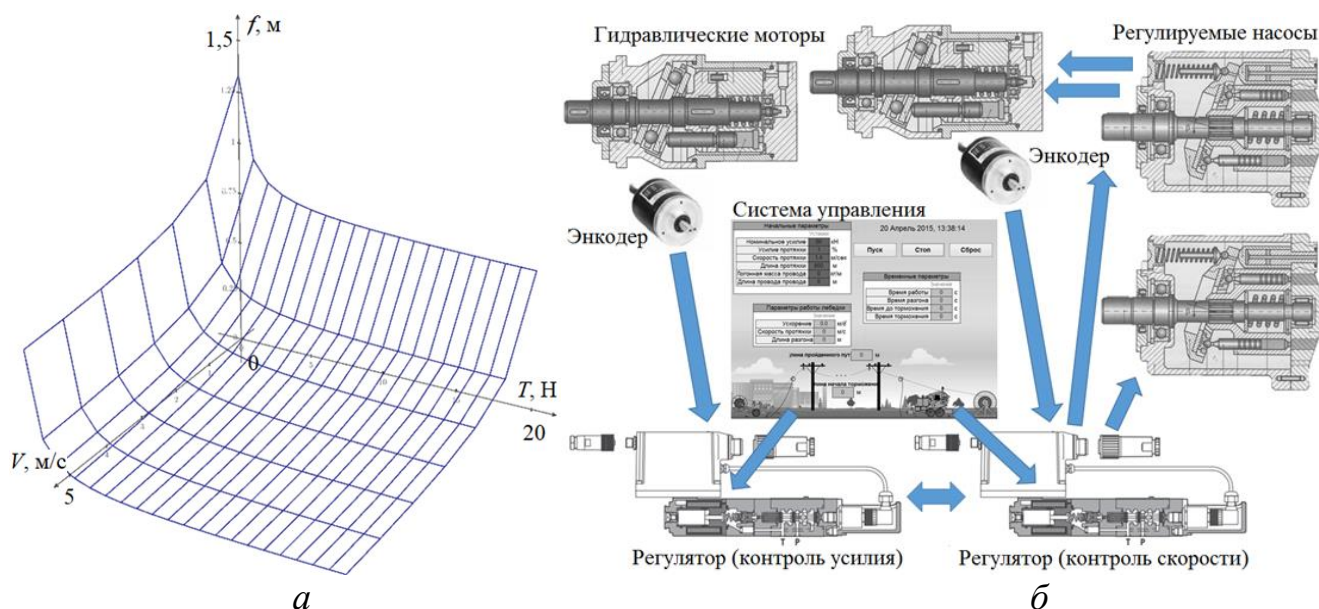


Рисунок 8. САУ МК: а – Выбор параметров для программы САУ МК, где  $f$  – стрела провеса ЛЭП,  $T$  – усилие тяжения,  $v$  – скорость тяжения; б – схема программно-аппаратного комплекса

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МК

Скоростью тяжения можно управлять изменением давления на гидромоторе, а также управляя производительностью гидравлического насоса.

В зависимости от оснащения комплекса автоматизированным гидроприводом с микропроцессорной системой управления задается рассогласование тягового и тормозного усилия путем управления тяговым, тормозным или обоими усилиями.

При завершении разгона снижаем рассогласование тягового и тормозного усилия и поддерживаем скорость протяжки близкую к максимальной.



## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Объектом исследования выбран МК для монтажа ЛЭП ВЛ.
2. Проведенный анализ МК позволил определить влияющие на его работу параметры: строительная длина, диаметр и погонная масса провода, количество опор ЛЭП ВЛ, их координаты (высота опор, расстояние между ними), размеры и момент инерции кабельного барабана, тормозной момент кабельного домкрата, приведенные к радиусу схода провода и лидер-троса движущиеся массы натяжной и тормозной машин, усилие и скорость тяжения.
3. Разработана методика моделирования и расчета пролетов ЛЭП ВЛ, на основании которой изучено состояние провода в пролетах и зависимость стрелы провеса от усилия тяжения. В работе рассмотрен случай свободного перекатывания провода или кабеля в направляющих роликах опор ЛЭП. Разработанная методика моделирования пролетов ЛЭП ВЛ позволила определить безаварийные параметры управления МК для решения задачи автоматизации для применения в САУ МК.
4. Показано, что для обеспечения постоянного усилия тяжения момент тормоза кабельного гидравлического домкрата должен изменяться в соответствии с изменением радиуса смотки провода на барабане. Исследован цикл работы МК в режиме максимальной скорости и в переходных режимах разгона и торможения до полной безаварийной остановки. Показано, что переходный режим разгона и торможения составляет незначительную часть времени протяжки провода. Перед началом работ целесообразно программировать, настраивать одну из гидравлических машин (натяжную или тормозную) на режим работы с номинальным значением усилия тяжения для данного провода.
5. Разработана структура и состав САУ МК, которая, управляя усилием и скоростью тяжения, обеспечивает требуемый режим разгона, тяжения на максимальной скорости и выбега для достижения проектных значений стрел провеса в каждом пролете ЛЭП ВЛ. На основе стандартных программно-микропроцессорных комплексов САУ разработан алгоритм управляющей программы САУ МК.
6. Полученные результаты исследований МК позволяют уже на стадии их проектирования принимать ряд решений по выбору конструктивно-технологических параметров МК и могут быть применены для инженерной реализации широкого круга гидравлического оборудования.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Картовенко А.В., Арбузов Е.В. Исследование монтажного комплекса ЛЭП ВЛ как объекта автоматизации // Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: материалы Всероссийской научно-технической конференции. УГАТУ. Уфа, 2011. С. 88-92. (0,58/0,49 п.л.) Обоснование выбора МК, обзор технологий монтажа.
2. Картовенко А.В. Моделирование динамической системы «Кабель - Лидер-трос» // Эффективные методы автоматизации подготовки и

- планирования производства: сборник научных трудов. Спектр. М., 2012. С. 34-39. (0,42 п.л.)
3. Картовенко А.В. Создание системы автоматизированного управления комплекса монтажа воздушных линий // Молодежный научно-технический вестник. 2012. № 6. С. 35-42. (0,67 п.л.)
  4. Картовенко А.В. Современные технологии и техника прокладки магистральных и зонавых сетей связи // CONNECT. 2012. № 4. С. 2-5. (0,46 п.л.)
  5. Картовенко А.В. Модель кабельного тормозного домкрата в составе монтажного комплекса ЛЭП ВЛ // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. Спецвыпуск. С. 67-72. (1,44 п.л.)
  6. Картовенко А.В. Динамическая модель монтажного комплекса воздушных линий электропередач // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. №12. С. 68-69. (0,46 п.л.)
  7. Картовенко А.В. Монтаж ЛЭП ВЛ, ОКСН, ОКГТ, траншея, СИП-оборудование // Точка опоры. 2012. № 14. С. 17. (0,09 п.л.)
  8. Картовенко А.В. Исследование и создание автоматизированного гидравлического монтажного комплекса ЛЭП ВЛ // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 1. С. 82-91. (0,52 п.л.)
  9. Картовенко А.В. Автоматизация оборудования монтажа ВЛ ЛЭП // Международный инновационный салон «АРХИМЕД-2015»: каталог. Архимедэкспо. М., 2015. С. 134. (0,06 п.л.)
  10. Картовенко А.В. Автоматизация оборудования монтажа контактных и поддерживающих проводов железных дорог // Международный инновационный салон «АРХИМЕД-2015: каталог. Архимедэкспо. М., 2015. С. 136. (0,06 п.л.)
  11. Картовенко А.В. САУ технологическим комплексом монтажа ВЛ ЛЭП // Научно-практическая конференция «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях»: сборник научных трудов. Университетская книга. Курск, 2015. С. 74-78. (0,9 п.л.)
  12. Картовенко А.В., Арбузов Е.В., Гаврюшин С.С., Моделирование работы монтажного комплекса строительства воздушных линий электропередач // Наукоедение. 2016. № 6 (37). С. 90-105. (0,81/0,61 п.л.) Разработка модели МК и обобщение полученных результатов.
  13. Картовенко А.В. Автоматизированное управление гидравлическим монтажным комплексом для строительства воздушных линий электропередач // Политехнический молодежный журнал. 2016. № 4. С 3-16. (1,44 п.л.)
  14. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № PR16006 ФАП СО РАН. Программа управления гидравлическим монтажным комплексом для строительства ЛЭП ВЛ : № PR16006 : заявл. 28.11.2016 : опубли. 06.12.2016. / Картовенко А.В. 4 с.
  15. Численное моделирование процесса прокладки воздушных линий электропередач / Картовенко А.В. [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 11. С. 1-14. (1,53/0,99 п.л.) Численное моделирование пролетов, обобщение полученных результатов.

Подписано в печать: 17.06.2022  
Объем: 1,0 п.л.  
Тираж 80 экз. Заказ №  
Отпечатано в типографии «Реглет»  
121552, г. Москва, ул. Ярцевская,  
д. 25А, 8(495) 142-20-67  
[www.reglet.ru](http://www.reglet.ru)