

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ МОНТАЖНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

А.В. Картовенко

challacha@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложен автоматизированный гидравлический монтажный комплекс для строительства воздушных линий электропередач. Представлены структура автоматизированного комплекса, скриншоты управляющей программы, структурная схема автоматизированной системы и алгоритм управляющей программы. Приведены рекомендации по автоматизации объекта

Ключевые слова

Гидравлический монтажный комплекс, автоматизация гидравлических систем, машинный эксперимент

Поступила в редакцию 03.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

В составе систем автоматического управления различают объект управления и управляющие устройства. Управляющая часть может быть реализована в виде компьютерной программы, которая установлена на оборудовании и вырабатывает рекомендации оператору, а также выполняет еще ряд дополнительных функций [1, 2].

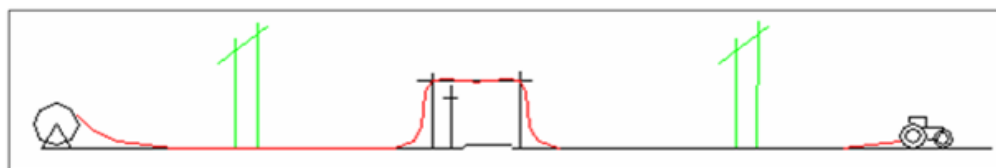
Объектом управления является гидравлический монтажный комплекс (МК), состоящий из мощного гидравлического оборудования (гидравлические натяжная и тормозная машины, гидравлический домкрат, а также линии электропередач (ЛЭП) и прокладываемого провода с лидер-тросом [3–6]. В начале необходимо настроить режим работы гидравлических машин. При этом на объект передаются управляющие воздействия, а от датчиков управляющие устройства получают сигналы о работе монтажного комплекса.

Стрела провеса и жесткость провода зависят от усилия тяжения. Основным современным методом монтажа оптических и электрических кабелей, контактных и поддерживающих проводов железных дорог является монтаж под тяжением (рис. 1).

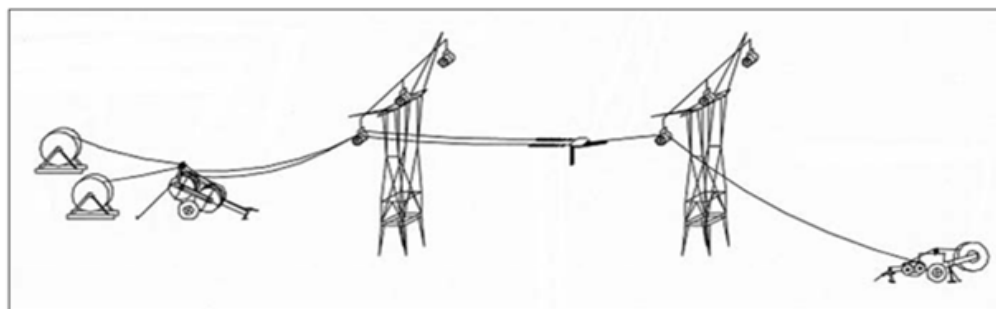
Для правильного управления МК в ручном или автоматизированном режиме необходимо исследование и описание его как объекта управления, разработка математических моделей, которые могут быть применены в системах автоматизированного управления и для разработки рекомендаций по ручному управлению оператором комплекса, при этом принимаем допущения для моделей МК:

- провод и лидер-трос изотропные и однородные;
- кусочно-непрерывные (составлены из нескольких различных частей, каждая из которых однородна);

- растяжение подчинено закону Гука;
- изменением диаметра при растяжении пренебрегаем;
- сила тяжести численно равна весу единицы длины;
- масса гибкой нити в пролете сосредоточена в конце пролета;
- сила трения в роликах пренебрежимо мала по сравнению с усилием тяжения;
- стрела провисания мала;
- растянутый по закону Гука провод или лидер-трос принимает форму цепной линии;
- изучаем движение отдельного элемента провода или лидер-троса с использованием переменных Лагранжа.



а)



б)

Рис. 1. Воздушные линии электропередач:

старая система прокладки с применением тракторов и подставок для бобин (а) и новая система с использованием метода монтажа под тяжением (б)

Для гидравлического оборудования принимаем, что:

- все элементы передач абсолютно жесткие;
- инерционные характеристики элементов передачи (редуктора и т. д.) приводят в соответствие с передаточными отношениями к поступательно движущейся массе, присоединенной к протягиваемому проводу или лидер-тросу.

Перед началом работ целесообразно программировать, настраивать одну из гидравлических машин (натяжную или тормозную) на режим работы с номинальным значением усилия тяжения для данного провода. Это значение должно соответствовать проектному.

Для каждой строительной длины необходимо задать, диаметр и погонный вес провода, скорость и номинальное усилие протяжки, точность его поддержания, момент, длину протяжки, при которой следует начать торможение.

Исследование гидравлических МК монтажа воздушных линий электропередач под тяжением, разработка их математических моделей, исследование их поведения методами машинного моделирования на ЭВМ с помощью полученных моделей позволяет уже на стадии проектирования комплексов принять ряд правильных решений по выбору конструктивно-технологических параметров, управлению комплексом в каждом конкретном случае и в соответствии с заданием.

На основе уравнений гибкой нити, дается обоснование методов определения упруго-инерционных параметров пролета и цепи пролетов МК, что позволит моделировать движение управляемого МК. Поскольку монтаж строительной длины является сложной и дорогостоящей операцией, связанной с отключением крупных энергетических объектов, то поведение такого МК целесообразно изучить на его модели.

Основная задача автоматизации работы гидравлического МК — обеспечение заданных усилия и длины протяжки. В этой связи главными характеристиками разрабатываемых моделей элементов МК и комплекса в целом является описание коэффициентов жесткости и массы. При этом жесткость и масса элементов МК (пролетов из провода или лидер-троса) — это функции от усилия тяжения.

Расчетное исследование кинематических и динамических процессов реального объекта на стадии проектирования может быть выполнено путем замены этого объекта упрощенной моделью, которая определяет кинематику, динамику и время скачкообразного изменения параметров, влияющих на управление МК.

Важной задачей построения моделей элементов комплекса является определение параметров, адекватно отображающих свойства реального объекта и обеспечивающих результаты вычислений, согласно поставленным перед исследованием задачам.

Изучаемый объект является сложным по составу и количеству исследуемых параметров (усилие тяжения, торможения, строительной длины МК, вес провода, лидер-троса, скорость тяжения), режиму работы, что требует контроля при решении задачи его автоматизации [7].

Поэтому одним из наиболее важных вопросов при исследовании системы управления комплексом становится создание расчетных динамических моделей. В модели МК учитывают следующие параметры, которые будем считать значимыми при моделировании:

- приведенные массы;
- смещение от начального положения конца цепной линии;
- жесткости гибких связей — элементов комплекса (провода или лидер-троса);
- коэффициенты трения и усилия тяжения и торможения.

Решение задачи разработки и исследования автоматизированной системы управления МК связано с определением ряда параметров (длины прокладки, веса провода, усилия тяжения и торможения) соответствующих динамических систем, таких как:

- натяжная гидравлическая машина;
- тормозная гидравлическая машина;
- кабельный (или тормозной) гидравлический домкрат;
- цепных линий (провода и лидер-троса ЛЭП);
- вспомогательного оборудования МК (барабанов и др.).

В ходе исследования необходимо определить кинематические и динамические параметры описываемой системы, а затем провести исследование их в диапазоне изменения параметров, имеющих практическое значение (кинематических, инерционных, упругих, демпфирующих сил) [8].

В работе гидравлического МК можно выделить три характерных периода: разгон, проведение протяжки при номинальной скорости и торможение. Разгон из состояния покоя ($t = 0$, $x = 0$, $\dot{x} = 0$, $\ddot{x} = 0$) проводят до номинальной рабочей скорости, например 1,1...1,4 м/с (4...5 км/ч) или другой, заданной скорости.

Движение гидравлического МК представляет собой движение тела переменной (уменьшающейся) массы под действием силы тяжения. Динамика гидравлического МК напоминает баллистическую задачу расчета движения летательного аппарата (ракеты или самолета), в которых в полете снижается масса за счет выгорания топлива. В нашем случае в процессе монтажа изменяется масса гибкой связи (лидер-трос, соединенный с монтируемым проводом или кабелем), а также изменяется приведенная масса кабельного барабана с проводом из-за изменения количества провода на кабельном барабане и изменения радиуса схода провода с кабельного барабана.

Моделирование торможения МК из состояния монтажа при максимальной постоянной скорости до полной остановки. Важность решения этой задачи состоит в том, что в случае неправильного управления комплексом может произойти обрыв монтируемого провода, провод опустится до земли и будет испорчен, произойдет недопустимый многократный изгиб провода (кабеля) на всех раскаточных роликах. Еще более неблагоприятные последствия произойдут в случае обрушения монтируемого провода или кабеля на строительную длину пересекающей ее другой воздушной линии электропередач, находящейся под высоким напряжением.

Определив время и момент начала торможения (выбега) пользуясь полученными ранее уравнениями движения МК в процессе монтажа, рассчитываем перемещения, скорости и ускорения монтируемого провода на всех трех этапах монтажа (разгона, работы с постоянной скоростью протяжки провода и торможения до полного останова).

Проведённые расчеты показали возможности численного моделирования процесса монтажа, как на стадии проектирования, так и для определения параметров управления МК и программирования микропроцессорных систем их автоматизации [9, 10].

Путем моделирования определены диапазоны изменения основных параметров управления комплексом: времени, длины протяжки лидер-троса, провода, в переходных режимах разгона комплекса и состояния покоя до максимальной рабочей скорости и выбега (торможения) от максимальной рабочей скорости до полной безаварийной остановки [11]. Определены также изменения перемещения, скоростей и ускорений компонентов гидравлического МК на всех этапах работы комплекса (переходные режимы разгона и торможения, работа на максимальных рабочих скоростях).

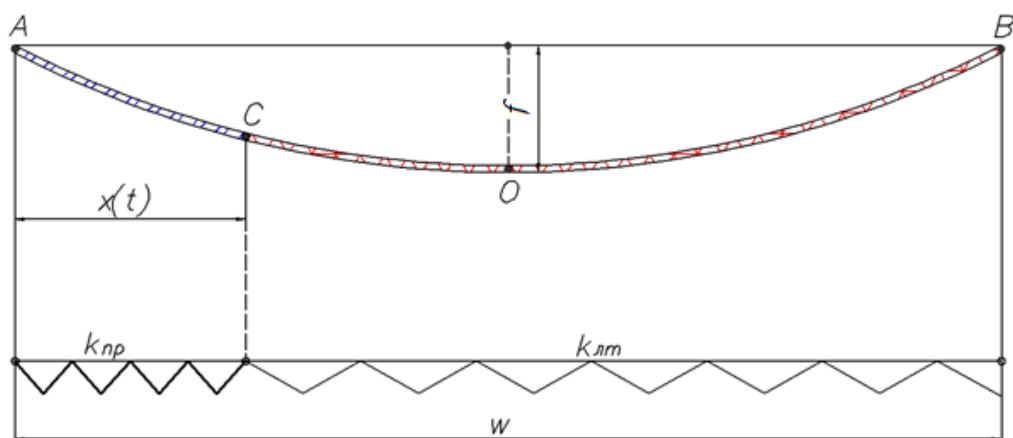


Рис. 2. Схема составного пролета, состоящего из провода и лидер-троса:

A и B — точки крепления к опорам; O — низшая точка стрелы провеса; C — соединение провода с лидер-тросом; f — стрела провеса, м; $x(t)$ — текущая абсцисса точки сцепки провода с лидер-тросом, м; w — длина пролета, м; $k_{пр}$ — коэффициент жесткости провода, Н/м; $k_{лт}$ — коэффициент жесткости лидер-троса, Н/м

Пролет составленный из последовательно соединенных провода (кабеля) и лидер-троса (рис. 2) [12], т. е. гибких связей имеющих разный погонный вес, можно представить цепочкой двух последовательно соединенных пружин разной жесткости ($k_{пр}$ и $k_{лт}$). Для определения жесткости, эквивалентной пружинной, состоящей из последовательно соединенных элементов, сложим их податливости (величины, обратные жесткости), считая их пропорциональными длине [12, 13]:

$$\frac{1}{k} = \frac{x}{wk_{пр}} + \frac{(w-x)}{wk_{лт}}. \quad (1)$$

Тогда жесткость составного пролета

$$k = \frac{wk_{пр}k_{лт}}{xk_{лт} + (w-x)k_{пр}}. \quad (2)$$

Каждый пролет ЛЭП описывается для провода AC (кабеля) и лидер-троса с помощью уравнения цепной линии [13], а жесткость цепи из n пролетов рассчитывается, исходя из формулы [14]:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}, \quad (3)$$

где k — общая жесткость цепи, Н/м; k_i — жесткость цепи одного пролета, Н/м.

Оценку времени переходных процессов разгона и торможения гидравлического МК можно произвести на простой одномассовой динамической модели гидравлического МК.

Принимая в начальный момент времени $t = 0$ всю массу движущихся частей гидравлического МК сосредоточенной в конце строительной длины, оценим время разгона и длину протяжки лидер-троса и провода, пользуясь принципом Даламбера [15, 16] и первым законом Ньютона [17, 18]. Из этого следует, что ускорение приведенной массы МК пропорционально сумме действующих на него сил и обратно пропорционально приведенной массе МК.

Упрощенная одномассовая динамическая модель гидравлического МК представлена на рис. 3 [19].

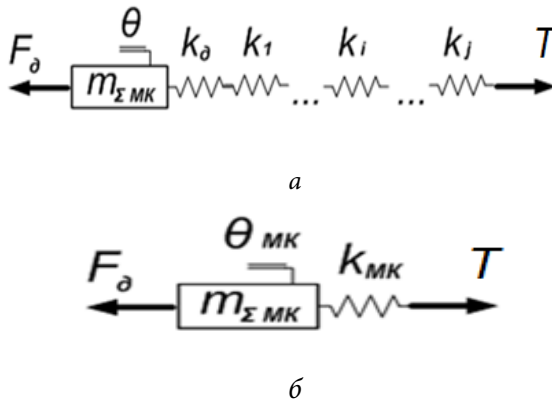


Рис. 3. Одномассовая динамическая модель монтажного комплекса с последовательной цепью упругих элементов (гиперболических цепных линий) (а) и модель с суммарной жесткостью пролетов, составленных из цепных линий провода и лидер-троса (б):

m — масса подвижных элементов гидравлическая МК приведенная к концу строительной длины

Уравнение движения этой модели получено на основании принципа Даламбера [10, 15, 20]:

$$-\ddot{x}^2 m F_{т.к} + k_{пр} (x_1 - x_2) + T = 0, \quad (4)$$

где x_1 — перемещение начала гибкой связи строительной длины; x_2 — перемещение конца строительной длины гибкой связи; m — приведенная масса движущихся элементов гидравлического комплекса; $k_{пр}$ — приведенный нелинейный коэффициент гибкой связи строительной длины, состоящей из последовательно соединенных лидер-троса и провода (кабеля) с перемещающейся в ходе

монтажа точкой соединения лидер-троса с проводом (кабелем); $F_{т.к}$ — приведенная к концу гибкой связи сила торможения оборудования тормозной площадки (тормозного кабельного домкрата и гидравлической тормозной машины); T — тяговое усилие гидравлической натяжной машины (гидравлической тяговой лебедки).

На рис. 4 приведены результаты моделирования процесса разгона МК из состояния покоя до достижения максимальной постоянной скорости для провода АС 240/56, имеющего прочность на разрыв 98 кН и требующего номинального усилия тяжения 49 кН.

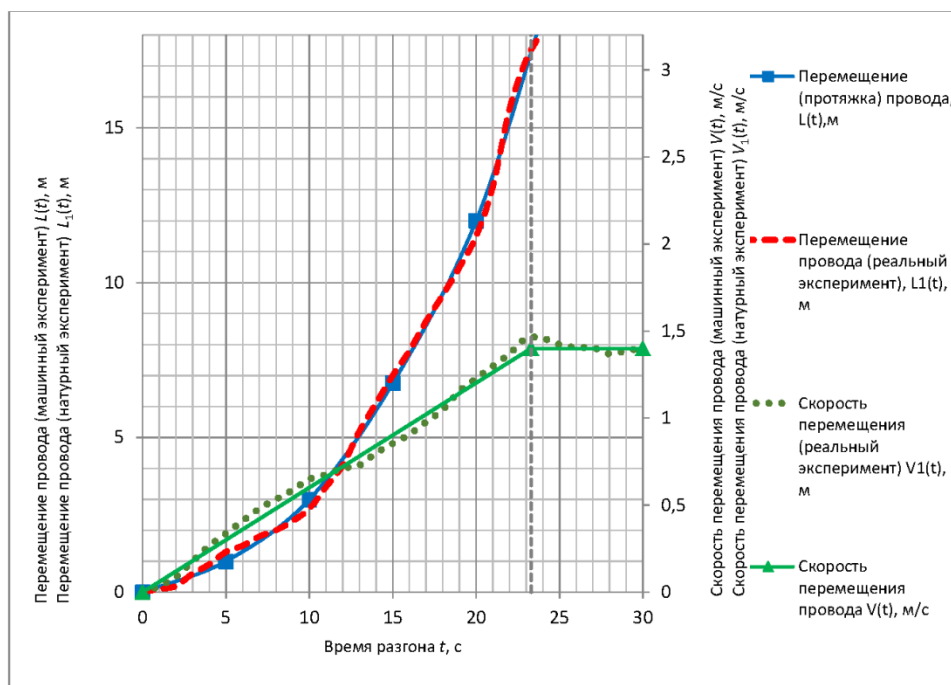


Рис. 4. Перемещение (протяжки провода) и изменение скорости в процессе разгона из состояния покоя до постоянной максимальной скорости 1,4 м/с

Моделирование проведено при превышении тягового усилия над тормозным на 1 %, что составляет $49 - 48,51 = 49$ Н, т. е. разгон осуществляется при постоянной ускоряющей силе 490 Н, что сообщает ускорение подвижной части комплекса, равное 0,06 м/с (рис. 5).

Время разгона до максимальной постоянной скорости для провода АС 240/56 составляет 23,3 с. При этом протяжка провода равна 16,2 м. Расчет показывает, что время разгона на 2 порядка меньше времени монтажа при постоянной скорости (2666,4 с), а перемещение провода 12,8 м значительно меньше строительной длины провода (3762 м).

Сравнение результатов машинного и натурального экспериментов. Экспериментальная проверка режимов управления гидравлическим монтажным комплексом производилась на оборудовании фирмы ЗАО «СИ» (Москва) путем

установки на натяжные и тормозные машины регистраторов — электронных самописцев, фиксирующих технические параметры тяжения (усилие, длину и скорость протяжки провода). На рис. 6 представлен комплект регистрационно-го оборудования: электронный самописец, датчики параметров протяжки, источник питания и программное обеспечение.

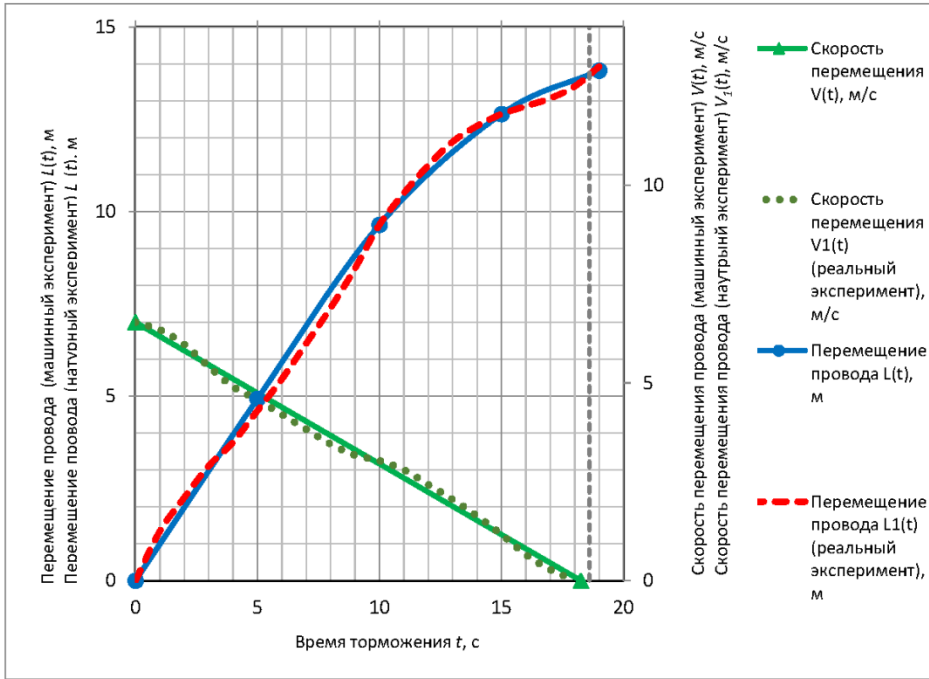


Рис. 5. График перемещения (протяжки провода) и изменения скорости в процессе торможения до полной остановки



Рис. 6. Регистрационное оборудование на гидравлической тормозной машине

Экспериментальные результаты записи режимов работы гидравлического МК, представлены выше (см. рис. 4, 5).

Максимальные расхождения натурального испытания и машинного эксперимента составили:

- для провода АС 240/56 при разгоне при $t = 20$ с — 1,3 %;
- для провода АС 240/56 при торможении при $t = 7,5$ с — 5,4 %.

Сравнение результатов натурных испытаний с данными, полученными путем машинного эксперимента показали правильность разработанных моделей, точность машинного эксперимента согласуется с данными по точности лидеров-производителей гидравлического оборудования (Тесмес) [21].

Некоторое расхождение в данных машинного и натурального экспериментов можно объяснить отличием реальных характеристик гидравлического оборудования и инерционными явлениями в переходных режимах работы гидравлических приводов. Хотя детальное исследование особенностей работы использовавшихся гидроаппаратов в работе не производилось, поскольку в гидравлических МК применяется широкий ряд гидроаппаратов и приводов различных конструкций и производителей, что, однако, не влияет на правильность разработанных рекомендаций по управлению гидравлических МК, в которых могут применяться гидравлические машины различных конструкций.

Проведенный анализ существующих монтажных комплексов позволил определить параметры, определяющие режимы работы монтажного комплекса: рабочую длину, диаметр, погонную массу провода и лидер-троса, количество и длины пролетов опорных мачт воздушных линий электропередач, размеры и момент инерции кабельного барабана, тормозной момент кабельного домкрата, приведенные к радиусу схода провода и лидер-троса движущиеся массы натяжной и тормозной машин.

Выводы. Разработана математическая модель пролета и цепи пролетов, на основании которой изучено влияние параметров пролета и цепи пролетов, образующих строительную длину, стрелы провеса, погонного веса лидер-троса и монтируемого провода, заполнение пролетов лидер-тросом или проводом на натяжение монтируемого провода.

Пролет представлен в виде гибкой связи, которая моделируется пружиной. В работе показано, что коэффициент жесткости нелинейно зависит от усилия тяжения и длины провода и лидер-троса в процессе монтажа в соответствии с изменением точки соединения. При этом, при увеличении усилия тяжения в цепи МК длина и масса провода уменьшается, а жесткость возрастает. В одном пролете стрела провеса уменьшается с увеличением силы тяжения. Определены основные параметры работы системы автоматического управления МК.

Исследовано влияние основных конструктивных и технологических параметров узлов гидравлического МК оборудования на динамику его работы. Показано, что для обеспечения постоянного усилия тяжения момент тормоза домкрата должен изменяться в соответствии с изменением радиуса смотки провода на барабане.

Разработаны динамические и математические модели, описывающие поведение МК, на основании которых 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. Численное моделирование позволило определить безаварийные параметры управления МК для решения задачи автоматизации.

На основании результатов, полученных при проведении эксперимента с использованием созданных моделей, разработаны рекомендации по инженерной реализации системы автоматизированного управления МК.

Литература

1. Глазов А.А., Монаков И.А., Понкратов А.В. Строительная, дорожная и специальная техника: краткий справочник. М.: АО «Профтехника», 2008. 640 с.
2. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2002. 22 с.
3. Щербаков Н.А. Сеть CAN: микроконтроллеры всех стран, соединяйтесь // Инженерная микроэлектроника. 1998. № 12. С. 35–42.
4. Янпольский А.П. Гиперболические функции. М.: Физматгиз, 1960. 195 с.
5. Robert Bosch GmbH. CAN Specification Ver. 2.0, 1991.
6. Etschberger K. CAN — Grundlagen, protokolle und profile, bauteine und anwendungen. Munchen, Hanser-Verlag. 1998.
7. Хазаров В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009. 591 с.
8. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП. Метод. пособ. Кн. 1. СПб.: Деан, 2009. 552 с.
9. Меццержаков И.И. Провода и тросы воздушных линий электропередач // Школа для электрика: веб-сайт. URL: <http://electricalschool.info/main/kabel/630-provoda-i-trosy-vozdushnykh-linij.html> (дата обращения: 23.07.2013).
10. Федоров Ю.Н. Порядок создания, модернизации и сопровождения АСУТП. М.: Инфра-Инженерия, 2011. 576 с.
11. Наземцев А.С., Рыбальченко Д.Е. Пневматические и гидравлические приводы и системы. Ч. 2. Гидравлические приводы и системы. Основы. Учеб. пособ. М.: Форум, 2007. 304 с.
12. Прокладка кабеля ВОЛС // Флайлинк: веб-сайт. URL: <http://www.flylink.ru/info/articles/491/953> (дата обращения: 09.08.2013).
13. Натяжная машина, лебедка ЛСИ.45НМ с тяговым усилием 45 кН // Сайт компании ЗАО «СИ». URL: <http://www.zaosi.com/natyazhnye-maschiny-lebedki-vols-vok-lep-vl/49-natyazhnaya-maschina-lebedka-lsi15nm-s-tyagovym-usiliem-15-kn.html> (дата обращения: 18.08.2013).
14. Диментберг Ф.М., Шаталов К.Т., Гусаров А.А. Колебания машин. М.: Машиностроение, 1964. 308 с.
15. Метод монтажа ЛЭП «под тяжением» // Википедия: свободной энциклопедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%B6%D0%B0_%D0%9B%D0%AD%D0%9F_%C2%AB%D0%9F%D0%BE%D0%B4_%D1%82%D1%8F%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BC%C2%BB (дата обращения: 15.10.2013).

16. *Селевцов Л.И.* Автоматизация технологических процессов. М.: ИЦ «Академия», 2014. 352 с.
17. *Цельтвангер Х.* Взгляд изнутри на основы CAN // МКА. 1996. № 3. С. 34–39.
18. *Чернов Л.Б.* Основы методологии проектирования машин. М.: Машиностроение, 1978. 148 с.
19. *Картовенко А.В.* Моделирование динамической системы «Кабель–Лидер-трос» // Эффективные методы автоматизации подготовки и планирования производства. 9-я ежегодная конференция. Сб. науч. тр. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. С. 34–39.
20. *Нестеров А.Л.* Проектирование АСУТП. Методическое пособие. Кн. 2. СПб.: Деан, 2009. 944 с.
21. *Etschberger K.* CAN-based higher layer protocols and profiles // Proc. of the Fourth International CAN Conference (iCC 97). CiA, Erlangen, Germany, 1997.

Картовенко Алла Валерьевна — аспирантка кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Е.В. Арбузов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

AUTOMATED CONTROL OF HYDRAULIC MOUNTING COMPLEX FOR CONSTRUCTING OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

A.V. Kartovenko

challacha@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We propose a hydraulic automated mounting complex for constructing overhead power transmission lines. We present the structure of the automated complex, screenshots of the control program, a block diagram of an automated system and the control program algorithm. Finally, we give recommendations for the object automation

Keywords

Hydraulic mounting complex, automation of hydraulic systems, computer experiment

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

References

- [1] Glazov A.A., Monakov I.A., Ponkratov A.V. Stroitel'naya, dorozhnaya i spetsial'naya tekhnika [Building, road and specialty machinery]. Moscow, AO "Proftekhnik" Publ., 2008. 640 p. (in Russ.).
- [2] GOST 839-80. Provoda neizolirovannye dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi. Tekhnicheskie usloviya [State standard 839-80. Aerial non-insulated cables. Full product specifications]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2002. 22 p. (in Russ.).
- [3] Shcherbakov N.A. CAN network: microcontrollers of all the countries, unite. *Inzhenernaya mikroelektronika*, 1998, no. 12, pp. 35–42 (in Russ.).
- [4] Robert Bosch GmbH. CAN Specification Ver. 2.0, 1991.
- [5] Etschberger K. CAN - Grundlagen, Protokolle und Profile, Bauteile und Anwendungen. München, Hanser-Verlag, 1998.
- [6] Etschberger K. CAN-based higher layer protocols and profiles. *Proc. of the Fourth International CAN Conference (iCC 97)*. CiA, Erlangen, Germany, 1997.
- [7] Khazarov V.G. Integrirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Integrated system for human resources management]. Sankt-Petersburg, Professiya Publ., 2009. 591 p. (in Russ.).
- [8] Nesterov A.L. Proektirovanie ASUTP. Kniga 1 [SCADA engineering. Vol. 1]. Sankt-Petersburg, DEAN Publ., 2009. 552 p. (in Russ.).
- [9] Meshcheryakov I.I. Provoda i trosy vozdushnykh liniy elektroperedach [Open wires and aerial cables]. Shkola dlya elektriika: website. URL: <http://electricalschool.info/main/kabel/630-provoda-i-trosy-vozdushnykh-linij.html> (accessed 23.07.2013) (in Russ.).
- [10] Fedorov Yu.N. Poryadok sozdaniya, modernizatsii i soprovozhdeniya ASUTP [SCADA construction, modernization and maintenance order]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2011. 576 p. (in Russ.).
- [11] Nazemtsev A.S., Rybal'chenko D.E. Pnevmaticheskie i gidravlicheskie privody i sistemy. Chast' 2. Gidravlicheskie privody i sistemy. Osnovy [Pneumatic and hydraulic drives and systems. P. 2. Hydraulic drives and systems. Fundamentals]. Moscow, Forum Publ., 2007. 304 p. (in Russ.).
- [12] Prokladka kabelya VOLS [FOCL cable routing] Flailink: website. URL: <http://www.flylink.ru/info/articles/491/953> (accessed 09.08.2013) (in Russ.).

- [13] Natyazhnaya mashina, lebedka LSI.45NM s tyagovym usiliem 45 kN [Tension machine, windlass LSI.45NM with motive force 45 kN]. ZAO "SI" website. URL: <http://www.zaosi.com/natyazhnye-maschiny-lebedki-vols-vok-lep-vl/49-natyazhnaya-maschina-lebedka-lsi15nm-s-tyagovym-usiliem-15-kn.html> (accessed 18.08.2013) (in Russ.).
- [14] Dimentberg F.M., Shatalov K.T., Gusarov A.A. Kolebaniya mashin [Machinery oscillations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 308 p. (in Russ.).
- [15] Metod montazha LEP «pod tyazheniem» [ETL assembly method "under tension"] Wikipedia: free encyclopedia. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%B6%D0%B0_%D0%9B%D0%AD%D0%9F_%C2%AB%D0%9F%D0%BE%D0%B4_%D1%82%D1%8F%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BC%C2%BB (accessed 15.10.2013) (in Russ.).
- [16] Celevtsov L.I. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov [Process flow automation]. Moscow, "Akademiya" Publishing center, 2014. 352 p. (in Russ.).
- [17] Tsel'tvanger Kh. Outward glance on CAN principles. MKA, 1996, no. 3, pp. 34–39 (in Russ.).
- [18] Chernov L.B. Osnovy metodologii proektirovaniya mashin [Framework methodology of machine designing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 148 p. (in Russ.).
- [19] Kartovenko A.V. Modelirovanie dinamicheskoy sistemy «Kabel' – Lider-tros» [Simulation of "cable/leader-wire" dynamical system]. *Effektivnye metody avtomatizatsii podgotovki i planirovaniya proizvodstva. 9-ya ezhegodnaya konferentsiya: sbornik nauchnykh trudov* [Effective methods of production preparation and planning. Proc. 9th Int. conf.]. Moscow, "Spektr" Publishing house, 2012. Pp. 34–39 (in Russ.).
- [20] Nesterov A.L. Proektirovanie ASUTP. Kniga 1 [SCADA engineering. Vol. 1]. Sankt-Petersburg, DEAN Publ., 2009. 944 p. (in Russ.).
- [21] Yanpol'skiy A.R. Giperbolicheskie funktsii [Hyperbolic functions]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960. 195 p. (in Russ.).

Kartovenko A.V. — post-graduate student of Department of Computer Manufacturing Automation Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — E.V. Arbuzov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Department of Computer Manufacturing Automation Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.