

Влияние АСУ на безопасность работы лесозаготовительной машины манипуляторного типа

М. Ю. Васенёв

Аннотация – В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с оценкой влияния реакции автоматизированной системы управления (АСУ) на безопасность крана-манипулятора лесозаготовительной машины. Приводятся статистические показатели травматизации при лесозаготовках, выявляются основные опасности, возникающие при использовании лесозаготовительных машин манипуляторного типа. Производится расчёт базовых кинематических характеристик манипуляторной установки, а также пройденного расстояния за время реакции системы, с учётом быстрогодействия протокола и исполнительных механизмов. Описываются различные методы расчёта времени реакции оператора лесозаготовительной машины. Осуществляется сравнение результатов, демонстрируемых АСУ под управлением различных промышленных сетевых протоколов, относительно реакции оператора. Делаются выводы о роли и перспективах применения автоматизированных технологий в лесозаготовительных машинах манипуляторного типа.

Ключевые слова – лесозаготовки, безопасность крана-манипулятора, кинематические характеристики, время реакции системы, быстроедействие протокола.

I. ВВЕДЕНИЕ

Кран-манипулятор или крано-манипуляторная установка (КМУ) – одна из самых главных частей лесозаготовительной машины. Вот почему при выборе форвардера либо лесовоза с КМУ необходимо уделять максимальное внимание именно этому компоненту. Среди основных технических характеристик КМУ следует назвать:

- минимальное и максимальное значения вылета стрелы КМУ, а также грузоподъемность и грузовой момент стрелы КМУ при таких значениях;
- высоту опускания и подъема груза;
- тип подвески;
- минимально возможный радиус поворота крана-манипулятора;
- тип поперечного сечения стрелы и др. [1]

Кроме того, существует и такая немаловажная характеристика, как *безопасность КМУ*. Добиться её повышенных показателей можно посредством:

- звуковой и световой сигнализации при перемещении КМУ в пределах рабочей зоны;

- более точной настройки гидросистемы лесозаготовительной машины для обеспечения плавного вращения/торможения поворотной платформы КМУ;

- внедрения автоматизированных функций определения препятствий и подбора наиболее оптимального протокола связи и аппаратуры для задействования в АСУ лесозаготовительной машины с целью обеспечения максимально быстрого останова в критической ситуации (без участия оператора) и т.д.

Итак, *целью* данной статьи является оценка влияния АСУ лесозаготовительной машины в критической ситуации (в нашем случае – остановка вращения поворотной платформы крана-манипулятора при появлении того или иного препятствия на пути движения захвата).

Для проведения этой оценки необходимо решить следующие *задачи*:

- 1) провести математическое моделирование кинематической схемы манипулятора для определения необходимых кинематических характеристик;

- 2) охарактеризовать зависимость для определения расстояния, пройденного КМУ за время реакции системы, с учётом быстрогодействия протокола;

- 3) выполнить компьютерное моделирование в математическом программном обеспечении MathCAD.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Перед тем как перейти к расчётной части данной работы, необходимо рассмотреть некоторые теоретические аспекты, определяющие *актуальность* рассматриваемого вопроса.

Статистические показатели травматизации при лесозаготовках

Согласно результатам исследований, представленным в работе И.В. Гальянова и Н.С. Студенниковой, в 2013 г. лесное хозяйство (наряду с охотой и сельским хозяйством) имело один из самых высоких уровней травматизма со смертельными исходами, несколько уступающий только добыче полезных ископаемых и строительству. А уровень травматизма со смертельным исходом в данной отрасли значительно превышает среднее значение по России (в среднем в 1.8 раза). Причём основным видом несчастных случаев с тяжёлыми последствиями в лесном хозяйстве явилось воздействие на работника движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов, деталей машин, в результате чего, например, в 2013 г. погибли или были тяжело

травмированы 34.4% от всего числа пострадавших [2]. По итогам 2016 г. ситуация выглядит следующим образом: 2664 человека (5-е место среди всех отраслей экономической деятельности РФ) получили ту или иную травму [3].

Проблема «ограниченного пространства» при лесозаготовках

Ограниченное пространство часто становится местом возникновения несчастных случаев, в том числе и со смертельным исходом. Термин *ограниченное пространство* традиционно используется в отношении таких конструкций, как корабли, шахты, канализационные коллекторы, бункеры и т.п. Данное обстоятельство излишне сужает рассматриваемое понятие и лишает возможности спроецировать его на другие области деятельности человека, где происходили несчастные случаи. Потенциально любое место работы, в том числе и область, выделенная под лесозаготовительные работы (делянка), может превратиться в некое ограниченное пространство. В действительности данный термин предполагает среду с множеством опасных условий. Применительно к лесозаготовкам к этим условиям относят:

- ограниченность движений;
- конструктивные опасности различных механизмов и агрегатов машин;
- определенные условия окружающей среды;
- эргономические факторы и др.

Несчастные случаи на ограниченном пространстве представляют большую опасность, чем инциденты на рабочих участках, не имеющих жесткого ограничения. Даже незначительная ошибка, небрежность или недосмотр при подготовке участка, отборе или техническом обслуживании оборудования либо в процессе работы могут стать причиной несчастного случая, так как возможность и готовность к преодолению ошибок в таких ситуациях меньше, чем при работе на обычных участках [4].

Опасности, возникающие при использовании лесозаготовительных машин манипуляторного типа

Несчастные случаи, спровоцированные форвардерами/лесовозами с крано-манипуляторной установкой, обычно аналогичны тем, которые возникают при использовании тракторов и других лесных машин: опрокидывание, выдвинутые и падающие объекты, линии электропитания и проблемы технического обслуживания [5]. Несложно заметить, что все они могут быть вызваны некорректным обращением с краном-манипулятором, например, переворот машины в случае захвата большого количества брёвен с излишней массой или зацеп чрезвычайно выдвинутым удлинителем рукоятки располагающихся поблизости объектов.

III. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Первоначально обратимся к упрощённой кинематической схеме типовой манипуляторной установки, применяющейся на лесозаготовительных машинах (рис. 1).

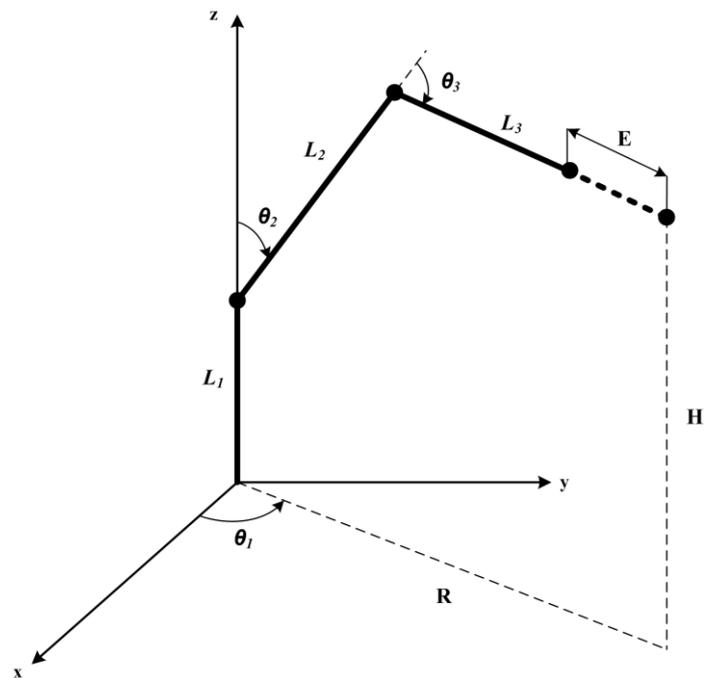


Рис.1. Упрощённая кинематическая схема крано-манипуляторной установки

На рисунке используются следующие условные обозначения:

- L_1, L_2, L_3 – длины колонны, стрелы и рукоятки манипулятора;
- E – максимальная длина удлинителя рукоятки (призматическое соединение);
- θ_1 – угол вращения колонны, θ_2, θ_3 – углы в месте шарнирных соединений между компонентами манипулятора;
- H – расстояние от поверхности до точки крепления захвата;
- R – расстояние от начала координат до проекции точки крепления захвата на поверхность.

Вопросы нахождения линейных кинематических характеристик КМУ лесозаготовительных машин затрагивались в трудах многих отечественных и зарубежных исследователей, среди которых А.А. Добрачев, Л.Т. Раевская, А.В. Швец, J. Wikander, S. Westerberg и др. Обратимся к работам [6, 7].

Сначала определим координаты точки крепления захвата крано-манипуляторной установки.

С учётом условных обозначений, представленных на рисунке 1, можно заметить, что позиция точки крепления захвата КМУ является функцией от вектора $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, E]^T$.

Переходя от цилиндрических координат к декартовым, получим:

$$p = f(\theta) = [p_x; p_y; p_z]^T = [R \cdot \cos \theta_1; R \cdot \sin \theta_1; H]^T, \quad (1)$$

где переменные R и H соответственно равны

$$R = L_2 \cdot \sin \theta_2 + (L_3 + E) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3);$$

$$H = L_1 + L_2 \cdot \cos \theta_2 + (L_3 + E) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3).$$

Соотношение между вектором угловой скорости и

вектором проекции скорости точки p на оси координат выглядит следующим образом:

$$p' = J * \theta', \quad (2)$$

где: $\theta' = \omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, E']^T$ – вектор угловых скоростей;

J – матрица якобианов 3 x 4:

$$J = \begin{pmatrix} -\sin(\theta_1)*k1 & \cos(\theta_1)*k2 & \cos(\theta_1)*k4 & \cos(\theta_1)*k6 \\ \cos(\theta_1)*k1 & \sin(\theta_1)*k2 & \sin(\theta_1)*k4 & \sin(\theta_1)*k7 \\ 0 & k3 & k5 & \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{pmatrix} \quad (3)$$

где

$$k1 = L_2 * \sin \theta_2 + (L_3 + E) * \sin(\theta_2 + \theta_3);$$

$$k2 = L_2 * \cos \theta_2 + (L_3 + E) * \cos(\theta_2 + \theta_3);$$

$$k3 = -[L_2 * \sin \theta_2 + (L_3 + E) * \sin(\theta_2 + \theta_3)];$$

$$k4 = (L_3 + E) * \cos(\theta_2 + \theta_3);$$

$$k5 = -(L_3 + E) * \sin(\theta_2 + \theta_3);$$

$$k6 = \sin(\theta_2 + \theta_3); \quad k7 = \cos(\theta_2 + \theta_3).$$

Итак, зная проекции скорости на оси координат, найдём её модуль

$$V_g = |J * \omega|. \quad (4)$$

Далее необходимо затронуть момент, касающийся быстрогодействия протокола. Для сравнения рассмотрим промышленные сетевые стандарты CANopen, Profibus, EtherCAT (см. таблицу) [8-10].

Минимальное время цикла ПЛК под управлением различных протоколов*

| Протокол | CANopen | Profibus | EtherCAT |
|----------|---------|----------|----------|
| Время | 4 мс | 2 мс | 12.5 мкс |

* Реальное время цикла для данной задачи можно получить только путём моделирования на оборудовании каждого типа, поэтому для сравнения возьмём наименьшие времена цикла для каждого из протоколов, указанные в литературных источниках.

С учётом вышеописанного можно получить зависимость, определяющую расстояние, пройденное КМУ за время реакции системы на появление того или иного препятствия в районе захвата и с учётом быстрогодействия протокола:

$$Dist = V_g * ResSys, \quad (5)$$

где V_g – линейная скорость движения точки подвеса захвата манипулятора;

$ResSys$ – время реакции системы, состоящее из времени реакции/цикла ПЛК и времени реакции датчиков и исполнительных механизмов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведём следующий пример (согласно рис. 1): манипулятор вращается с угловой скоростью $\omega_1 = 0.5 \text{ c}^{-1}$, углы θ_2, θ_3 - 90° и 0° соответственно, длины $L1 = 2160 \text{ мм}, L2 = 3700 \text{ мм}, L3 = 2100 \text{ мм}, E = 1200 \text{ мм}$

(удлинитель выдвинут максимально).

Согласно формуле (4) линейная скорость движения точки подвеса захвата будет равна 3.5 м/с.

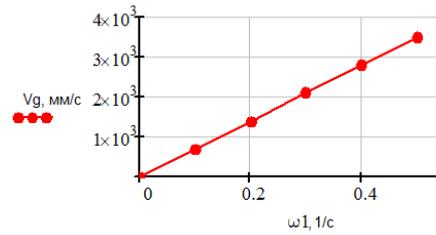


Рис. 2. Изменение линейной скорости движения относительно угловой скорости

Для определения препятствия можно использовать ряд устройств. Остановимся на ультразвуковых датчиках (использование оптических сенсоров менее предпочтительно ввиду особых условий работы). Время отклика у данных компонентов различное, в зависимости от стоимости и диапазона рабочих расстояний. С учётом того, что в большинстве случаев максимальная длина бревна, переносимого форвардером, 5-7 метров – выберем датчик Superproх UM30 с рабочим диапазоном 203-8000 мм и со временем отклика до 100 мс (в исполнении «Fast»).

Предваряя расчёт, также необходимо отметить следующие важные моменты:

1. Вследствие загрязнения, повреждения золотника гидрораспределителя и/или иных компонентов гидросистемы – время срабатывания гидравлической системы при экстренном торможении может резко вырасти.

2. После резкого торможения, особенно на высокой скорости вращения и с большим весом в захвате манипулятора, установку «болтанёт» в сторону движения. Поэтому величину критического расстояния до препятствия необходимо выбирать с запасом.

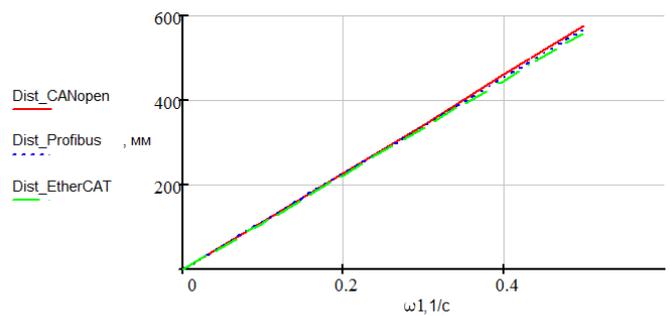


Рис. 3. Зависимость пройденного расстояния при экстренном торможении от угловой скорости

С учётом данных таблицы, формулы (5) и критического расстояния до препятствия в 5 м (соответствующее время отклика – 60 мс), также необходимо учесть время срабатывания гидравлической системы при торможении - 0.05..0.2 с [11], получим следующие результаты:

- *CANopen*: $3.5 * (60 * 10^{-3} + 4 * 10^{-3} + 0.1) = 0.574 \text{ м};$
- *Profibus*: $3.5 * (60 * 10^{-3} + 2 * 10^{-3} + 0.1) = 0.567 \text{ м};$

➤ *EtherCAT*: $3.5 \cdot (60 \cdot 10^{-3} + 12.5 \cdot 10^{-6} + 0.1) = 0.560$ м.

Полученные результаты иллюстрируют (рис.3), что использование быстродействующего протокола не даёт особых преимуществ, касательно применения к данной задаче. Но, исходя из экономических соображений, наиболее оправдано использование системы на основе стандарта EtherCAT. Так как не требуется дорогих разъемов или активных компонентов инфраструктуры, таких как коммутаторы, нет необходимости в дополнительных дорогостоящих проводах.

С точки зрения простоты диагностики (что немаловажно в условиях леса), решение на основе EtherCAT также можно считать наиболее предпочтительным. Помимо обнаружения и локализации неисправности поддерживается индивидуальный контроль качества каждого отдельного сегмента передачи данных. Определяются источники неполадок, например, такие как, дефектные разъемы, повреждения кабеля и т.д. [12].

Сравним полученные значения со случаем, если бы остановка совершалась по решению оператора.

Время реакции оператора определяется различными способами. Рассмотрим некоторые из них (*методы приближённой оценки*).

В первом случае время реакции оператора определяется (согласно Б.А. Смирнову) по следующей формуле [13]:

$$T_{on1} = a + bH, \quad (6)$$

где a – отрезок времени, начиная с появления звукового/визуального сигнала до реакции на него оператора (0.2–0.6 с);

b – время оценивания единицы информации (0.15 – 0.35 с);

H – количество оцениваемой информации, ед.

Рассмотрим самый идеальный случай (a и b имеют наименьшие значения; $H = 1$, один источник информации, например, звуковой).

Тогда получим: $3.5 \cdot (0.2 + 0.15 \cdot 1 + 0.1) = 1.575$ м.

Во втором случае, согласно М.И. Еникееву, данная величина характеризуется следующим выражением [14]:

$$T_{on2} = 270 \cdot \ln(n + 1) \text{ мс}, \quad (7)$$

где n – число возможных альтернатив.

Применительно к нашей задаче, возможны пять альтернатив для предотвращения столкновения с препятствием (остановка вращения, поднятие/опускание захвата, вращение в прямую/обратную сторону).

Тогда получим: $3.5 \cdot (270 \cdot \ln(5 + 1) + 0.1) = 2.04$ м.

Можно заметить, что расстояние, пройденное точкой крепления захвата манипулятора при автоматизированном торможении (например, АСУ на основе протокола CANopen), составляет $\approx 36\%$ от величины, полученной за T_{on1} , и 28% за T_{on2} соответственно.

V. Выводы

Обобщая сказанное выше и подводя итоги, необходимо отметить следующие моменты:

1. Результаты, продемонстрированные АСУ под управлением рассмотренных протоколов приблизительно равны. Можно заметить, что в рамках данной задачи скорость протокола не играет особой роли. Важнее подобрать наиболее быстродействующий элемент для детектирования препятствия (в нашем случае – ультразвуковой датчик).

2. Внедрение ряда автоматизированных функций (среди них и рассмотренный нами автоматизированный контроль наличия препятствий) позволит снизить нагрузку на опорно-двигательную систему, зрительный аппарат оператора, продлить время его оптимальной работоспособности на несколько часов и снизить загруженность оператора на наиболее сложных или рутинных этапах работы.

3. Несмотря на появление большого количества автоматизированных функций в современных лесозаготовительных машинах, оператор должен постоянно повышать свою квалификацию, отрабатывать навыки работы в ручном режиме во избежание негативных последствий в случае некорректной сработки/отказа автоматики.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Кран-манипуляторы [Электронный ресурс]. – URL: www.tehponiki.ru/articles/kran-manipulyatory.html (дата обращения 11.01.2018).
- [2] Гальянов И.В., Студенникова Н.С., Виды и причины несчастных случаев с тяжелыми последствиями в сельском хозяйстве и основные направления их предупреждения. Национальные интересы: приоритеты и безопасность.–2015.–№27 (312)
- [3] Здравоохранение в России. 2017: Стат.сб./Росстат. - М., 2017.
- [4] Ограниченное пространство // Институт промышленной безопасности, охраны труда и социального партнерства. [Электронный ресурс]. –URL: <http://base.safework.ru> (дата обращения 15.01.2018).
- [5] Лесозаготовки // Институт промышленной безопасности, охраны труда и социального партнерства. [Электронный ресурс]. –URL: <http://base.safework.ru> (дата обращения 15.01.2018).
- [6] J. J. Craig. Introduction to Robotics: Mechanics and Control (3 edition). Prentice Hall, August 6, 2004.
- [7] B. Lofgren, J.Wikander, “Kinematic Control of Redundant Knuckle Booms,” Forest Products Society 2009. International Journal of Forest Engineering 20(1): 22-30.
- [8] XFC EtherCAT PLC with 12.5 μ s cycle time [Электронный ресурс]. –URL: <http://www.ferret.com.au/c/beckhoff-automation/xfc-ethercat-plc-with-12-5-s-cycle-time-n1831592> (дата обращения 22.01.2018).
- [9] M. Paulweber, K. Lebert, Mess- und Prüfstandstechnik: Antriebsstrangentwicklung · Hybridisierung · Elektrifizierung Springer Vieweg, 2014, S. 261.
- [10] Unidrive SP: position control with interpolation [Электронный ресурс]. –URL: www.controltechniques.com (дата обращения 17.01.2018).
- [11] Гидравлический привод тормозов [Электронный ресурс]. – URL: http://k-a-t.ru/avto_shassi_2/7-tormoza_7/index.shtml (дата обращения 22.01.2018).
- [12] Дудкин А.В. EtherCAT и технология XFC для решения задач сверхбыстрого синхронного управления // Автоматизация в промышленности.–2015.–№5.–с. 40-42.
- [13] Смирнов Б.А. Инженерная психология. Практические занятия.– Киев: Вища школа, 1979. – 192 с.
- [14] Еникеев М.И. Психологический энциклопедический словарь. – М., 2010.

ACS' influence on operating safety of logging manipulator-type machine

M. Vasenev

Abstract – This paper considers the questions associated with the impact assessment of the ACS's reaction on crane-manipulator's safety of a logging machine. The statistical key figures of traumatism by logging are deduced. The main dangers occurred when using logging manipulator-type machines are identified. There is produced the calculation of basic kinematic characteristics of crane-manipulator as well as covered distance during the system's response time with the reference to protocol performance and actuating mechanisms. Various methods of the calculation logging machine operator's response time are described. There is implemented the comparison of test results demonstrated by ACS headed by different industrial network protocols (relatively operator's reaction/response time). The conclusions about role and prospects of automated applications in logging manipulator-type machines are produced.

Keywords – logging, crane-manipulator's safety, kinematic characteristics, system's response time, protocol performance.