

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МАНИПУЛЯТОРА ФОРВАРДЕРА АМКОДОР-2662 И ЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СИЛОВОГО ПРИВОДА

С.А. Голякевич¹, А.Р. Гороновский²

¹ Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный технологический университет, gsa@belstu.by

² Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный технологический университет, arg@belstu.by

Аннотация: В статье изложен процесс создания цифрового двойника манипулятора и его гидравлического привода для форвардера Амкодор 2662. Цифровой двойник разрабатывался с целью сокращения объема натурных экспериментов для обоснования параметров конструкции и привода при создании отечественного манипулятора форвардера. Его использование также позволило отработать перспективные варианты эффективного управления гидравлическим приводом. Реализация цифрового двойника осуществлялась с использованием заранее разработанной математической модели. Кинематика и динамика элементов металлоконструкции манипулятора, реализована в цифровом двойнике с помощью пакета MatLab/Simulink. Параметры трения и упругости введены в него в виде интегрированных функций уравнений связи предварительно записанных в пакете MatLab. Описание гидравлической системы и системы управления ей реализовано в пакетах MatLab/Simulink и Stateflow. Сбор требуемых исходных данных выполнен экспериментально.

Введение ограничений со стороны ряда зарубежных стран на поставку комплектующих для лесозаготовительной техники поставило перед предприятиями лесного машиностроения Республики Беларусь задачу по их оперативному импортозамещению. В отношении харвестеров и форвардеров в первую очередь подлежали собственной разработке балансирные мосты, гидравлические компоненты, и технологическое оборудование: манипуляторы, харвестерные головки, грейферные захваты. С целью создания надежного и энергоэффективного отечественного технологического оборудования разработана математическая модель [1], а на ее основе реализован цифровой двойник манипулятора форвардера Амкодор-2662 и его гидравлического силового привода.

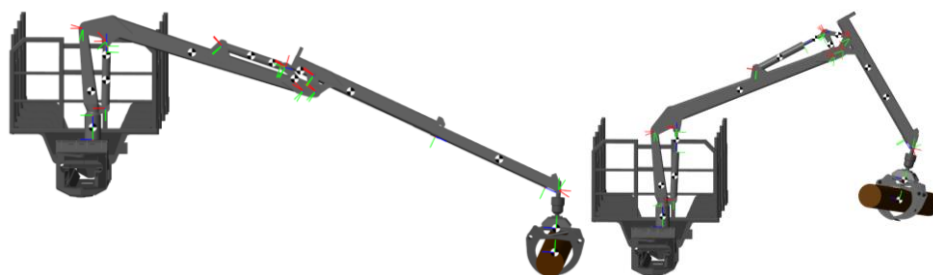


Рисунок 1 – Визуализация работы цифрового двойника манипулятора форвардера

Область использования цифрового двойника – получение данных о величинах нагрузок, действующих в элементах конструкции манипулятора, давлений и расходов гидравлической жидкости на каждом исполнительном механизме с учетом: гидравлических, кинематических и механических характеристик исполнительных органов, инерционных характеристик металлоконструкции, параметров рабочего органа и предметов труда, энергетических характеристик привода, параметров системы управления, порядка, способов и приемов выполнения отдельных и совмещаемых операций на всех этапах их протекания.

Цифровой двойник (рисунок 2) реализован в программном пакете Matlab и его расширениях Simulink/Simscape и StateFlow. Динамика движения элементов манипулятора:

колоны, стрелы, рукояти, телескопического звена и рабочего органа с предметом труда реализована непосредственно в пакете Simulink, а описание процессов сопротивления движению гидроцилиндров и в элементах телескопического звена с учетом его упругих свойств реализовано отдельно в виде функций записанных предварительно в Matlab и внедренных в последующем в тело модели Simulink. Для реализации моделей гидравлического привода использован пакет дополнений Simulink/Simscape, а для систем управления, составления графа текущих состояний и перехода между ними использован пакет расширения StateFlow.

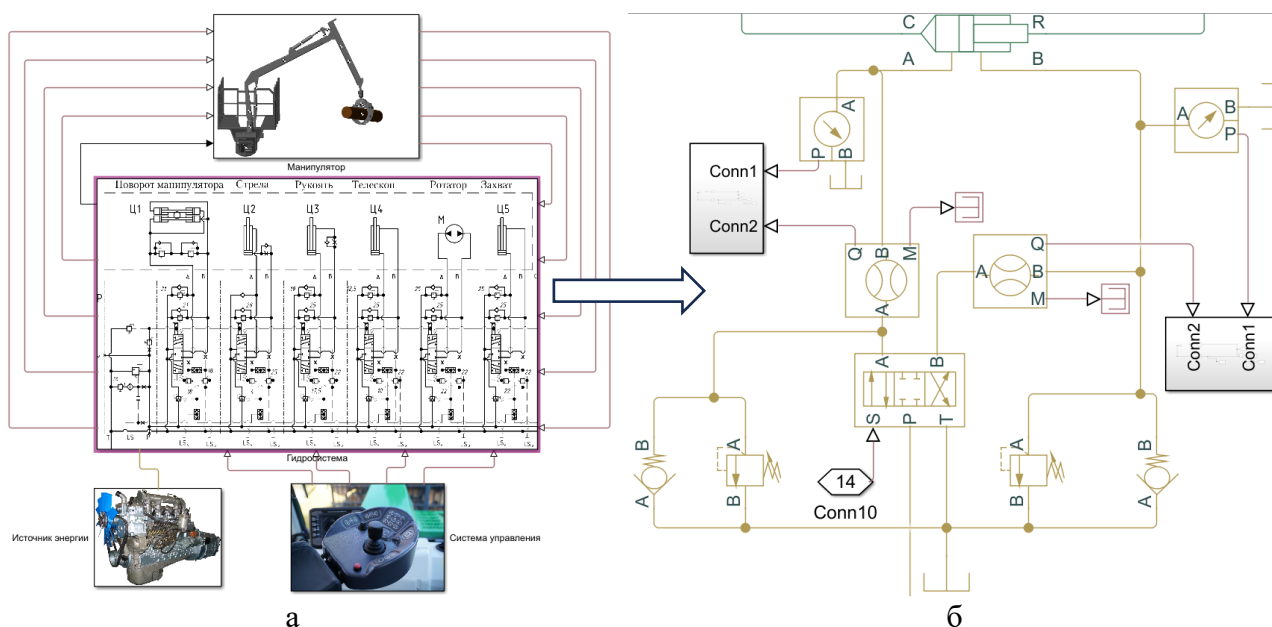


Рисунок 2 – Общая блок-схема цифрового двойника (а) и участок гидравлической системы привода гидроцилиндра телескопического звена (б)

Гидравлическая система привода реализована на основе базовой гидравлической схемы завода изготовителя, приведенной на рисунке 3. Обратим внимание, что на схеме дополнительно указаны гидравлические линии и элементы системы управления по нагрузке (*LS*). Ввиду необходимости последующего варьирования принципов управления, данная система в приведенном виде не реализовывалась. Источник энергии в цифровом двойнике представлен рабочими характеристиками дизельного двигателя Д-260.9S2 («Минский моторный завод») и управляемого гидравлического насоса FRL-074 («Sauer Danfoss»). Базовые параметры гидроцилиндров, реализованных в цифровом двойнике приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Базовые параметры гидроцилиндров

Наименование гидравлического компонента	Характеристики, мм
Гидроцилиндр поворота колоны	Ø100xh620
Гидроцилиндр стрелы	Ø110xØ70xh688
Гидроцилиндр рукояти	Ø110xØ56xh790
Гидроцилиндр телескопа	Ø50x Ø 30xh2050

Исходные данные о пропускной способности компонентов гидросистемы, к примеру секций гидрораспределителя PVG 32 («Sauer Danfoss») задавались согласно характеристикам завода изготовителя [2] в виде зависимостей «давление-расход» на режимах подачи и сброса. Данные о чувствительности механических и электрически элементов системы управления встроенной в гидрораспределитель принимались также по данным [2]. Указанные характеристики проверялись экспериментально и, при необходимости, корректировались. Для проведения экспериментальных исследований использовался опытный образец форвардера,

оснащенный соответствующим регистрирующим оборудованием. Параметры сечений подающих и обратных гидравлических линий также устанавливались экспериментально.

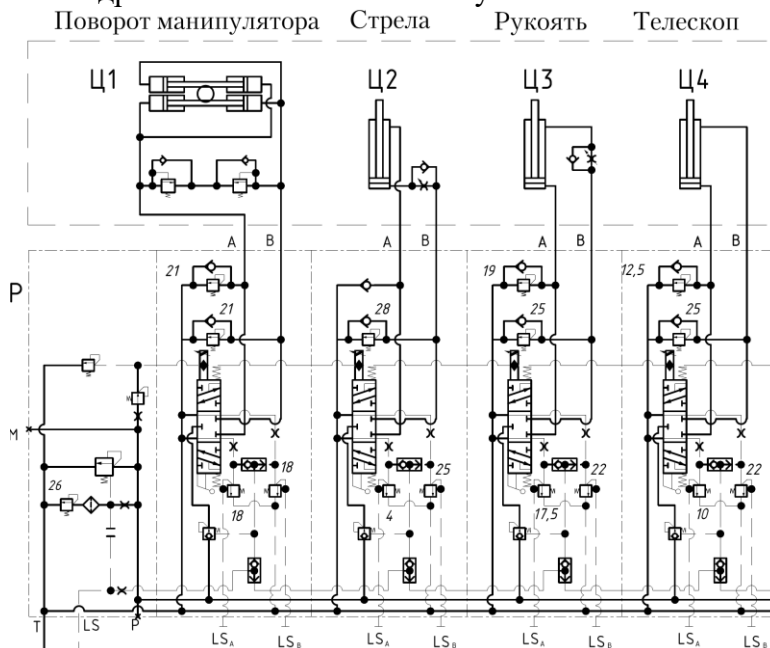


Рисунок 3 – Схема участка гидравлической системы привода манипулятора «гидравлический распределитель - исполнительные механизмы» реализованный в виде цифрового двойника

Полученный цифровой двойник позволил оперативно выполнять оценку динамической нагруженности конструкций манипуляторов широкого модельного ряда, обоснование параметров гидравлических приводов, анализировать работу систем управления и т.д. В качестве примера на рисунке 4 приведены данные об изменении гидравлического давления в контурах гидроцилиндров стрелы, рукояти и телескопического звена (полости сжатия) в процессе их совместного задействования при погрузке пачки круглых лесоматериалов массой 395 кг с максимального вылета и при максимальном открытии золотников секций гидрораспределителя.

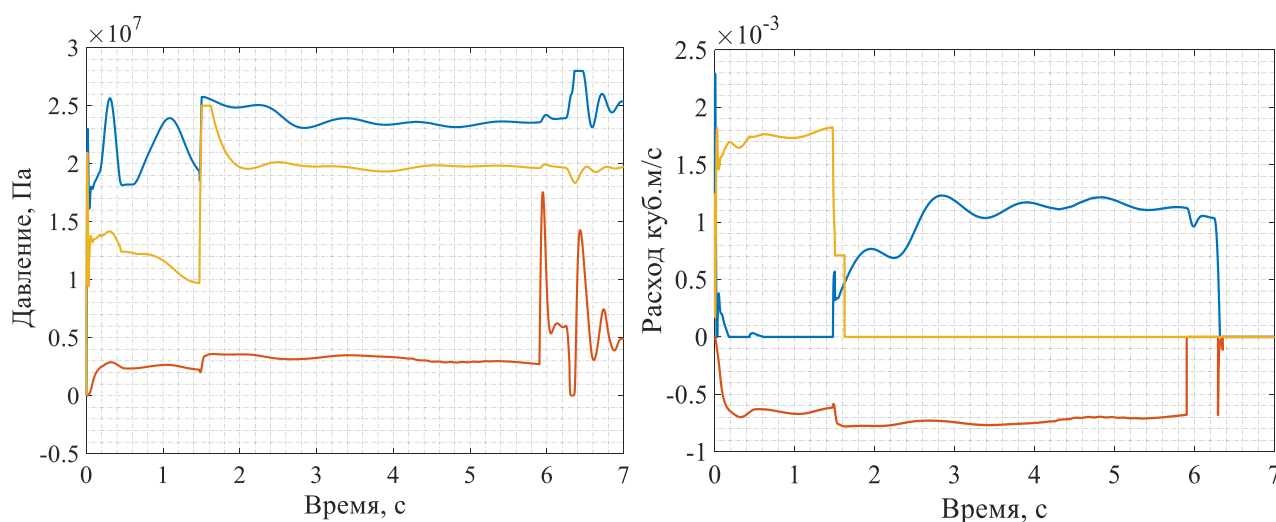


Рисунок 4 – Пример результатов виртуального эксперимента с использованием цифрового двойника манипулятора

Разработанный цифровой двойник манипулятора проходит процедуру оценки адекватности и точности описания процессов по показателям давления, гидравлического расхода, момента срабатывания, силового нагружения и т.д. Верификация выполняется для вариантов отдельного и совместного (от 2 до 4 шт.) использования гидравлических

потребителей на операциях рабочего и холостого хода манипулятора, для разной мощности источника гидравлической энергии на операциях погрузки и разгрузки лесоматериалов.

Следует отметить, что режимы работы манипуляторов на операциях погрузки и разгрузки преимущественно не стационарны. Использование теста нормированных спектральных плотностей для нестационарных процессов согласно [3, с. 355] не приемлемо. В этой связи оценка адекватности разделена на 2 этапа. На участке разгона (переходной процесс), участках установившегося движения и при статическом удержании пачки фиксировались расхождения величин давлений и времени прохождения участка (за исключением статического удержания), полученных теоретическим и экспериментальным путем при различных начальных и конечных положениях звеньев манипулятора и массы перемещаемых лесоматериалов. В этом случае относительные отклонения величин давлений не превышали 11,7%.

Для этапа прекращения подачи гидравлической жидкости анализировались спектральные плотности частот f , Гц свободных колебаний манипулятора. Для этого, согласно выражению [3, с. 248], определялись величины статистики нормированных спектральных плотностей:

$$D^2 = \left(\frac{2}{n_1} + \frac{2}{n_2} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \left[\log \frac{S_1(f_i)}{S_2(f_i)} \right]^2,$$

где n_1 и n_2 – число степеней свободы оценок сравниваемых нормированных спектральных плотностей $S_1(f_i)$ и $S_2(f_i)$;

n – число полос спектра [3, с. 248].

Определение спектральных плотностей производилась численным методом с помощью предварительно полученных значений автокорреляционных функций. Функции спектральных плотностей $S_\sigma(f)$ дополнительно сглаживались весовой функцией Ханна D_r [3, с.319]:

$$S_\sigma(f) = 2\Delta t \left[R_\sigma(0) + 2 \sum_{r=1}^{m-1} D_r \cdot R_\sigma(r, \Delta t) \cdot \cos \frac{\pi \cdot r \cdot f}{m} \right],$$

где $R_\sigma(0)$ – значение автокорреляционной функции при шаге $r=0$;

$R_\sigma(r, \Delta t)$ – значение автокорреляционной функции при номере шага r , соответствующего сдвигу времени Δt ;

m – максимальное число шагов автокорреляционной функции [3, с. 313].

Тест нормированных спектральных плотностей, позволил сделать вывод об адекватности разработанной математической модели. Величины статистики D^2 нормированных спектральных плотностей, сравниваемых параметров, находились в пределах 34,9–48,5 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и значении области принятия гипотезы $\chi^2_{n, \alpha}$ равном 55,76. Это свидетельствует об эквивалентности сравниваемых спектров теоретических и экспериментальных реализаций, а, следовательно, адекватности разработанного цифрового двойника.

Список источников

1. Голякевич, С. А. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин / С. А. Голякевич, А. Р. Горонковский // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2024. – № 1(276). – С. 132-143. – DOI 10.52065/2519-402X-2024-276-18.

2. PVG 32 proportional valves. Technical documentation URL: <https://assets.danfoss.com/documents/406946/BC152886483664en-001602.pdf> (дата обращения: 12.02.2024)

3. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов. пер с англ./ Дж. Бен-дат., А. Пирсол. – М.: Мир, 1971. – 408 с.