

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНХРОННОСТИ РАБОТЫ ГИДРОЦИЛИНДРОВ САМОПОДЪЕМНОЙ ОПАЛУБКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРАХ

Крупенин Ф.Р., Тигунцев М.А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гидропривод, гидроцилиндр, экспериментальный стенд, самоподъемная опалубка, подъемно-транспортные механизмы, подъемное оборудование.

Аннотация. В статье представлено исследование синхронности движения и скоростных характеристик штоков гидроцилиндров в составе подъемной платформы – экспериментальный стенд. Актуальность исследования заключена в получении новых знаний на основе полученных результатов экспериментального анализа влияния эксплуатационных факторов – величины нагрузки и её распределения, а также расхода рабочей жидкости на равномерность движения штоков. Рассмотрена эффективность применения гидравлической схемы с установленными последовательно делителями потока для выравнивания скоростей движения исполнительных органов. Проанализированы особенности работы гидросистемы применительно к различным условиям нагружения платформы и при изменении частоты вращения вала насоса. Особое внимание уделено методике проведения серии экспериментов и оценке ключевых параметров, таких как: скорость выдвижения каждого штока, синхронность работы гидропривода, а также фактическая эффективность делителей потока в различных режимах работы. Полученные результаты, представленные в виде временных зависимостей и графиков, позволили установить количественную зависимость между рассматриваемыми факторами и равномерностью движения штоков. Результаты могут быть использованы для проектирования и оптимизации гидравлических систем самоподъемных платформ, грузоподъемных механизмов и другого промышленного оборудования, требующего синхронного движения штоков нескольких цилиндров.

AN EXPERIMENTAL UNIT FOR STUDYING THE SYNCHRONICITY OF HYDRAULIC CYLINDERS OF SELF-CLIMBING FORMWORK UNDER VARIOUS FACTORS

Krupenin F.R., Tiguntsev M.A.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: hydraulic fluid power, hydraulic cylinder, experimental unit, self-climbing formwork, materials-handling machines, lifting equipment.

Abstract. The article presents a study of the synchronism of movement and speed characteristics of the rods of hydraulic cylinders as part of a lifting platform – an experimental unit. The relevance of the study lies in obtaining new knowledge based on the results of the experimental analysis of the influence of operational factors – the magnitude of the load and its distribution, as well as the flow rate of the working fluid on the uniformity of the movement of the rods. The article considers the effectiveness of using a hydraulic circuit with flow dividers installed in series to equalize the speeds of the moving parts. The article analyzes the features of the hydraulic system's operation under different loading conditions of the platform and when the pump shaft speed changes. Special attention is paid to the methodology of conducting a series of experiments and evaluating key parameters, such as the speed of each rod's extension, the synchronism of the hydraulic drive, and the actual efficiency of the flow dividers in various operating modes. The obtained results, presented in the form of time dependencies and graphs, allowed to establish a quantitative relationship between the factors under consideration and the uniformity of the rod movement. The results can be used for the design and optimization of hydraulic systems of self-climbing platforms, lifting mechanisms and other industrial equipment that require the synchronous movement of the rods of several cylinders.

Введение

Современные самоподъемные опалубочные комплексы в качестве базового силового агрегата используют гидропривод, и их эффективность напрямую зависит от качества работы всей гидравлической системы [1]. Одной из проблем при эксплуатации таких систем является неравномерное выдвижение штоков цилиндров в момент выполнения рабочей операции подъема, вызванное изменяющимися нагрузками, погрешностями в распределении рабочей

жидкости и динамическими воздействиями. Данные факторы приводят к перекосам подъемной платформы, увеличению времени подъема и, как следствие, к снижению производительности и росту эксплуатационных рисков [2, 3].

Несмотря на распространенность гидроприводов в строительной технике, вопросы оценки их синхронной работы при комплексном влиянии факторов, таких как: различный расход рабочей жидкости, подаваемой в гидросистему; асимметричная нагрузка на грузоподъемную платформу; геометрические размеры грузоподъемного средства остаются недостаточно изученными. Существующие стенды часто фокусируются на отдельных параметрах, например, КПД насосов или характеристики гидроцилиндров, но не учитывают взаимодействие нескольких переменных в реальных условиях [4]. В то же время имеющиеся методики не учитывают комбинированное влияние нескольких факторов на синхронность работы гидропривода и не адаптированы для анализа гидросистем, где один главный делитель потока, соединен с двумя малыми делителями с меньшими рабочими диапазонами расхода, питающими четыре гидроцилиндра [5-7].

Целью данной работы является разработка экспериментального стенда, позволяющего:

- оценить синхронность движения штоков цилиндров;
- определить скорость и время подъема;
- исследовать влияние факторов на работу системы.

Новизна исследования заключается в следующем:

– воспроизведение стендом принципа работы реальной самоподъемной опалубочной системы;

– одновременное выполнение работы системой синхронизации гидропривода на четыре гидроцилиндра;

– влияние пространственного распределения нагрузки на синхронность подъема.

Практическая значимость работы связана с возможностью прогнозирования поведения гидропривода самоподъемной опалубки на этапе проектирования, а также оптимизации режимов её эксплуатации. Полученные данные могут быть применены для:

- выбора системы синхронизации работы гидропривода;
- подбора делителей потока с требуемой точностью;
- разработке алгоритма адаптивной системы автоматизированного управления гидроприводом самоподъемной опалубки с учетом рассматриваемых факторов.

Материалы и методы

Стенд представляет собой стальную платформу, состоящую из главных и второстепенных балок длинами 2,5 м и 1,8 м соответственно. Главные балки выполнены из спаренных швеллеров, таким образом, чтобы проушина штока цилиндра через палец соединялась с ними. Проушиной со стороны корпуса цилиндр соединяется с опорными балками. Ход штоков цилиндров – 300 мм. По длине главных балок платформы и нижних опорных балок выполнены соосные отверстия с шагом 250 мм для возможности изменения положения установки цилиндров (рис. 1).

Гидросистема экспериментального стенда выполнена с двухуровневой установкой делителей потока, используемых для синхронизации движения штоков [8-10]. С насоса жидкость подается в главный делитель потока, а далее из него подается в два малых делителя потока, каждый из которых соединен с поршневыми полостями двух цилиндров. Таким образом в гидросистеме образуется каскад из одного делителя потока, работающего в диапазоне 3-6 л/мин и двух делителей, работающих в диапазоне 1-3 л/мин. Для измерения расхода в систему установлен расходомер, позволяющий измерять общий расход жидкости, подаваемой одновременно на четыре цилиндра. В гидросистеме перед поршневыми полостями цилиндров установлены манометры для определения давления в системе в момент подъема в каждом из цилиндров (рис. 2).

Изменение подаваемого расхода осуществляется посредством установленного в систему частотного преобразователя, с помощью которого изменяется частота вращения вала электродвигателя насоса, тем самым изменяя его подачу.

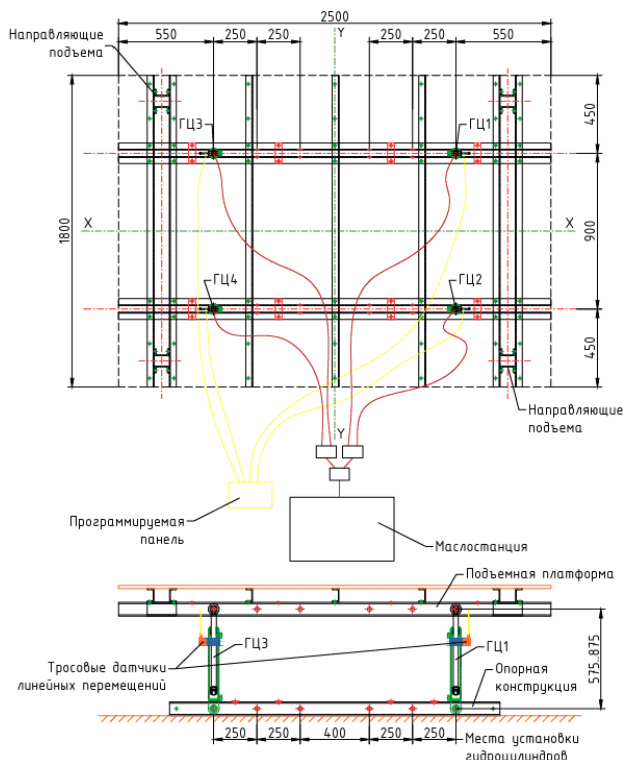


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

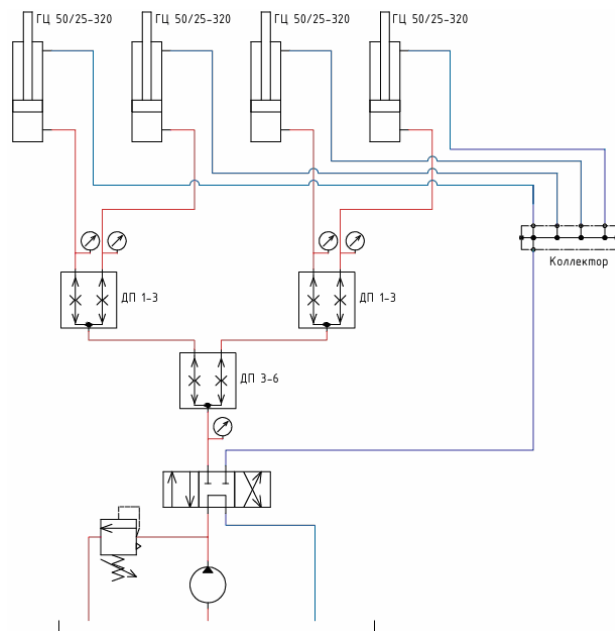


Рис. 2. Гидравлическая схема экспериментального стенда

В качестве средств измерения скорости выдвижения штоков цилиндров используются тросовые датчики линейных перемещений с токовым входом 4-20 мА, длиной измерения 1000 мм и линейной точностью $\pm 0,1\%$, в которых механическое перемещение нити преобразуется в электрический сигнал. Датчики установлены на корпус цилиндра, а трос закреплен на проушине штока. Выходы датчиков подключены к программируемой панели, позволяющей отображать и записывать данные о линейных перемещениях штоков, посредством преобразования электрического сигнала. В качестве результата создается файл с табличными значениями нахождения штока каждого из 4-х цилиндров в определенный момент времени с интервалом записи данных 0,1 с.

Управление подъемом платформы стенда осуществляется при помощи гидрораспределителя, позволяющего подавать жидкость либо в поршневую, либо в штоковую полости цилиндров.

При экспериментальной работе учитываются три группы факторов: расход жидкости в гидросистеме, величина и местоположение нагрузки на поверхности платформы стенда и расположение цилиндров относительно платформы.

Испытания в каждой серии экспериментов проводились при частотах питающего тока 50, 40, 30 Гц, что соответствует различным значениям общего расхода, подаваемого насосом в гидросистему, и является 1-й группой факторов.

2-я группа факторов включает в себя величину и расположение нагрузки на поверхности платформы стенда. Серии испытаний проводились при следующих случаях:

- равномерное нагружение платформы, симметричное относительно центра тяжести платформы;
- неравномерное нагружение платформы (А) – нагружение с одной стороны большей нагрузкой таким образом, чтобы два цилиндра попарно были нагружены сильнее двух других и с учетом того, что оба наиболее загруженных цилиндра подключены к одному малому делителю потока (рис. 3);
- неравномерное нагружение платформы (Б) – загружена половина платформы по короткой стороне таким образом, что в каждой паре цилиндров, соединенных с малыми делителями потока, один цилиндр нагружен гораздо больше другого;
- неравномерное нагружение платформы (В) в зоне одного цилиндра.

3-я группа факторов учитывает изменение расположения цилиндров под платформой стенда при равномерном нагружении поверхности платформы. Данное смещение цилиндров относительно центра тяжести платформы позволяет перераспределять нагрузку, приходящуюся на цилиндр, тем самым создавая разное значение давлений в поршневых полостях цилиндров.

Центр тяжести подъемной платформы принимается за начало координат, относительно которого привязываются либо распределенная нагрузка, либо ось цилиндра. В проведенных сериях экспериментов попарно учитывались группы факторов 1-2 и 1-3.

К параметрам, измеряемым в результате проведения эксперимента, относятся время подъема T_{pod} ; средняя скорость подъема платформы $v_{пл}$; средние скорости выдвижения штоков цилиндров v_i ; показатель неравномерной работы δ . Таким образом, критериальные параметры для определения времени подъема будут представлены в следующем виде:

$$T_{pod} = \begin{cases} f(Q, F, x, y), \\ \max\{T_1...T_4\}, \end{cases}$$

где Q – общий расход рабочей жидкости, подаваемый в гидросистему, л/мин; F – величина нагрузки, кгс; x, y – координаты центра тяжести приложения нагрузки; $T_1...T_4$ – время подъема штока каждого из цилиндров до требуемой высоты, определяемое по результатам измерений, с.

Средние скорости выдвижения штоков цилиндров, мм/с:

$$v_i = \frac{S}{T_i},$$

где S – высота подъема платформы стенда, мм.

Показатель неравномерной работы, %:

$$\delta = \frac{v_{\max,i} - v_{\min,i}}{v_{i,cp}},$$

где $v_{\max,i}$; $v_{\min,i}$ – максимальное и минимальное из средних значений скоростей выдвижения штоков цилиндров, мм/с; $v_{i,cp}$ – среднеарифметическое из значений средних скоростей выдвижения штоков цилиндров, мм/с.

Обсуждение и заключение

Разработанный экспериментальный стенд позволил провести комплексную оценку синхронности и скорости работы гидроцилиндров системы самоподъемной опалубки при различных режимах нагружения и расходах жидкости. По результатам проведенных испытаний построены графики зависимости выдвижения штоков от времени. В качестве примера представлен график при неравномерном нагружении одной стороны платформы и частоте питающего тока 50 Гц (рис. 4).

Дополнительно для данного вида нагружения в табличной форме приведены результаты по скорости всех цилиндров и синхронности работы всей системы. Значением по времени подъема, используемого для определения среднего значения скорости выдвижения штоков, было выбрано значение времени подъема цилиндра, который первый достигает конечную отметку 300 мм, чтобы исключить влияние работы делителей потока на завершающей стадии подъема. Результаты приведены в таблице 1.



Рис. 3. Неравномерное нагружение платформы

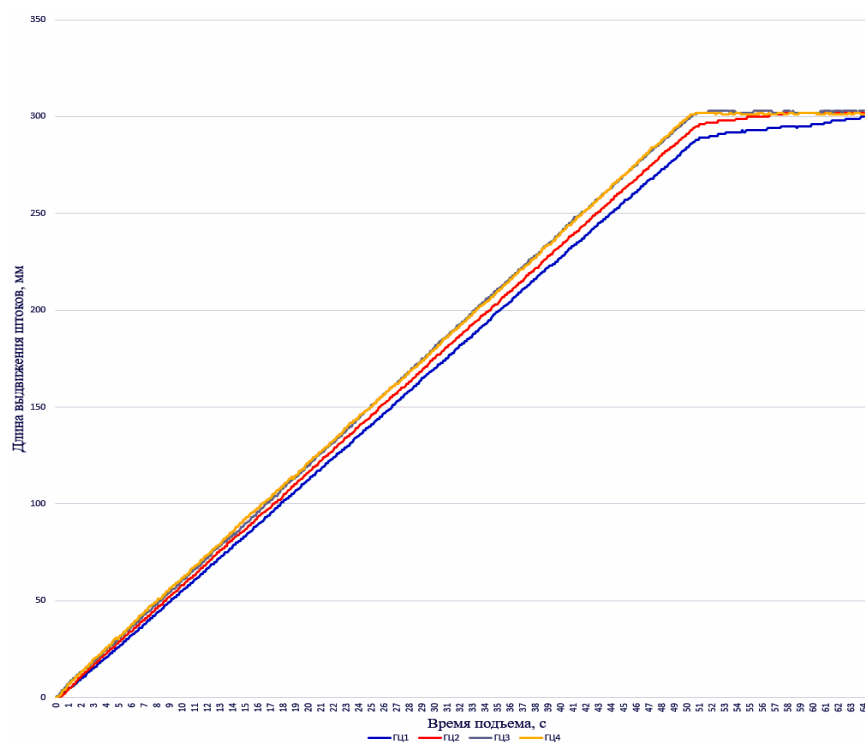


Рис. 4. График выдвигания штоков цилиндров при частоте питающего тока 50 Гц и неравномерном нагружении платформы

Табл. 1. Значение скоростей выдвигания штоков и показателей неравномерной работы при неравномерном нагружении платформы и различных частотах

Гидро-цилиндр	Давление в цилиндре от внешней нагрузки P , МПа	Время подъема штока T_i , с	Средняя скорость выдвижения штоков v_i , мм/с	Средне-арифметическое из значений средних скоростей $v_{i,ср}$, мм/с	Показатель неравномерной работы δ , %
		Частота питающего тока $f = 50$ Гц			
ГЦ1	3,05	50,1	5,67	5,86	5,46
ГЦ2	2,85	50,1	5,81		
ГЦ3	0,6	50,1	5,97		
ГЦ4	0,7	50,1	5,99		
		Частота питающего тока $f = 40$ Гц			
ГЦ1	3,05	53,6	5,39	5,51	3,81
ГЦ2	2,85	53,6	5,47		
ГЦ3	0,6	53,6	5,60		
ГЦ4	0,7	53,6	5,58		
		Частота питающего тока $f = 30$ Гц			
ГЦ1	3,05	60	4,87	4,94	2,63
ГЦ2	2,85	60	4,90		
ГЦ3	0,6	60	5,00		
ГЦ4	0,7	60	4,98		

Таким образом, с помощью экспериментального стенда получены следующие результаты:

- зависимость длины выдвигания штока от времени для каждого из цилиндров;
- получена оценка влияния значения и расположения нагрузки на скорость подъема штоков и синхронность подъема;
- получена оценка влияния общего расхода жидкости, подаваемого в систему, на синхронность работы гидросистемы.

В качестве дальнейших исследований могут быть проведены дополнительные испытания с делителями потоков различных производителей, а также адаптивной системой управления подъемом, позволяющей компенсировать ошибку по длине выдвигания штоков.

Список литературы

1. Евтюков С.А., Евтюков С.С., Чудаков А.В., Куракина Е.В. Наземные транспортно-технологические машины: Монография. – СПб: Изд. дом «Петрополис», 2016. – 504 с.
2. Крупенин Ф.Р. Факторы, влияющие на использование самоподъемной опалубки в области высотного строительства // AlfaBuild. – 2023. – Т. 28. – DOI: 10.57728/ALF.28.1.
3. Крупенин Ф.Р., Куракина Е.В. Анализ конструкций и параметров самоподъемных платформ и перспективы развития // Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". – 2024. – Т. 21, №3. – С. 376-387. – doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-376-387.
4. Антоненко В.И., Сидоренко В.С. Непрямое дроссельное регулирование в многодвигательных гидромеханических системах // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – Т. 10, №1(44). – С. 70-75.
5. Рыбак А.Т., Ивановская А.В., Батура П.П., Пелипенко А.Ю. Синхронизация в многодвигательных гидромеханических системах // Advanced Engineering Research. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 337-345. – doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345.
6. Бедрина Е.А. К исследованию делителей потока в активных рабочих органах дорожно-строительных машин // Омский научный вестник. – 2003. – №4(25). – С. 97-99.
7. Коробкин В.А., Котлобай А.Я., Котлобай А.А., Тамело В.Ф. О перспективных направлениях создания гидравлических агрегатов приводов строительных и дорожных машин // Наука и Техника. – 2012. – №6. – С. 71-76.
8. Антоненко В.И. Анализ статических характеристик делителя потока непрямого регулирования // Вестник Донского государственного технического университета. – 2014. – Т. 14, №4(79). – С. 158-165. – doi.org/10.12737/6895.
9. Антоненко В.И., Сидоренко В.С. К вопросу о синхронных механизмах мобильных машин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2009. – №S1. – С. 121-129.
10. Сыркин В.В., Квасов И.Н., Галуза Ю.Ф., Федорова М.А. Исследование динамики делителя потока с регулирующим органом из эластомера // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2018. – Т. 2, №4. – С. 9-14. – DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-9-14.

References

1. Evtyukov S.A., Evtyukov S.S., Chudakov A.V., Kurakina E.V. Land transport and technological machines: monograph. – SPb.: Petropolis Publ. house, 2016. – 504 p.
2. Krupenin F.R. Factors influencing the use of self-lifting formwork in the field of high-rise construction // AlfaBuild. 2023, vol. 28. DOI: 10.57728/ALF.28.1.
3. Krupenin F.R., Kurakina E.V. Analysis of structures and movement parametres of self-climbing platforms and development prospects // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024, vol. 21, no. 3, pp. 376-387. doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-376-387.
4. Antonenko V.I., Sidorenko V.S. Indirect valve regulation in multichamber hydromechanical systems // Bulletin of Don State Technical University. 2010, vol. 10, no. 1(44), pp. 70-75.
5. Rybak A.T., Ivanovskaya A.V., Batura P.P., Pelipenko A.Yu. Synchronization in multi-motor hydromechanical systems // Advanced Engineering Research. 2021, vol. 21, no. 4, pp. 337-345. doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345.
6. Bedrina E.A. Research on flow dividers in active working bodies of road construction machines // Omsk Scientific Bulletin. 2003, no. 4(25), pp. 97-99.
7. Korobkin V.A., Kotlobai A.Ya., Kotlobai A.A., Tamelo V.F. On perspective directions pertaining to development of hydraulic units for construction and road machinery drives. // Science & Technique. 2012, no. 6, pp.71-76.
8. Antonenko V.I. Static characteristics analysis of indirect control flow valve // Bulletin of Don State Technical University. 2014, vol. 14, no. 4(79), pp. 158-165. doi.org/10.12737/6895.
9. Antonenko V.I., Sidorenko V.S. On synchronous mechanisms of mobile machines // Bulletin of Don State Technical University. 2009, no. S1, pp. 121-129.
10. Syrkin V.V., Kvasov I.N., Galuza Yu.F., Fedorova M.A. Study of the flow divider dynamics with an elastomer regulator // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2018, vol. 2, no. 4, pp. 9-14. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-9-14.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Крупенин Федор Романович – аспирант	Krupenin Fedor Romanovich – postgraduate student
Тигунцев Михаил Александрович – аспирант	Tiguntsev Mikhail Aleksandrovitch – postgraduate student
theoharicot@yandex.ru	

Получена 03.10.2025