

ISSN 1816-0301 (Print)  
ISSN 2617-6963 (Online)  
УДК 621.87; 681.5

Поступила в редакцию 14.04.2018  
Received 14.04.2018

А. Г. Стрижнев, А. А. Шихов

НПООО «ОКБ ТСП», Минск, Беларусь

## УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ ОПОРНЫХ АГРЕГАТОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДЪЕМА И ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ПЛАТФОРМЫ

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы управления положением опорных агрегатов, входящих в состав автоматической системы подъема и горизонтирования платформы. Для гидравлических опорных агрегатов определен состав функционально необходимых элементов, позволяющих провести их исследование в различных рабочих состояниях (разгруженном и нагруженном). Построены регулировочные характеристики для различных состояний нагруженности. Сняты логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики, определена передаточная функция гидропривода и осуществлен синтез цифрового корректирующего устройства. Проведены моделирование и экспериментальная проверка работы гидропривода в составе системы горизонтирования и выполнен сравнительный анализ их работы. В результате проделанной работы создана система управления гидроприводом и получена адекватная его поведению модель.

**Ключевые слова:** система подъема и горизонтирования, регулировочные характеристики, логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики, передаточная функция, корректирующее устройство, моделирование

**Для цитирования.** Стрижнев, А. Г. Управление положением опорных агрегатов автоматической системы подъема и горизонтирования платформы / А. Г. Стрижнев, А. А. Шихов // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 26–38.

A. G. Strizhnev, A. A. Shykhau

Scientific Production Limited Liability Company "OKB TSP", Minsk, Belarus

## POSITIONING CONTROL OF REFERENCE UNITS OF AUTOMATIC RAISING AND LEVELING SYSTEM OF SUPPORT PLATFORM

**Abstract.** The questions of positioning control of reference units of automatic raising and leveling system of support platform were considered in the article. The list of functional elements which are needed for analyzing the hydraulic reference units behavior in different working states (unloaded and loaded) was specified. Adjusted characteristics for different load states were constructed. Logarithmic amplitude-frequency responses and phase-frequency responses were measured and the transfer function of hydraulic reference unit was identified. The digital controller was synthesized. Modeling and experimental verification of hydraulic reference unit behavior within automatic raising were made. The comparative analysis of their functioning was done. As a result the closed loop system for hydraulic reference unit was made and adequate model of its behavior was created.

**Keywords:** raising and leveling system, adjusted characteristics, logarithmic amplitude-frequency responses, the transfer function, digital controller, modelling

**For citation.** Strizhnev A. G., Shykhau A. A. Positioning control of reference units of automatic raising and leveling system of support platform. *Informatics*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 26–38 (in Russian).

**Введение.** Существует большое разнообразие методов и способов подъема и горизонтирования опорных платформ различного назначения [1–5], однако в настоящее время вопросы управления положением опорных агрегатов с учетом их загруженности не освещены. В работе [6] предложен новый способ автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы, основанный на применении двух контуров управления по усилию и положению. При реализации системы подъема и горизонтирования необходимо, чтобы все опорные агрегаты имели независимое от нагрузки управление и обеспечивали высокое качество работы. В настоящей статье дополняется предложенный способ и рассматриваются вопросы управления положением опорных агрегатов. Независимо от количества управляемых опорных агрегатов, содержащих электрические или гидравлические двигатели, каждый из них

представляет собой исполнительный привод следящей системы. В дальнейшем на примере гидравлического привода рассмотрены вопросы организации управления и экспериментальной проверки его работы. С целью формирования практических рекомендаций была разработана структурная схема, которая позволяет исследовать гидравлический привод, определить его нелинейные свойства и осуществить идентификацию, синтезировать корректирующие устройства и провести моделирование и экспериментальную проверку работы системы управления.

**Структурная схема для исследования гидропривода.** Для экспериментальных исследований гидропривода разработана структурная схема (рис. 1), которая содержит задающее устройство (ЗУ); контролирующее устройство (КУ); цифровой пропорциональный гидрораспределитель (ЦПГР) типа D1FB; исполнительный механизм (ИМ), представляющий собой гидроцилиндр-домкрат (объем поршневой полости 8,64 л, объем штоковой полости 3,11 л, максимальная длина выдвижения штока 1,1 м); нагрузку (Н), в качестве которой выступают опорная платформа с установленным на ней оборудованием; цифровой датчик положения (ЦДП) типа BTL5 штока цилиндра и насосную станцию (НС). В качестве ЗУ и КУ использован персональный компьютер (ПК) со специальным программным обеспечением (СПО). ИМ (гидроцилиндр-домкрат) может работать в диапазоне перемещений 30–1100 мм, что соответствует изменению выходного цифрового сигнала  $y$ , снимаемого с ЦДП, в пределах 3000–110 000 делений (далее – дел). Величину входного цифрового сигнала  $x$  можно изменять в диапазоне  $\pm 16 000$  дел.

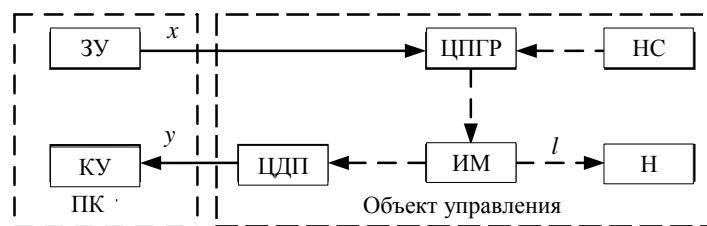


Рис. 1. Структурная схема исследования гидропривода

Элементы ЦПГР, ИМ, НС, Н и ЦДП образуют объект управления (ОУ), который имеет цифровые вход и выход. Такое построение схемы позволяет с помощью ПК управлять работой ОУ. Используя ЦДП, можно контролировать положение штока цилиндра и определять различные характеристики, необходимые для организации управления гидроприводом.

**Снятие и построение регулировочной характеристики.** Для снятия регулировочной характеристики (РХ) использованы разработанные ранее [7–9] алгоритмы и программы в среде C++ Builder 6. На вход ОУ подавались ступенчатые сигналы  $x_i$  с равномерно изменяемой амплитудой 1000–16 000 дел и шагом 1000 дел в соответствии с ранее разработанной и проверенной методикой [7–9]. РХ снимались для двух рабочих состояний опорного агрегата: разгруженного и нагруженного. При этом определялись установившиеся значения скорости  $\dot{y}_i$ , дел/с, и вычислялся коэффициент преобразования  $k_i = \dot{y}_i/x_i$ ,  $c^{-1}$  (табл. 1).

Таблица 1

Результаты определения установившейся скорости и коэффициента преобразования ОУ

$x_i^+$ , дел	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
$\dot{y}_{\text{разр}}^+$ , дел/с	–	260	341	601	721	1042	1202	1603
$k_{\text{разр}}^+$ , $c^{-1}$	–	0,13	0,1137	0,1503	0,1442	0,1737	0,1717	0,2004
$\dot{y}_{\text{нагр}}^+$ , дел/с	–	288	360	648	863	1367	1583	2230
$k_{\text{нагр}}^+$ , $c^{-1}$	–	0,144	0,12	0,162	0,1726	1367	0,2278	0,2786
$x_i^+$ , дел	9000	10 000	11 000	12 000	13 000	14 000	15 000	16 000
$\dot{y}_{\text{разр}}^+$ , дел/с	1864	2245	2665	3166	3467	4028	4249	4609

Окончание табл. 1

$k_{\text{разр}}^+$ , $\text{с}^{-1}$	0,2071	0,2245	0,2423	0,2638	0,2667	0,2877	0,2833	0,2881
$\dot{y}_{\text{нагр}}^+$ , дел/с	2446	3022	3381	3813	4173	4460	4604	4389
$k_{\text{нагр}}^+$ , $\text{с}^{-1}$	0,2718	0,3022	0,3074	0,3178	0,321	0,3186	0,3069	0,2743
$x_i^-$ , дел	-1000	-2000	-3000	-4000	-5000	-6000	-7000	-8000
$\dot{y}_{\text{разр}}^-$ , дел/с	–	-361	-601	-721	-1042	-1222	-1643	-2004
$k_{\text{разр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	–	0,1805	0,2003	0,1803	0,2084	0,2037	0,2347	0,2505
$\dot{y}_{\text{нагр}}^-$ , дел/с	–	-504	-863	-1151	-1655	-2086	-2878	-3381
$k_{\text{нагр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	–	0,252	0,2877	0,2878	0,331	0,3477	0,4111	0,4226
$x_i^-$ , дел	-9000	-10 000	-11 000	-12 000	-13 000	-14 000	-15 000	-16 000
$\dot{y}_{\text{разр}}^-$ , дел/с	-2545	-2886	-3487	-3707	-4208	-4449	-4890	-5030
$k_{\text{разр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	0,2828	0,2886	0,317	0,3089	0,3237	0,3178	0,326	0,3144
$\dot{y}_{\text{нагр}}^-$ , дел/с	-4532	-5396	-6691	-7050	-8705	-9425	-9784	-9568
$k_{\text{нагр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	0,5036	0,5396	0,6083	0,5875	0,6696	0,6732	0,6523	0,598

С помощью табл. 1 для различных состояний опорных агрегатов были построены РХ, которые показаны на рис. 2.

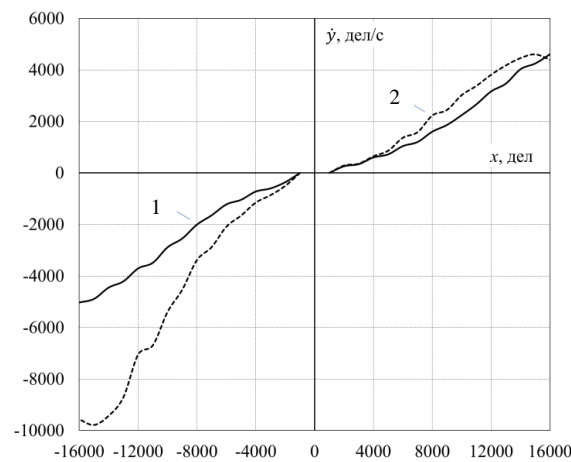


Рис. 2. Регулировочные характеристики для различных состояний ОУ:  
1 – разгруженного, 2 – нагруженного

Отсутствие выходного сигнала при входном сигнале  $x_i = \pm 1000$  дел отражает наличие в гидроприводе нелинейности типа «зона нечувствительности». РХ гидравлического агрегата нелинейны, что свидетельствует о непостоянстве коэффициента преобразования, который изменяется в пределах  $0,1137\text{--}0,3237 \text{ с}^{-1}$  (2,85 раза) для разгруженного состояния и в пределах  $0,12\text{--}0,6732 \text{ с}^{-1}$  (5,61 раза) для нагруженного. Здесь и далее оценка проводилась в диапазоне изменений входного сигнала  $x_i = \pm(3000\text{--}16\ 000)$  дел. В разгруженном состоянии опорного агрегата РХ практически симметрична, в нагруженном состоянии несимметрична и имеет нелинейность типа «зона насыщения», которая проявляется при входном сигнале  $x_i > 15\ 000$  дел и  $x_i < -15\ 000$  дел. Сильная зависимость коэффициента передачи от состояния опорного агрегата требует применения предварительной коррекции. Одним из способов коррекции является реализация принципа подчиненного регулирования [10], суть которого заключается в создании дополнительных контуров регулирования и проведении настройки (коррекции) отдельных контуров, продвигаясь от внутреннего контура к внешнему.

**Реализация принципа подчиненного регулирования.** Для реализации принципа подчиненного регулирования экспериментальная схема (см. рис. 1) была преобразована в схему, представленную на рис. 3.

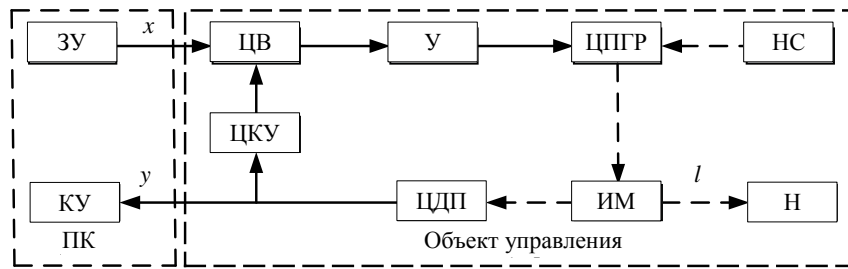


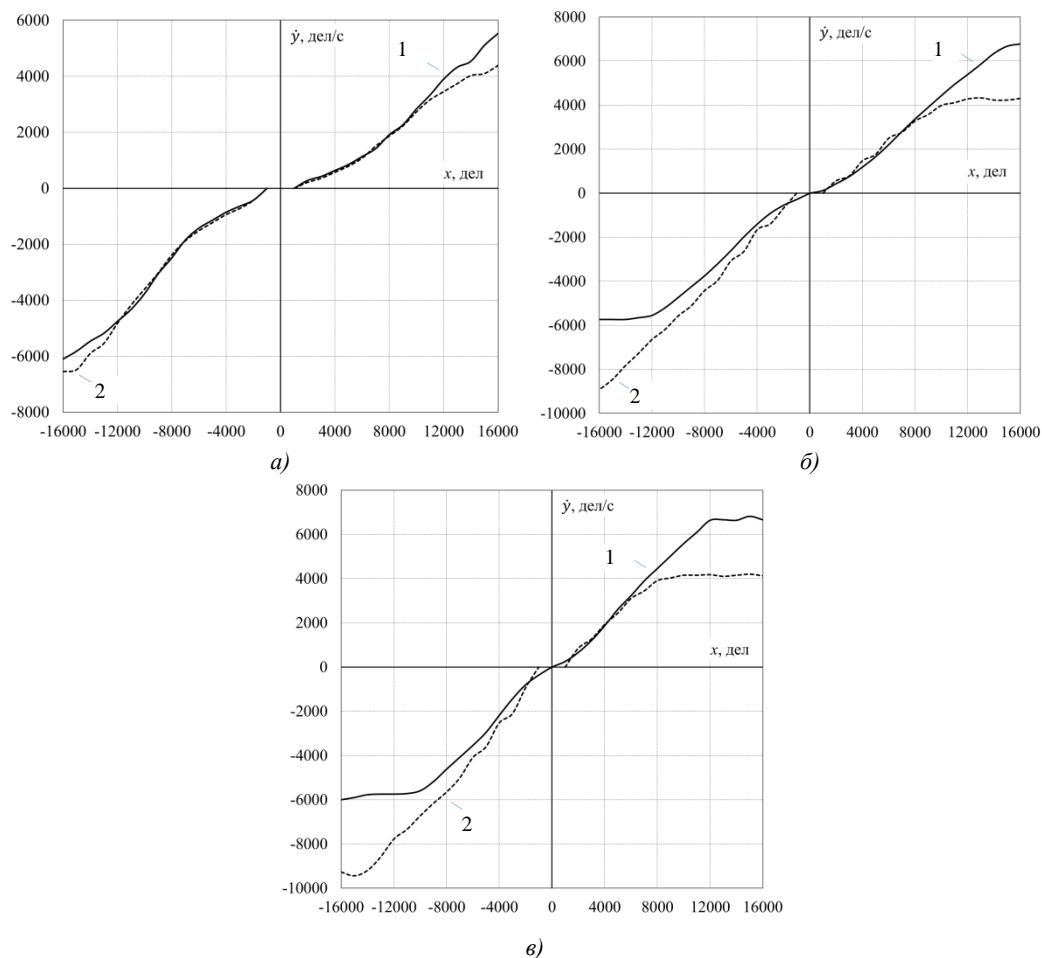
Рис. 3. Преобразованная структурная схема исследования гидропривода

Преобразованная схема в отличие от схемы на рис. 1 дополнительно содержит цифровой вычитатель (ЦВ), цифровое корректирующее устройство (ЦКУ) и усилитель (У), которые отнесены к ОУ. ОУ является замкнутым по скорости и содержит в цепи обратной связи ЦКУ в виде цифрового дифференцирующего звена первого порядка с передаточной функцией [11]:

$$W_1(z) = \frac{1 - z^{-1}}{h}, \quad (1)$$

где  $h$  – период дискретности,  $h = 0,01$  с.

В прямую цепь ОУ включен усилитель с коэффициентом усиления  $K$ , подбираемым при настройке. С помощью преобразованной схемы, как и ранее, снимались и строились РХ опорного агрегата для разгруженного и нагруженного состояний. Результаты экспериментальных исследований при различных значениях коэффициента усиления  $K$  показаны на рис. 4.

Рис. 4. Регулировочные характеристики для разгруженного (1) и нагруженного (2) состояний ОУ при различных значениях коэффициента усиления: а)  $K = 1$ ; б)  $K = 2$ ; в)  $K = 3$

На рис. 4, а видно, что при значении  $K = 1$  РХ остаются нелинейными, но поведение ОУ в разгруженном и нагруженном состояниях опорного агрегата практически одинаково. При значении  $K = 3$  на РХ появляется ярко выраженная зона нечувствительности (рис. 4, в), что приводит к уменьшению диапазона линейного регулирования (линейного участка РХ) и появлению значительных переколебаний при подаче ступенчатых входных воздействий. При  $K = 2$  РХ (рис. 4, б) обладает лучшей линейностью и меньшей зоной нечувствительности, поведение ОУ в разгруженном и нагруженном состояниях имеет схожий характер, а переколебания отсутствуют. Поэтому в дальнейшем использована РХ (рис. 4, б), а для идентификации ОУ выбрана амплитуда тестовых сигналов  $x_i = \pm 8000$  дел, которая соответствует линейной зоне РХ для различных состояний. Результаты, полученные при снятии параметров РХ для двух рабочих состояний опорного агрегата (разгруженного и нагруженного), для случая на рис. 4, б представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения установившейся скорости и коэффициента преобразования ОУ при реализации принципа подчиненного управления

$x_i^+$ , дел	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
$\dot{y}_{\text{разгр}}^+$ , дел/с	122	429	755	1184	1653	2204	2796	3367
$k_{\text{разгр}}^+$ , $\text{с}^{-1}$	0,122	0,2145	0,2517	0,296	0,3306	0,3673	0,3994	0,4209
$\dot{y}_{\text{нагр}}^+$ , дел/с	–	562	782	1467	1760	2494	2763	3276
$k_{\text{нагр}}^+$ , $\text{с}^{-1}$	–	0,281	0,2607	0,3668	0,352	0,4157	0,3947	0,4096
$x_i^-$ , дел	9000	10 000	11 000	12 000	13 000	14 000	15 000	16 000
$\dot{y}_{\text{разгр}}^-$ , дел/с	3898	4429	4939	5388	5857	6347	6673	6776
$k_{\text{разгр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	0,4331	0,4429	0,449	0,449	0,4505	0,4534	0,4489	0,4235
$\dot{y}_{\text{нагр}}^-$ , дел/с	3570	3985	4108	4279	4328	4230	4230	4303
$k_{\text{нагр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	0,3967	0,3985	0,3735	0,3566	0,3329	0,3021	0,282	0,2689
$x_i^-$ , дел	–1000	–2000	–3000	–4000	–5000	–6000	–7000	–8000
$\dot{y}_{\text{разгр}}^-$ , дел/с	–286	–551	–918	–1408	–1980	–2612	–3204	–3755
$k_{\text{разгр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	0,286	0,2755	0,306	0,352	0,396	0,4553	0,4577	0,4694
$\dot{y}_{\text{нагр}}^-$ , дел/с	–	–685	–1394	–1663	–2641	–3081	–3961	–4425
$k_{\text{нагр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	–	0,3425	0,4647	0,4158	0,5282	0,5135	0,5659	0,5531
$x_i^-$ , дел	–9000	–10 000	–11 000	–12 000	–13 000	–14 000	–15 000	–16 000
$\dot{y}_{\text{разгр}}^-$ , дел/с	–4245	–4735	–5204	–5551	–5653	–5735	–5735	–5735
$k_{\text{разгр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	0,4717	0,4735	0,4731	0,4626	0,4349	0,4096	0,3823	0,3584
$\dot{y}_{\text{нагр}}^-$ , дел/с	–5110	–5575	–6186	–6650	–7262	–7824	–8460	–8924
$k_{\text{нагр}}^-$ , $\text{с}^{-1}$	0,5678	0,5575	0,5624	0,5542	0,5586	0,5589	0,564	0,5578

РХ гидравлического агрегата (рис. 4, б) имеют лучшую линейность, что свидетельствует о постоянстве коэффициента передачи, который изменяется в более узких пределах:  $0,2517\text{--}0,4735 \text{ с}^{-1}$  (1,88 раза) для разгруженного состояния и  $0,2607\text{--}0,5678 \text{ с}^{-1}$  (2,18 раза) для нагруженного, что значительно лучше (1,52–2,57 раза) предыдущих результатов.

С помощью табл. 2 определены амплитуды насыщения выходного сигнала:  $\dot{y}_{\text{разгр}}^+ = 6776$  дел/с,  $\dot{y}_{\text{разгр}}^- = -5735$  дел/с,  $\dot{y}_{\text{нагр}}^+ = 4303$  дел/с,  $\dot{y}_{\text{нагр}}^- = -8924$  дел/с.

Для определения «зоны нечувствительности» аппроксимируем закон изменения РХ линейной зависимостью для разгруженного состояния в виде  $\dot{y}_{\text{разгр}}^+ = K_1^+ x_i + b_1$ , где

$$K_1^+ = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{755 - 122}{3000 - 1000} = 0,3165 \text{ с}^{-1}, \quad b_1 = \dot{y}_{\text{разгр}}^+ - K_1^+ x_i = 755 - 0,3165 \cdot 3000 = -195 \text{ дел/с}; \quad \dot{y}_{\text{разгр}}^- =$$

$$= K_1^- x_i + b_2 \quad (\text{где} \quad K_1^- = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{918 - 286}{3000 - 1000} = 0,316 \text{ с}^{-1}, \quad b_2 = \dot{y}_{\text{разгр}}^- - K_1^- x_i = -918 + 0,316 \cdot 3000 =$$

$$= 30 \text{ дел/с}). \text{ Из условия } \dot{y}_{\text{разгр}}^{\pm} = 0 \text{ вычислим «зоны нечувствительности»}: x_{\text{н}}^+ = -b_1 / K_1^+ =$$

$$= 195 / 0,3165 = 616 \text{ дел}, \quad x_{\text{н}}^- = -b_2 / K_1^- = -30 / 0,316 = -95 \text{ дел}.$$

Аналогичным образом поступим и для нагруженного состояния:  $\dot{y}_{\text{нагр}} = K_1^+ x_i + b_1$ ,

$$K_1^+ = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1467 - 562}{4000 - 2000} = 0,4525 \text{ с}^{-1}, \quad b_1 = \dot{y}_{\text{разгр}}^+ - K_1^+ x_i = 1467 - 0,4525 \cdot 4000 = -343 \text{ дел/с}, \quad x_{\text{н}}^+ = -b_1 /$$

$$/ K_1^+ = 343 / 0,4525 = 758 \text{ дел}; \quad \dot{y}_{\text{разгр}}^- = K_1^- x_i + b_2, \quad K_1^- = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1663 - 685}{4000 - 2000} = 0,489 \text{ с}^{-1}, \quad b_2 = \dot{y}_{\text{разгр}}^- -$$

$$- K_1^- x_i = -1663 + 0,489 \cdot 4000 = 293 \text{ дел/с}, \quad x_{\text{н}}^- = -b_2 / K_1^- = -293 / 0,489 = -599 \text{ дел}.$$

Для определения «зоны нечувствительности» использованы три начальных значения из табл. 2.

**Снятие и построение логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик.** Для снятия логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАФЧХ) для нагруженного состояния использован комбинированный метод, состоящий из авторского и классического методов [6–10], с ранее выбранной амплитудой  $U_i = \pm 8000$  дел тестовых сигналов. Применяя авторский метод (с программным изменением координат точек реверсирования), удалось использовать входные сигналы в виде меандра  $x_i = U_i \text{sign}(\sin(\omega t))$  только в диапазоне частот 2,1–6 рад/с. Применяя классический метод [12], удалось использовать синусоидальные тестовые сигналы  $x_i = U_i \sin(\omega t)$  высокой частоты 10–60 рад/с. Авторский метод позволил определить поведение ОУ на низких частотах без угрозы повреждения опорных агрегатов в нагруженном состоянии. При этом диапазон переключения (координаты точек реверсирования) был выбран  $l_y = \pm 50$  мм. Для классического метода частоты выбраны с учетом отсутствия «уходов» координат в процессе тестирования. Симметричность РХ в разгруженном состоянии опорного агрегата позволила снять ЛАФЧХ классическим методом в диапазоне рабочих частот 1–60 рад/с.

Формирование входных сигналов, определение параметров первых гармоник входного и выходного сигналов (для сигналов в виде меандра), а также построение ЛАФЧХ осуществлялись с помощью СПО, разработанного в среде MATLAB [6–10]. ЛАФЧХ, снятые различными методами при амплитуде входного сигнала  $U_i = \pm 8000$  дел и  $K = 2$ , приведены на рис. 5.

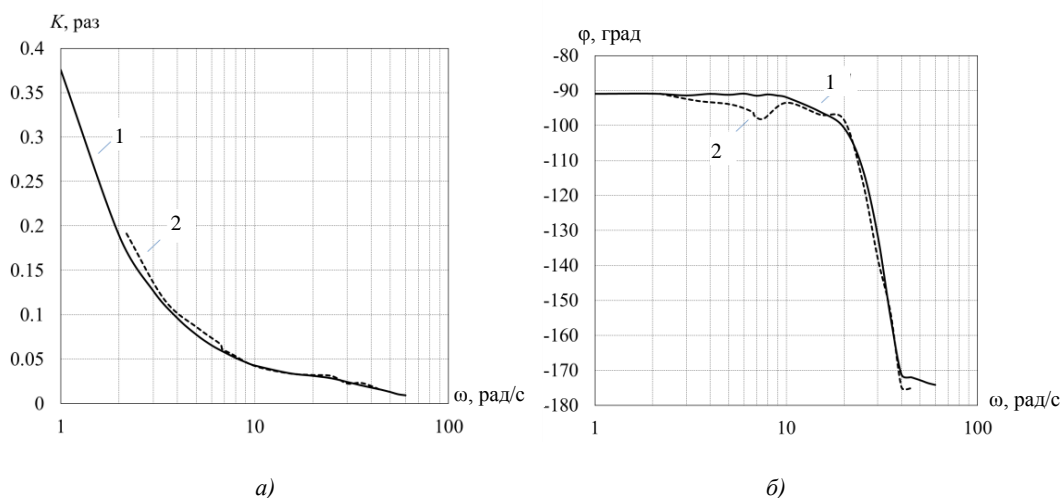


Рис. 5. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б), снятые различными методами: 1 – классическим для разгруженного состояния, 2 – комбинированным для нагруженного состояния

Характеристики, снятые различными методами для разных состояний опорных агрегатов (разгруженного и нагруженного), практически совпадают. Это свидетельствует о том, что при таком построении системы управления гидроприводом его характеристики несущественно зависят от рабочего состояния.

**Определение передаточной функции гидропривода.** С использованием методик [13–15] по результирующей ЛАФЧХ (полученной при амплитуде входного сигнала  $U_i = \pm 8000$  дел и  $K = 2$ ) проведена идентификация исследуемого гидропривода и определена его передаточная функция:

$$G(z) = \frac{k(T_2 s + 1)e^{-0,03s}}{s(T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1)}, \quad (2)$$

где  $k = 0,37$  дел/с,  $T_1 = 0,03$  с,  $\xi = 0,7$ ,  $T_2 = 0,08$  с.

ОУ (2) является астатическим, содержит колебательное и форсирующее звенья и имеет запаздывание. Передаточная функция (2) позволяет синтезировать различные корректирующие устройства и оценивать качество их работы в составе следящей системы.

**Синтез корректирующего устройства для системы управления гидроприводом.** Для обеспечения требуемых динамических свойств системы управления гидроприводом можно использовать различные типы корректирующих устройств (регуляторов) [16–18]: цифровые ПИД-регуляторы, оптимальные по быстродействию цифровые регуляторы, цифровые регуляторы на основе нечеткой логики функционирования, цифровые регуляторы в цепи гибкой обратной связи и др. С учетом того что передаточная функция (2) гидропривода содержит форсирующее звено, которое ограничивает применение известных корректирующих устройств, использован метод придания одноконтурной замкнутой системе автоматического управления требуемых фильтрующих свойств [19]. Суть метода состоит в применении специального ЦКУ, которое формирует требуемую полосу пропускания и показатели качества работы системы управления гидроприводом. Для определения передаточной функции ЦКУ в аналоговом виде  $W(s)$  необходимо использовать выражение

$$W(s) = \frac{F(s)}{G(s)[1 - F(s)]}, \quad (3)$$

где  $G(s)$  – передаточная функция ОУ,  $F(s)$  – передаточная функция эталонного фильтра низкой частоты (ФНЧ).

Для гидропривода (2) использован ФНЧ ( $F(s) = \frac{1}{(Ts+1)^3}$ ,  $T = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{1}{N^2} - 1}$ ,  $\omega = 16$  с<sup>-1</sup>,  $N = 0,890899$ ) и определена передаточная функции КУ в аналоговом виде:

$$W(s) = V_0 \frac{s^2 + c_1 s + c_2}{s^3 + d_1 s^2 + d_2 s + d_3}, \quad (4)$$

где  $V_0 = 939,8327$ ,  $c_1 = 46,6667$ ,  $c_2 = 1111,1111$ ,  $d_1 = 106,6502$ ,  $d_2 = 4131,6297$ ,  $d_3 = 36\,934,4055$ .

Применяя к выражению (4) билинейную аппроксимацию [20], т. е. преобразование Тастина (Tustin),  $s \approx \frac{2}{h} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$ , где  $h$  – шаг квантования ( $h = 0,01$  с), получим передаточную функцию ЦКУ:

$$W(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}}, \quad (5)$$

где  $K_0 = 3,6110$ ,  $b_1 = -0,5419$ ,  $b_2 = -0,9119$ ,  $b_3 = 0,63$ ,  $a_1 = -2,0815$ ,  $a_2 = 1,4486$ ,  $a_3 = -0,3445$ .

Синтез ЦКУ осуществлен без учета времени запаздывания гидропривода. Полученные результаты нужно проверить путем моделирования и экспериментально.

**Моделирование работы системы управления гидроприводом.** Для проверки работы системы управления гидроприводом были составлены схемы моделирования в среде Simulink пакета программ MATLAB [21–23] (рис. 6).

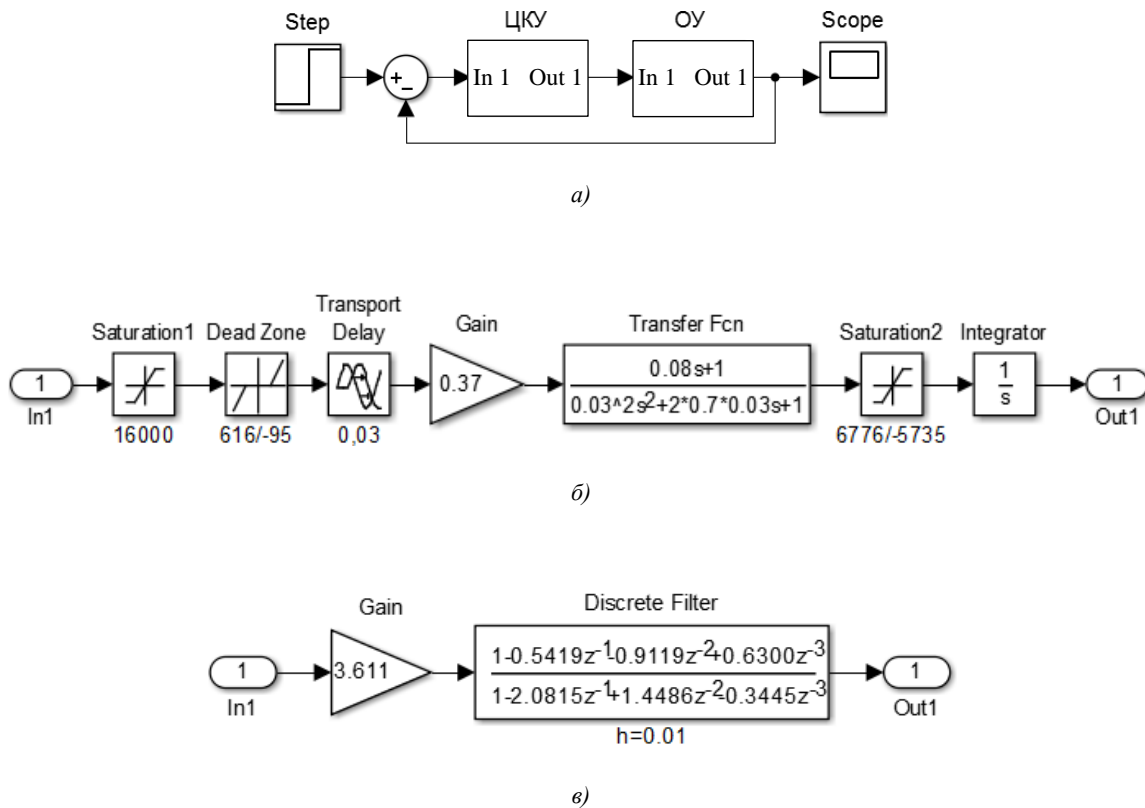


Рис. 6. Схемы моделирования: а) системы управления; б) гидропривода; в) цифрового корректирующего устройства

Система управления (рис. 6, а) содержит модели ЦКУ и ОУ (гидропривода). Схема модели гидропривода (рис. 6, б) представлена блоками Gain и Transfer Fcn для реализации выражения (2); блоком Saturation для реализации нелинейности типа «зона насыщения» с параметрами  $u = \pm 16\ 000$  дел,  $v = 6776/-5735$  дел/с для разгруженного и  $v = 4303/-8924$  дел/с для нагруженного состояний; блоком Dead Zone для реализации нелинейности типа «зона нечувствительности» с параметрами  $u = 616/-95$  дел для разгруженного и  $u = 758/-599$  дел для нагруженного состояний. Схема ЦКУ (рис. 6, в) реализована с помощью блоков Gain и Discrete Filter с параметрами из выражения (5). В качестве источника входных воздействий использован генератор ступенчатого сигнала Step.

Моделирование и оценка качества работы системы управления гидроприводом осуществлены для ступенчатых  $x_i = U_i$  входных воздействий различной амплитуды ( $U_1 = \pm 100$  дел,  $U_2 = \pm 1000$  дел,  $U_3 = \pm 10\ 000$  дел) и совмещены с экспериментальной проверкой.

**Экспериментальная проверка работы системы управления гидроприводом.** Экспериментальная проверка работы системы управления гидроприводом проведена в составе реальной системы подъема и горизонтирования. Результаты отработки ступенчатых воздействий различной амплитуды для разных состояний (разгруженного и нагруженного) представлены на рис. 7.



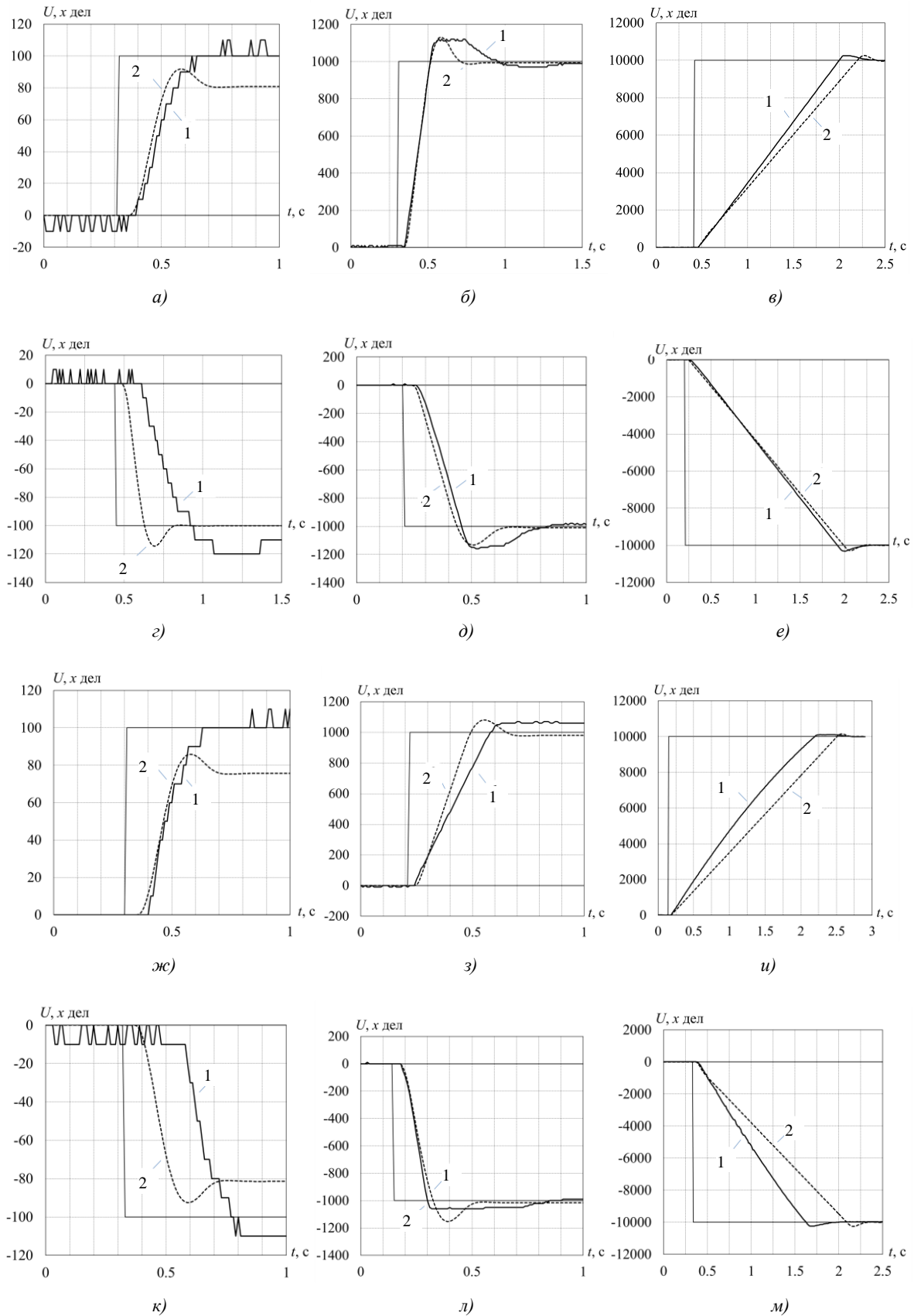


Рис. 7. Обработка ступенчатых воздействий (1 – объекта, 2 – модели) различной амплитуды: а), ж)  $U_1 = 100$  дел; г), к)  $U_1 = -100$  дел; б), з)  $U_2 = 1000$  дел; д), л)  $U_2 = -1000$  дел; в), и)  $U_3 = 10\,000$  дел; е), м)  $U_3 = -10\,000$  дел – и для различных состояний: а)–е) разгруженного; ж)–м) нагруженного

Переходные процессы (рис. 7) при отработке ступенчатых воздействий различной амплитуды имеют близко аperiodический вид.

По результатам моделирования и экспериментальной проверки определены параметры переходных характеристик (табл. 3). Время установления  $T_y$  переходного процесса зафиксировано при достижении уровня установившегося значения.

Таблица 3

Параметры переходных характеристик

$U_i$ , дел	Выходная величина, дел		Амплитуда переколебания, дел		Время $T_y$ , с	
	Модель	Объект	Модель	Объект	Модель	Объект
<i>Разгруженное состояние</i>						
100	80	110	12	0	0,2	0,3
-100	-100	-110	14	10	0,18	0,47
1000	993	990	138	130	0,205	0,21
-1000	-1010	-980	123	180	0,23	0,25
10 000	9986	9990	277	260	1,8	1,6
-10 000	-10 005	-9990	272	320	1,78	1,71
<i>Нагруженное состояние</i>						
100	76	110	10	0	0,2	0,3
-100	-81	-110	11	0	0,2	0,48
1000	980	1000	100	70	0,28	0,36
-1000	-1016	-990	137	70	0,19	0,17
10 000	10 007	9990	136	110	2,36	2,05
-10 000	-10 013	-9970	250	280	1,75	1,3

Анализируя данные табл. 3, можно сделать следующие выводы. Отработка сигналов малой амплитуды ( $U_1 = \pm 100$  дел) осуществляется со статической ошибкой не более 24 дел, что составляет 24 % задающего воздействия. Амплитуда переколебаний не превышает 14 дел, что составляет 14 % установившегося значения и существенного влияния на точность горизонтирования не оказывает. Наблюдается значительное расхождение (1,5–2,6 раза) времени установления модели и объекта при малых значениях амплитуды и незначительное расхождение (1,12–1,35 раза) при средних ( $U_2 = \pm 1000$  дел) и больших ( $U_3 = \pm 10 000$  дел) значениях амплитуды входных сигналов. Отработка сигналов средней и большой амплитуды ( $U_i \geq 1000$  дел и  $U_i \leq -1000$  дел) осуществляется со статической ошибкой не более 20 дел, что составляет менее 2 % задающего воздействия.

Следует заметить, что перемещению в 1 мм соответствует изменение снимаемого с ЦДП выходного цифрового сигнала, равное 100 дел, и реальная ошибка не превышает значения  $\Delta l = 0,25$  мм. С учетом базовых опорных расстояний ( $A = 5300$  мм,  $B = 4870$  мм) ошибка горизонтирования не превысит значение для продольного  $|\varphi_{пр}| \leq \arctg \frac{2\Delta l}{A} = 0,0055^\circ$  и поперечного

$$|\varphi_{п}| \leq \arctg \frac{2\Delta l}{B} = 0,0059^\circ \text{ углов наклона.}$$

С помощью данных рис. 7 проведена оценка совпадения результатов моделирования с работой реального привода (табл. 4).

Таблица 4

Оценка совпадения результатов моделирования с работой реального привода

Параметры	Разгруженное состояние						Нагруженное состояние					
	100	-100	-1000	-1000	10 000	-10 000	100	-100	1000	-1000	10 000	-10 000
$E$ , %	91,34	67,35	99,21	97,97	98,37	99,8	83,89	60,73	95,59	98,93	90,92	88,35

Оценка осуществлена с помощью критерия Нэша – Сатклифа (Nash – Sutcliffe) по формуле [24]

$$E = \left( 1 - \frac{\sum_i (Y_{Pi} - Y_{Mi})^2}{\sum_i (Y_{Pi} - Y_{CP})^2} \right) \times 100, \quad (6)$$

где  $Y_{Pi}$  и  $Y_{Mi}$  – реальные и модельные значения соответственно,  $Y_{CP}$  – среднее реальное значение.

Значение выражения (6) изменяется от 0 до 100 %, и чем оно больше, тем выше достоверность разработанной модели. Для оценки использованы данные, которые определены с временным шагом в 0,01 с на выбранном интервале времени. Так, например, при оценке совпадения отработки входного сигнала +100 дел (рис. 7, а) использован интервал времени 1 с и получено 100 отсчетов ( $i = 100$ ) для вычисления выражения (6). В этом случае  $Y_{CP}$  представляет собой сумму из 100 реальных значений, деленную на 100. В другом случае при оценке совпадения отработки входного сигнала –10 000 дел (рис. 7, е) выбран интервал времени 2,9 с и получено 290 отсчетов ( $i = 290$ ) для вычисления выражения (6). Тогда  $Y_{CP}$  представляет собой сумму из 290 реальных значений, деленную на 290. Различные временные интервалы для разных входных воздействий выбраны исходя из наличия установившегося значения модели и реального объекта до и после подачи входного воздействия. Согласно данным табл. 4 совпадение разработанной модели и реального ОУ высокое, что соответствует изменению коэффициента достоверности (6) в пределах 67,35–99,21 %.

**Заключение.** На примере гидропривода рассмотрены вопросы управления положением опорных агрегатов автоматической системы подъема и горизонтирования платформы. Для исследования гидропривода разработана экспериментальная схема, которая позволила выявить сильную зависимость коэффициента передачи (2,85–5,61 раза) от нагруженности опорного агрегата. Для снижения данной зависимости реализован принцип подчиненного регулирования с применением обратной связи по скорости, что позволило значительно уменьшить диапазон изменения коэффициента передачи (1,52–2,57 раза).

С использованием комбинированного метода (состоящего из авторского и классического методов) осуществлено снятие ЛАФЧХ в диапазонах частот 2,1–6 и 10–60 рад/с для нагруженного и 1–60 рад/с для разгруженного состояний опорных агрегатов. Наблюдается совпадение характеристик, снятых разными методами для различной нагруженности опорных агрегатов. С помощью полученных характеристик проведена идентификация и определены параметры передаточной функции гидропривода в виде астатического объекта, содержащего колебательное, форсирующее и запаздывающее звенья.

С учетом наличия в гидроприводе форсирующего звена применен численный метод придания одноконтурной замкнутой системе требуемых фильтрующих свойств и определена передаточная функция специального цифрового корректирующего устройства. Образованная система управления гидроприводом была проверена путем моделирования и экспериментально при отработке ступенчатых воздействий различной амплитуды. Отличия в точности отработки и амплитуде переколебаний не превышают 24 и 14 % соответственно. Наблюдается расхождение (1,5–2,6 раза) времени установления модели и реального гидропривода при малых амплитудах входных сигналов ( $U_1 \leq 100$  дел и  $U_1 \geq -100$  дел), которые не являются определяющими. С учетом базовых опорных расстояний ( $A = 5300$  мм,  $B = 4870$  мм) ошибки горизонтирования не превышают значений для продольного  $|\varphi_{np}| \leq 0,0055^\circ$  и поперечного  $|\varphi_n| \leq 0,0059^\circ$  углов наклона. Соответствие разработанной модели реальному гидроприводе оценено коэффициентом достоверности Нэша – Сатклифа, который изменялся в пределах 67,35–99,21 %.

## Список использованных источников

1. Способ ориентации установки несущей грузовой платформы и устройство для его осуществления : пат. (РФ) 2367762, E21B7/02, B66F7/20 / В. В. Артемов, Н. С. Говоров, С. Н. Говоров, Ю. В. Молокин, В. Ф. Хрипченко, Д. А. Чурзин. – Оpubл. 20.09.2009.
2. Способ автоматического горизонтирования несущей платформы с буровым агрегатом и устройство для его реализации : пат. (РФ) 2196893, МПК E21B44/00, E21B7/02 / И. А. Сидоров, В. Н. Чухлебов. – Оpubл. 20.01.2003.
3. Щербаков, В. С. Метод автоматического подъема, выравнивания опорной платформы строительной машины в горизонтальной плоскости и контроля отрыва выносных опор от грунта / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, М. Г. Григорьев // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1(13). – С. 146–154.
4. Aktives federungssystem : pat. DE 3408292 A1, B 60 G 17/00 / R. Schuessler, B. Acker. – 29.08.1985.
5. Verfahren und einrichtung zur aktiven regelung des aufhaengesystems eines fahrzeugaufbaus : pat. DE 4123706 A1, B 60 G 17/00, F 15 B 1/00 / E. Hees, U. Adler, M. Wagner, R. Zhang, J. Floerchinger. – 21.01.1993.
6. Стрижнев, А. Г. Способ автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы / А. Г. Стрижнев // Информатика. – 2017. – № 3(55). – С. 32–39.
7. Стрижнев, А. Г. Метод исследования нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат / А. Г. Стрижнев, А. А. Шихов, А. Н. Русакович // Информатика. – 2015. – № 3(47). – С. 81–89.
8. Стрижнев, А. Г. Исследование вентильного электропривода, работающего в заданном диапазоне значений выходных координат / А. Г. Стрижнев, А. А. Шихов, А. Н. Русакович // Электроника ИНФО. – 2015. – № 7. – С. 47–54.
9. Стрижнев, А. Г. Исследование электропривода с двухфазным асинхронным двигателем, работающего в заданном диапазоне выходных координат / А. Г. Стрижнев, А. А. Шихов, А. Н. Русакович // Новости науки и технологий. – 2015. – № 3(34). – С. 17–29.
10. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шкнянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
11. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С. Г. Герман-Галкин [и др.]. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
12. Пупков, К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления : в 5 т. / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – Т. 2 : Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. – 640 с.
13. Марков, А. В. Параметрическая идентификация динамических объектов по фазочастотным характеристикам / А. В. Марков, В. И. Симаньков // Доклады БГУИР. – 2015. – № 3(89). – С. 29–35.
14. Ljung, L. System Identification: Theory for the User / L. Ljung. – New Jersey : Prentice Hall, 1999. – 672 p.
15. Ljung, L. System Identification Toolbox: User's Guide / L. Ljung. – Natick : Mathworks, 2005. – 886 p.
16. Гостев, В. И. Синтез цифровых регуляторов систем автоматического управления параметрами теплоэнергетических объектов / В. И. Гостев, В. В. Крайнев, С. Н. Скуртов. – Киев : Радиоаматор, 2007. – 264 с.
17. Гостев, В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. – Киев : Радиоаматор, 2005. – 708 с.
18. Хаджинов, М. К. Система автоматизированного проектирования квазимодального регулятора / М. К. Хаджинов // Доклады БГУИР. – 2010. – № 8. – С. 33–37.
19. Стрижнев, А. Г. Метод придания одноконтурной замкнутой системе автоматического управления требуемых фильтрующих свойств / А. Г. Стрижнев // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 4 (12). – С. 31–37.
20. Гостев, В. И. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами : справочник / В. И. Гостев, В. К. Стеклов. – Киев : Радиоаматор, 1998. – 704 с.
21. Терехин, В. В. Основы моделирования в MATLAB : учеб. пособие в 2 ч. / В. В. Терехин. – Новокузнецк : Кузбассвузиздат, 2004. – Ч. 2 : Simulink. – 376 с.
22. Tewari, A. Modern Control Design with MATLAB and Simulink / A. Tewari. – Weinheim : Wiley, 2002. – 503 p.
23. Nuruzzaman, M. Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists / M. Nuruzzaman. – Bloomington : AuthorHouse, 2005. – 240 p.
24. Корсак, В. В. Моделирование переносов влаги и растворенных в ней веществ в почве : в 2 ч. / В. В. Корсак, В. Т. Морковин. – Саратов : СГТУ, 2008. – Ч. 1 : Методические указания к практическим занятиям. – 26 с.

## Reference

1. Artemov V. V., Govorov N. S., Govorov S. N., Molokin Ju. V., Hripchenko V. F., Churzin D. A. Sposob orientacii ustanovki nesushhej gruzovoj platformy i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. *The way of orientation of installation of a loading platform and the device for solving this issue*. Patent RF no. 2367762, E21B7/02, B66F7/20, 20.09.2009 (in Russian).
2. Sidorov I. A., Chuhlebov V. N. Sposob avtomaticheskogo gorizontirovaniya nesushhej platformy s burovym agregatom i ustrojstvo dlja ego realizacii. *The way of automatic levelling of a carrier platform with drilling unit and the device for solving this issue*. Patent RF no. 2196893, E21B44/00, E21B7/02, 20.01.2003 (in Russian).
3. Shherbakov V. S., Korytov M. S., Grigor'ev M. G. Metod avtomaticheskogo pod"ema, vyravnivaniya opornoj platformy stroitel'noj mashiny v gorizontal'noj ploskosti i kontrolja otryva vynosnyh opor ot grunta [The method of automatic rising and levelling of a support platform of a construction machine in horizontal plane and to control tearing of outriggers from the ground]. *Izvestija vuzov. Povolzhskij region. Tehniceskie nauki [Proceedings of Institutions of Higher Education. Volga Region. Technics]*, 2010, no. 1(13), pp. 146–154 (in Russian).

4. Schuessler R., Acker B. Aktivnaja podveska. *Active suspension*. Patent DE no. 3408292 A1, B 60 G 17/00, 29.08.1985 (in German).
5. Hees E., Adler U., Wagner M., Zhang R., Floerchinger J. Podveska podvizhnogo transporta. *Suspension of mobile transport*. Patent DE no. 4123706 A1, B 60 G 17/00, F 15 B 1/00, 21.01.1993 (in German).
6. Strizhnev A. G. Sposob avtomaticheskogo pod"ema i gorizontirovanija opornoj platformy [Method for automatic raising and levelling of support platform]. *Informatika [Informatics]*, 2017, no. 3(55), pp. 32–39 (in Russian).
7. Strizhnev A. G., Shihov A. A., Rusakovich A. N. Metod issledovanija nelinejnyh ob"ektov upravlenija, rabotajushhij v zadannom diapazone vyhodnyh koordinat [Method of investigation of nonlinear objects operating within specified range of output coordinates]. *Informatika [Informatics]*, 2015, no. 3(47), pp. 81–89 (in Russian).
8. Strizhnev A. G., Shihov A. A., Rusakovich A. N. Issledovanie ventil'nogo jelektroprivoda, rabotajushhego v zadannom diapazone znachenij vyhodnyh koordinat [The investigation of BLDC drive operating within specified range of output coordinates]. *Jelektronika INFO [Electronics INFO]*, 2015, no. 7, pp. 47–54 (in Russian).
9. Strizhnev A. G., Shihov A. A., Rusakovich A. N. Issledovanie jelektroprivoda s dvuhfaznym asinhronnym dvigatelem, rabotajushhego v zadannom diapazone vyhodnyh koordinat [Identification of two-phase induction motor drive within the specified range of output coordinates values]. *Novosti nauki i tehnologij [News of Science and Technologies]*, 2015, no. 3(34), pp. 17–29 (in Russian).
10. Eliseeva V. A. (ed.), Shknjanskij A. V. (ed.) Spravochnik po avtomatizirovannomu jelektroprivodu. *Automatic Electrical Drive Handbook*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
11. German-Galkin S. G., Lebedev V. D., Markov B. A., Chicherin N. I. Cifrovye jelektroprivody s tranzistornymi preobrazovateljami. *Digital Electrical Drives with Transistor Converters*. Leningrad, Jenergoatomizdat Publ., 1986, 248 p. (in Russian).
12. Pupkov K. A., Egupov N. D. Metody klassicheskoi i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. T. 2: Statisticheskaja dinamika i identifikacija sistem avtomaticheskogo upravlenija. *Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. T. 2: Statistical Dynamics and Identification of Automatic Control Systems*. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet im. N. Je. Bauman, 2004, 640 p. (in Russian).
13. Markov A. V., Siman'kov V. I. Parametricheskaja identifikacija dinamicheskij ob"ektov po fazochastotnym harakteristikam [Parametrical identification of dynamic objects by phase-frequency characteristics]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radiojelektroniki [Papers of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2015, no. 3(89), pp. 29–35 (in Russian).
14. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*. New Jersey, Prentice Hall, 1999, 672 p.
15. Ljung L. *System Identification Toolbox: User's Guide*. Natick, Mathworks, 2005, 886 p.
16. Gostev V. I., Krajnev V. V., Skurtov S. N. Sintez cifrovijh reguljatorov sistem avtomaticheskogo upravlenija parametrami teploenergeticheskij ob"ektov. *Synthesis of Digital Controllers of Automatic Control Systems for Parametric Controlling of Heat-and-Power Engineering Objects*. Kiev, Radioamator Publ., 2007, 264 p. (in Russian).
17. Gostev V. I. Sintez nechetkih reguljatorov sistem avtomaticheskogo upravlenija. *Synthesis of Fuzzy Logic Controllers of Automatic Control Systems*. Kiev, Radioamator Publ., 2005, 708 p. (in Russian).
18. Hadzhinov M. K. Sistema avtomatizirovannogo proektirovanija kvazimodal'nogo reguljatora [System of automated design of quasimodal controller]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radiojelektroniki [Papers of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2010, no. 8, pp. 33–37 (in Russian).
19. Strizhnev A. G. Metod pridaniija odnokonturnoj zamknutoj sisteme avtomaticheskogo upravlenija trebuemyh fil'trujushhijh svojstv [The method of imparting desired filtering properties for closed-loop control system]. *Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika [System Analysis and Applied Information Science]*, 2016, no. 4(12), pp. 31–37 (in Russian).
20. Gostev V. I. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija s cifrovymi reguljatorami. *Automatic Control Systems with Digital Controllers*. Kiev, Radioamator Publ., 1998, 704 p. (in Russian).
21. Terehin V. V. Osnovy modelirovanija v MATLAB. Chast 2. Simulink. *Basics of MATLAB Modelling. Part 2. Simulink*. Novokuzneck, Kuzbassvuzizdat, 2004, 376 p. (in Russian).
22. Tewari A. *Modern Control Design with MATLAB and Simulink*. Weinheim, Wiley, 2002, 503 p.
23. Nuruzzaman M. *Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists*. Bloomington, AuthorHouse, 2005, 240 p.
24. Korsak V. V., Morkovin V. T. Modelirovanie perenosov vlagi i rastvorenyh v nej veshhestv v pochve. Chast 1. Metodicheskie ukazanija k prakticheskim zanjatijam. *Modelling of Liquid Transference and Transference of Dissolved in Liquid Substances through the Soil. Part 1. Methodological Guidance for Practical Trainings*. Saratov, Saratovskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet im. Ju. A. Gagarina, 2008, 26 p. (in Russian).

### Информация об авторах

Стрижнев Александр Гаврилович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, НПО «ОКБ ТСП» (пр. Независимости, 115, 220114, Минск, Беларусь).

E-mail: strizhnev.ag@gmail.com

Шихов Алексей Александрович – ведущий инженер-конструктор, НПО «ОКБ ТСП» (пр. Независимости, 115, 220114, Минск, Беларусь).

E-mail: shihovalex@gmail.com

### Information about the authors

Alexander G. Strizhnev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Scientific Production Limited Liability Company "OKB TSP" (115, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Belarus).

E-mail: strizhnev.ag@gmail.com

Aleksey A. Shykhau – Lead Engineer, Scientific Production Limited Liability Company "OKB TSP" (115, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Belarus).

E-mail: shihovalex@gmail.com