

Новкунский Александр Вячеславович (Россия, г. Самара) – директор ООО «Нониус» (г. Самара ул. Гидротурбинная д. 13 e-mail: 8644372566@mail.ru).

Новкунский Алексей Александрович (Россия, г. Санкт-Петербург) – кандидат технических наук; Институт энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского политехнического университета (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: 9110957043@mail.ru).

Туманян Манасер Овсепович (Россия, г. Ростов-на-Дону) – зав. лабораторией кафедры ТЭСАО ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» (г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, e-mail: manastum@mail.ru).

Шулькин Леонид Прокофьевич (Россия, г. Ростов-на-Дону) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация, автоматизация и энергообеспечение строительства» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» (г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, e-mail: dmitrnd@yandex.ru).

Novkunsky Alexander Vyacheslavovich (Russian Federation, Samara) – director of LLC Nonius (Samara Gidroturbinnaya St. of of 13 e-mails: 8644372566@mail.ru).

Novkunsky Alexey Aleksandrovich (Russian Federation, St. Petersburg) – candidate of technical sciences; Institute of power and transport systems of the St. Petersburg polytechnical university (195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya St., 29, e-mail: 9110957043@mail.ru).

Tumanyan Manaser Ovsepevovich (Russian Federation, Rostov-on-Don) – manager laboratory of department of TESA O FGBOU VPO "Rostov state construction university" (Rostov-on-Don, Sotsialisticheskaya St., 162, e-mail: manastum@mail.ru).

Shchulkin Leonid Prokofyevich (Russia, Rostov-on-Don) – candidate of technical sciences, the associate professor "Mechanization, Automation and Power Supply of Construction" department FGBOU VPO "The Rostov state construction university" (Rostov-on-Don, Sotsialisticheskaya St., 162, e-mail: dmitrnd@yandex.ru).

УДК 621.879

### РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ ПРИВОДОМ ПОВОРОТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА

В.В. Савинкин<sup>1</sup>, В.Н. Кузнецова<sup>2</sup>, В.Г. Яковлев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан;

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «СибАДИ», г. Омск, Россия;

<sup>3</sup> Товарищество с ограниченной ответственностью «Мехколонна - 60», г. Петропавловск, Казахстан.

**Аннотация.** Технологические операции гидропривода одноковшового экскаватора осуществляются при высоких затратах энергии, большая доля которой приходится на преодоление сил сопротивления и перемещение собственных масс рабочего оборудования. При этом мощные гидравлические механизмы и рабочее оборудование испытывают циклически изменяющиеся нагрузки при выполнении технологических операций. В статье приводится описание разработанной системы управления энергоэффективным приводом поворотной платформы одноковшового экскаватора, предназначенной для регулирования и оптимального распределения сил и моментов сил между усилителем и гидромотором, что приводит к снижению энергонапряженности гидропривода как минимум в 1,2 раза.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, следящая система, алгоритм, силы сопротивления, кинематическая пара.

#### Введение

У большинства существующих экскаваторов поворотная платформа вращается посредством гидропривода, включающего в себя основные элементы:

гидронасос, гидродвигатель и гидрораспределительную систему. Особенностью работы гидропривода является непостоянство крутящего момента на валу приводной шестерни и момента

инерции, вызванные переходными режимами эксплуатации [1,2,3]. Непостоянный во времени момент инерции поворотной платформы создает две проблемы при работе экскаватора: 1) для оператора экскаватора было бы эргономичнее, если бы между положением рычага управления и скоростью разгона и торможения поворотной платформы была однозначная взаимосвязь, не зависящая от загруженности ковша и его местоположения (геометрии стрелы), т.е. не зависящая от момента инерции поворотной платформы. В настоящее время это задача не решена; 2) в некоторых, особо критических случаях большой момент инерции поворотной платформы может привести к недопустимо большому крутящему моменту на валу гидродвигателя привода поворотной платформы. Для недопущения разрушения зубчатой передачи в этой ситуации предусмотрен предохранительный перепускной клапан, ограничивающий максимальный перепад давления потока рабочей жидкости на гидродвигателе и соответственно максимальный крутящий момент [3]. При срабатывании предохранительного клапана понижается скорость разгона и торможения поворотной платформы, снижается энергоэффективность работы гидропривода и долговечность нагруженных элементов в целом.

### **Результаты теоретических и практических исследований**

Для устранения этих двух недостатков и повышения энергоэффективности экскаватора предложено гибридизировать гидропривод поворотной платформы автоматизированным электроприводом на основе двигателя постоянного тока (ДПТ), на валу которого будет собственное зубчатое колесо, способное передавать зубчатому венцу поворотной платформы максимальный крутящий момент, близкий или равный крутящему моменту гидропривода. При разгоне поворотной платформы питание ДПТ будет осуществляться от аккумуляторных батарей, напряжением 24 В, питающих бортовую электросеть экскаватора. При

торможении ДПТ будет переключаться в режим рекуперации, т.е. режим генератора постоянного тока (ГПТ) и заряжать аккумуляторные батареи.

Автоматизированный электропривод позволит повысить эффективность использования гидропривода и компенсировать изменение момента инерции поворотной платформы экскаватора [4,5]. Теоретически целесообразно создать систему управления по возмущению, которая будет полностью компенсировать изменение момента инерции поворотной платформы. Однако фактически это, во-первых, потребовало бы дополнительно установить датчик загрузки ковша и датчики положения на все плечи стрелы экскаватора для расчета расстояния от центра масс ковша до оси вращения поворотной платформы при разработке как талых, так и мерзлых грунтов [6]; во-вторых, невозможно было бы учесть остальные факторы, влияющие на крутящий момент привода поворотной платформы (например, такие факторы, как механическое трение в приводе поворотной платформы и вязкое трение в случае движения ковша в жидкой среде) [7]. Кроме того, на скорость разгона и торможения поворотной платформы может влиять и переменная ветровая нагрузка, с трудом поддающаяся расчету и компенсации.

Угловое ускорение поворотной платформы при переходных режимах (разгон и торможение) должно однозначно определяться положением рычага управления золотниковым устройством гидропривода и углом поворота от момента начала разгона (торможения) при значении момента инерции поворотной платформы, составляющем от 50 до 150 % критического. Критическим считается такой момент инерции, при котором срабатывает предохранительный перепускной клапан гидропривода в момент начала разгона. Для реализации вышеуказанной цели управления необходимо контролировать и регулировать ряд параметров (табл. 1) [7].

## ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 1 – Контролируемые параметры САУ приводом поворотной платформы экскаватора

Наименование параметра, место отбора измерительного импульса	Заданное значение параметра	Визуализация информации				Регулирование	Наименование регулирующего воздействия, место установки регулирующего органа	Вид среды в местах установки			
		показание	регистрация	суммирование	сигнализация			датчиков		регулирующих органов	
								агрессивная	пожаро- и взрывоопасная	агрессивная	пожаро- и взрывоопасная
Крутящий момент на валу гидродвигателя (разность давлений на входе и выходе гидродвигателя)	$0 \div 18 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ( $0 \div 4,6 \pm 0,1 \text{ МПа}$ )	+	+	-	-	+	Изменение крутящего момента на валу двигателя постоянного тока	Нет	Да	Нет	Да
Угловое ускорение поворотной платформы экскаватора при разгоне	$0 \div 0,6 \pm 0,03 \text{ рад/с}^2$	+	+	-	-	+	Изменение крутящего момента на валу двигателя постоянного тока	Нет	Да	Нет	Да
Угловое ускорение поворотной платформы экскаватора при торможении	$0 \div 0,76 \pm 0,03 \text{ рад/с}^2$	+	+	-	-	+	Изменение крутящего момента на валу двигателя постоянного тока в режиме рекуперативного торможения	Нет	Да	Нет	Да
Угловая скорость поворотной платформы экскаватора в период движения между разгоном и торможением	$0 \div 1,7 \pm 0,1 \text{ рад/с}$	+	+	-	-	+	Изменение крутящего момента на валу двигателя постоянного тока	Нет	Да	Нет	Да
Состояние предохранительного перепускного клапана	Срабатывает при давлении более 17 МПа	-	+	-	-	+	-	Нет	Да	Нет	Да

Для создания системы автоматического управления приводом поворотной платформы экскаватора применим программируемый логический контроллер (ПЛК). Данный контроллер предназначен для сбора, обработки информации, формирования (ФНУ, ФИУ), усиления (УР), сравнения (УС) и распределения импульсов (РИ), реализации функции контроля, программного управления, регулирования, противоаварийных защит и блокировок и может работать как автономное устройство

управления. Кроме того, возможно его использование в качестве локального устройства управления в составе сложной распределенной системы управления [7].

Информация о значениях всех регулируемых и контролируемых параметров поступает на панель приборов экскаватора. При этом информация о текущем состоянии привода поворотной платформы и значениях регулируемых и контролируемых параметров может отображаться на видеотерминале (дисплее ПЭВМ), а наиболее важная

информация может выводиться на регистрирующее устройство. Поступающая на панель приборов (или дисплей ПЭВМ) информация используется оператором при управлении поворотной платформой экскаватора.

Следующий этап решения задачи автоматизации – определение контуров регулирования и контроля. На основе анализа параметров и характеристик привода поворотной платформы экскаватора как объекта управления выделены пять основных контуров регулирования и контроля, а также разработана функциональная схема автоматизации (рис. 1):

- 1-й контур – регулирование крутящего момента на валу гидродвигателя за счет изменения крутящего момента на валу двигателя постоянного тока. Данный контур обеспечивает разгон поворотной платформы экскаватора с заданным ускорением в диапазоне значений момента инерции поворотной платформы, составляющем от 50 до 150 % от критического за счет изменения крутящего момента на валу ДПТ (поз. 1 - 4).

При моменте инерции менее 50 % от критического значения поворотная платформа приводится в движение исключительно гидродвигателем (как при выключенной САУ). Если есть необходимость строго придерживаться заданного углового ускорения, то это может быть обеспечено переключением ДПТ (поз. 1 - 4) в режим рекуперативного торможения либо автоматической корректировкой пропускной способности дроссельного устройства управления расходом рабочей жидкости в гидродвигатель;

- 2-й контур – регулирование углового ускорения поворотной платформы экскаватора при разгоне за счет изменения крутящего момента на валу двигателя постоянного тока. Данный контур обеспечивает торможение поворотной платформы экскаватора с заданным ускорением в диапазоне значений момента инерции поворотной платформы, составляющем от 50 до 150 % критического, за счет изменения крутящего момента на валу ДПТ (поз. 1 - 4), переключенного в режим рекуперативного торможения.

При моменте инерции менее 50 % критического значения поворотная платформа тормозится исключительно гидродвигателем. При этом угловое

ускорение поворотной платформы (по модулю) может несколько превышать заданное значение, если это допустимо по технологическим и эргономическим требованиям. Информация с датчиков (поз. 2 - 1 и 2 - 2) поступает на аналоговые входы ПЛК. В ПЛК происходит интегрирование по времени сигнала с датчика (поз. 2 - 2) для расчета угла поворота поворотной платформы и дифференцирование по времени этого же сигнала для расчета углового ускорения поворотной платформы;

- 3-й контур – регулирование углового ускорения поворотной платформы экскаватора при торможении за счет изменения крутящего момента на валу двигателя постоянного тока. Угловая скорость поворотной платформы измеряется датчиком (поз. 2 - 2). Сигнал с датчика поступает на аналоговый вход ПЛК и используется в качестве сигнала обратной связи в системе автоматической стабилизации угловой скорости вращения поворотной платформы экскаватора в период движения между разгоном и торможением.

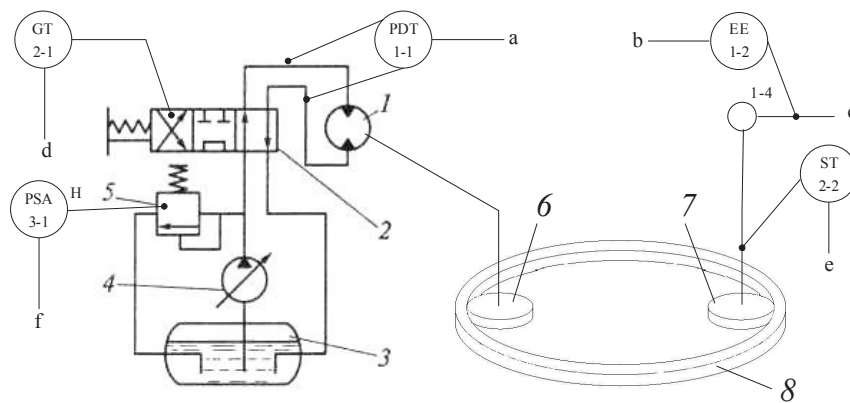
С выхода ПЛК по шине RS - 232 информация о текущем значении угловой скорости поступает на управляющую ПЭВМ и выводится на экран видеотерминала;

- 4-й контур – регулирование угловой скорости поворотной платформы экскаватора в период движения между разгоном и торможением за счет изменения крутящего момента на валу двигателя постоянного тока. Дискретный токовый сигнал о состоянии предохранительного перепускного клапана поступает с датчика (поз. 3 - 1) на дискретный вход ПЛК.

С выхода ПЛК по шине RS - 232 информация о состоянии предохранительного перепускного клапана поступает в управляющую ПЭВМ. С дискретного выхода ПЛК токовый сигнал поступает на сигнальную лампу (поз. 3 - 2) на панель приборов экскаватора.

На основании разработанной функциональной схемы автоматизации привода поворотной платформы экскаватора (рис. 1) и исследовании особенностей описанных контуров управления разработана схема системы автоматизированного управления (САУ) (рис. 2);

- 5-й контур – контроль состояния предохранительного перепускного клапана.



		a	b	c	d	e	f	
Приборы по месту								
Стенд преобразователей								
Пульт управления	ПЛК	Аналоговый вход	•	•		•	•	
		Аналоговый выход			•			
		Дискретный вход			•			
		Дискретный выход						•
	ПЭВМ	Видеотерминал	•	•		•	•	•
		Печать						
Пульт управления								

Рис. 1. Функциональная схема автоматизации привода поворотной платформы экскаватора

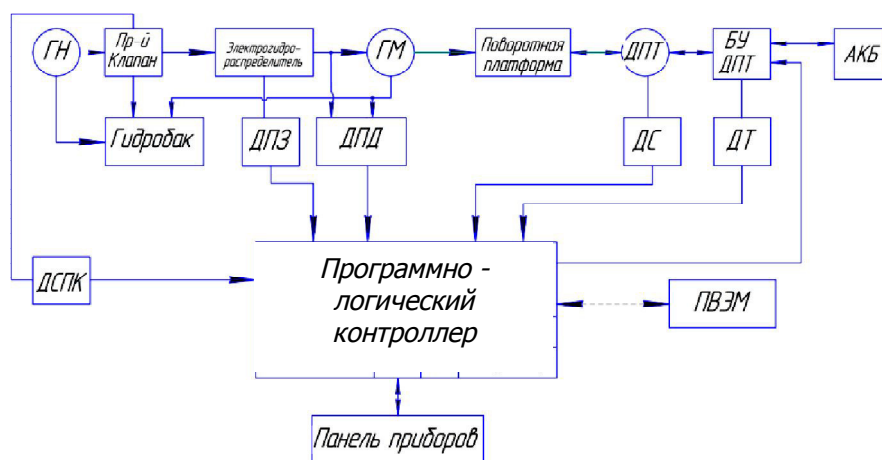


Рис. 2. Структурная схема системы автоматизированного управления (САУ) работой энергосберегающего привода поворотной платформы экскаватора

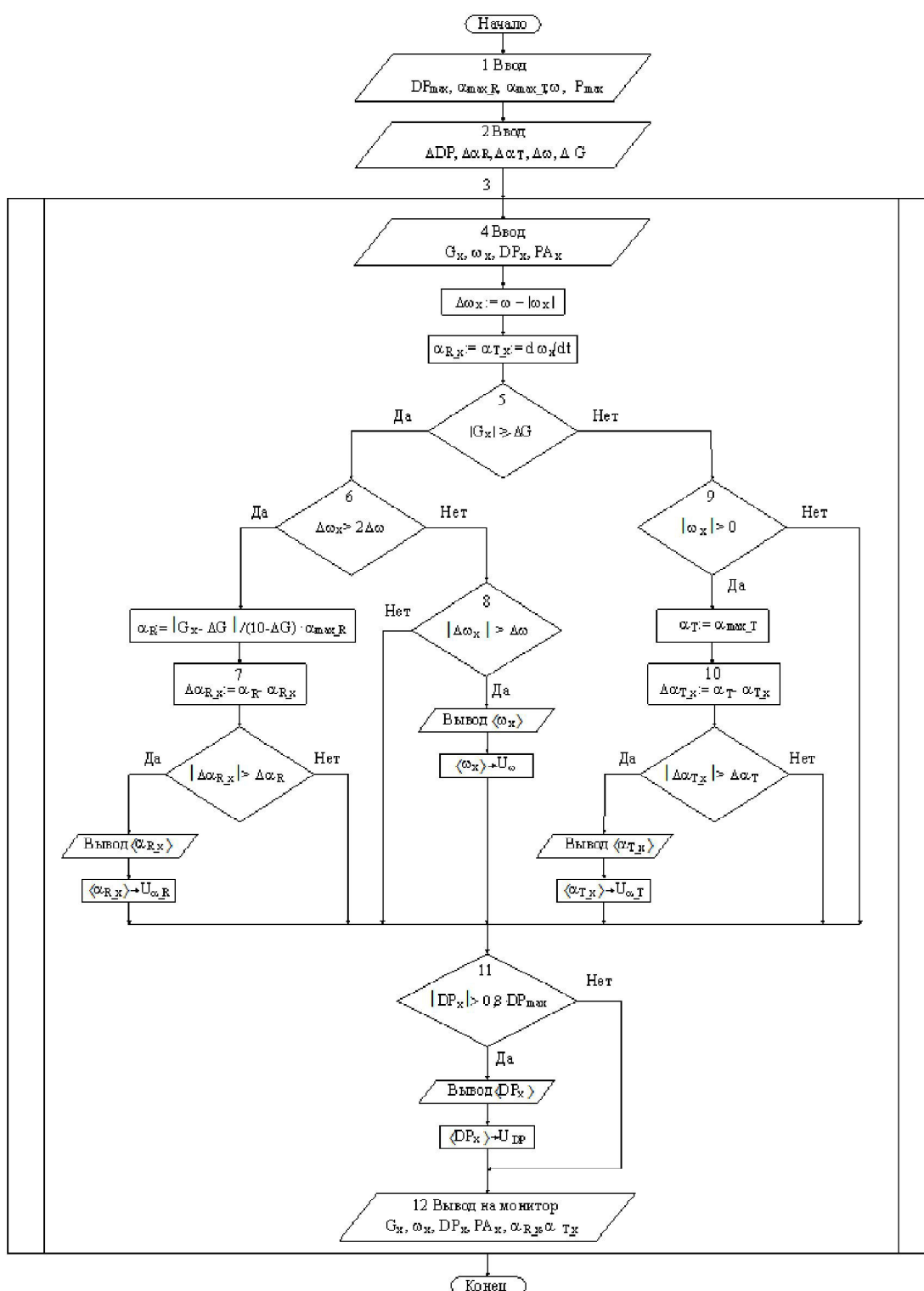


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления

Помимо перечисленных выше основных контуров регулирования и контроля электропривод поворотной платформы экскаватора снабжен релейной защитой: тепловой защитой и защитой от токов короткого замыкания.

Алгоритм управления технологическим процессом (рис. 3) состоит из следующих этапов: ввод заданных значений параметров регулирования; ввод допустимых отклонений параметров процесса; переход на подпрограмму контроля и регулирования

параметров поворотной платформы экскаватора; ввод текущих значений параметров процесса; контроль текущего значения; выбор режима разгона или вращения с постоянной скоростью; контроль текущего значения  $\alpha_{R_X}$  (в режиме разгона); контроль текущего значения  $\omega_X$  (в режиме вращения с постоянной скоростью); выбор режима торможения или режима остановки (стоянки); контроль текущего значения  $\alpha_{T_X}$  (в режиме торможения); контроль текущего значения  $D_{P_X}$ ; вывод на видеотерминал (монитор); переход на 4-й этап.

#### Заключение

В заключение можно отметить, что внедрение разработанного энергоэффективного привода поворота платформы с электрорекуператором позволило решить научную проблему повышения энергоэффективности процесса поворота платформы. Положительный технический эффект достигнут за счет перераспределения моментов сил инерции  $\phi = 35000\text{--}36000$  Н по большему числу контактных площадей. Возникающие моменты сил инерции  $\phi$  от динамических нагрузок и собственных масс удалось преобразовать в электрический вид энергии и обеспечить автоматическое управление их величинами при переходных режимах движения  $t_n - t_i$ . Энергоемкость процесса поворота платформы снизилась на 12 %. Снижение концентрации действующих напряжений до  $\sigma_{и} = 800 - 900$  МПа и распределение их по контактной площади  $\sum l_{ки}$  кинематических пар зацепления позволило обеспечить их высокую долговечность  $N_{\Sigma} = 12 \cdot 10^6$ .

Предложенная система автоматизации энергоэффективного привода поворота платформы с рекуперацией энергии повысит точность управления динамическими нагрузками с расширением применимости эффективных диапазонов технических параметров. Предложенная система регулирования существенно раскрывает понимание вопросов теории долговечности и влияние степени рекуперации на ресурс агрегатов.

В связи с тем, что в работу привода поворота платформы включен электрорекуператор, одной из важных задач остается описание процессов движения поворотной платформы при неустановившихся режимах с применением электрорекуператора.

#### Библиографический список

1. Воловиков, Б.П. Оптимизация параметров устройства для снижения динамических нагрузок в гидроприводах погрузочных манипуляторов: дис... канд. техн. наук / Воловиков Б.П. – Омск, 1984. – 200 с.
2. Павлов, В.П. Анализ расчетных положений рабочего оборудования экскаватора в среде *SOLID WORKS-visual/NASTRAN* / В.П. Павлов // САПР и графика. – 2007. – № 2. – С. 38 – 41.
3. Романов, Д.Б. Исследование статических и динамических характеристик гидравлического привода с пропорциональным электрическим управлением / Д.Б. Романов, В.И. Голубев // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: докл. Всероссийской научно-техн. конф. студентов и аспирантов. 9 декабря 2010 г., Москва. – М.: Изд-во МЭИ, 2010. – С. 153–159.
4. Кузнецова, В.Н., Савинкин, В.В. Анализ эффективности гидросистемы одноковшового экскаватора при рекуперации энергии потока рабочей жидкости // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 5 (39). – С. 21– 29.
5. Ананин, В.Г. Функциональное моделирование приводов и рабочего оборудования строительных и дорожных машин / В.Г. Ананин // Механизация строительства. – 2002. – № 12. – С. 12–18.
6. Кузнецова, В.Н. Развитие научных основ взаимодействия контактной поверхности рабочих органов землеройных машин с мерзлыми грунтами: дис.... д-ра техн. наук. – Омск, 2009. – 259 с.
7. Савинкин, В.В. Развитие теории энергоэффективности одноковшового экскаватора: дис... д-ра техн. наук / В.В. Савинкин. – Омск, 2016. – 390 с.

#### DEVELOPMENT OF THE HYBRID CONTROL SYSTEM OF THE ENERGY SAVING DRIVE OF THE SINGLE-BUCKET ROTARY PLATFORM OF THE EXCAVATOR

V.B. Savinkin, V.N. Kuznetsova, V.G. Yakovlev

**Abstract.** Technological operations hydrodrive shovel made at high energy costs, a large share of which is to overcome the resistance forces and the movement of the working masses of their own equipment. This powerful hydraulic machinery and work equipment tested cyclically varying load in the performance of technological operations. The article describes the control system developed energy-efficient drive turntable shovel designed for regulation and optimal distribution of forces and moments of forces between the amplifier and the hydraulic motor, which leads to a decrease in energy intensity of the hydraulic drive at least 1,2 times.

**Keywords:** energy efficiency, servosystem, algorithm, the resistance force, the kinematic pair.

## References

1. Volovikov B.P. *Optimizacija parametrov ustrojstva dlja snizhenija dinamicheskikh nagruzok v gidroprivodah pogruzochnyh manipulatorov: dis. kand. tehn. nauk* [Optimizing the machine settings to reduce the dynamic loads in hydraulic loading manipulators: dis cand. tehn. science]. Omsk, 1984. 200 p.

2. Pavlov V.P. Analiz raschetnyh polozhenij rabocheho oborudovanija jekskavatora v srede SOLID WORKS-visualNASTRAN [Analysis of estimated positions of the excavator working equipment among SOLID WORKS-visual NASTRAN]. *SAPR i grafika*, 2007, no 2. pp. 38 - 41.

3. Romanov D.B., Golubev V.I. Issledovanie staticheskikh i dinamicheskikh karakteristik gidravlicheskogo privoda s proporcional'nym jelektricheskim upravleniem [The study of static and dynamic characteristics of the hydraulic drive with proportional electric control]. *Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika: dokl. Vserossijskoj nauchno-tehn. konf. studentov i aspirantov. 9 dekabrja 2010*. Moscow. pp. 153-159.

4. Kuznetsova V.N., Savinkina V.V. Analiz jeffektivnosti gidrosistemy odnokovshovogo jekskavatora pri rekuperacii jenerгии potoka rabochej zhidkosti [Analysis of the effectiveness of the hydraulic shovel at a recovery of working fluid flow energy]. *Vestnik SibADI*, 2014, no 5 (39). pp. 21- 29.

5. Ananin V.G. unkcional'noe modelirovanie privodov i rabocheho oborudovanija stroitel'nyh i dorozhnyh mashin [Functional modeling drives and working equipment and road construction machinery]. *Mehanizacija stroitel'stva*, 2002, no 12. pp. 12 - 18.

6. Kuznetsova V.N. *Razvitie nauchnyh osnov vzaimodejstvija kontaktnoj poverhnosti raboчих organov zemlerojnyh mashin s merzlymi gruntami: dis. doctor technical sciences nauk* [Development of scientific bases of interaction of the contact surface of the working bodies

of earth-moving machines with the frozen soil: dis. dr. tehn. sciences]. Omsk, 2009. 259 p.

7. Savinkin V.V. *Razvitie teorii jenergojeffektivnosti odnokovshovogo jekskavatora doctor technical sciences nauk* [Development of energy efficiency theory shovel: dis. dr. tehn. sciences]. Omsk, 2016. 390 p.

*Савинкин Виталий Владимирович (Казахстан, г. Петропавловск) – кандидат технических наук, доцент Северо-Казахстанского государственного университета им. М. Козыбаева (150000, Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86).*

*Кузнецова Виктория Николаевна (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, ул. Мира, 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).*

*Яковлев Валерий Геннадьевич (Казахстан, г. Петропавловск) – главный инженер Товарищество с ограниченной ответственностью «Мехколонна - 60», (150000 Казахстан г. Петропавловск, ул. Г Мусрепова, 36).*

*Savinkin Vitaliy Vladimirovich (Kazakhstan, Petropavlovsk) – candidate of technical sciences, of The North Kazakhstan state university of M. Kozymbayev (150000, Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin St., 86).*

*Kuznetsova Viktoria Nikolaevna (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave. 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru)*

*Yakovlev V.G. (Kazakhstan, Petropavlovsk) is the chief engineer the Limited liability company "the Mobile Mechanical Division - 60", (150000 Kazakhstan Petropavlovsk, st. Of Musrepov, 36).*

УДК 625.76.08

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН ПУТЁМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАРАБОТКИ

Р.Ф. Салихов, Т.М. Чудова, Р.Р. Валиев  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация.** *Статья посвящена эксплуатационному методу повышения надёжности строительных и дорожных машин путём совершенствования существующей системы измерения наработки. Для решения поставленной задачи разработана конструкция устройства для измерения наработки транспортныh и транспортно-технологических машин с дизельным двигателем внутреннего сгорания. Предлагаемое устройство позволяет с большей точностью измерять величину наработки, обладает меньшей трудоёмкостью снятия и установки его на машину по сравнению с аналогами.*

**Ключевые слова:** *надёжность, система измерения наработки, затраченная энергия, ресурс.*