

УДК 62(075.8)

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ГИБРИДНОГО ПРИВОДА ПОВОРОТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

В.Н. Кузнецова¹, В.В. Савинкин²

¹ ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Омск, Россия;

² Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан.

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема обеспечения энергосбережения механизме поворота платформы одноковшового экскаватора при выполнении работ. Анализ конструкций современных гидравлических экскаваторов позволяет сделать вывод о необходимости разработок для совершенствования управления гидроприводом при выполнении технологических операций. Авторы приходят к выводу, что конструкция и принцип работы насосно-аккумуляторных гидравлических приводов поворотной платформы экскаватора имеют существенные недостатки. Предложена конструкция энергосберегающего механизма поворотной платформы для максимального использования ее кинетической энергии, уменьшения износа и снижение нагрузок в механизме поворота платформы. Данная разработка обеспечит равномерное распределение усилия по рабочим поверхностям кинематических пар и приведет к повышению энергоэффективности и долговечности гидропривода одноковшового экскаватора.

Ключевые слова: экскаватор одноковшовый, управление, эффективность, энергия, рекуперация.

Введение

Тенденция развития научных основ, методов и средств управления гидрофицированными машинами обуславливает необходимость в совершенствовании теории и практики эксплуатации их гидроприводов. Поэтому применение методов рекуперации энергии потока рабочей жидкости становится первостепенной задачей. Это позволит более качественно использовать потенциал СДМ и повысить основные эксплуатационные показатели для заданного цикла работ при разных режимах загрузки гидропривода.

Проведенные исследования конструкции и принципа работы насосно-аккумуляторных гидравлических приводов поворотной платформы землеройной машины [1-4] указывают на наличие целого ряда существенных недостатков: неполное использование энергетического потенциала вращающегося объекта; сложность конструкции; невозможность регулирования подачи оптимального давления потока рабочей жидкости в процессе разгона и торможения; наличие неуправляемой циклической нагрузки на кинематической паре «венце поворотного круга – приводная шестерня», возникающей в момент разгона и торможения; наличие динамических нагрузок при торможении, возникающих за счет моментов инерции, пульсации потока рабочей жидкости и резкого

замедления; большой разброс скорости и ускорений поворотной платформы в процессе такта; невозможность максимального использования кинетической энергии вращающегося объекта; высокая энергоёмкость на единицу выполненной работы; наличие больших значений величины реактивных сил в механизме; необходимость высокого давления в гидроприводе поворота платформы; отсутствие возможности мгновенного реагирования на изменяющиеся нагрузки в процессе времени разгона и торможения; отсутствие возможности автоматического распределения усилия в поворотном механизме.

Описание конструкции и принципа действия

Таким образом, была поставлена задача разработка конструкции энергосберегающего механизма поворотной платформы для максимального использования ее кинетической энергии, уменьшения износа и снижения нагрузок в механизме поворота платформы, упрощения гидравлической схемы, разработки возможности автоматического регулирования распределения усилия на венце поворотного круга, выравнивания диапазона скоростного режима вращения за счет увеличения чувствительности к изменению угловых скоростей и крутящих моментов.

Применение электродвигателя (электроусилителя), датчика угла поворота,

датчика крутящего момента, датчика давления жидкости, дополнительного регулировочного клапана и электронного блока управления позволяет эффективно автоматически распределить усилие, прилагаемое к поворотному кругу от редуктора платформы, снизить значения величин реактивных сил в механизме, исключить необходимость высокого давления в гидроприводе поворота платформы, использовать кинетическую энергию поворотной платформы землеройной машины, уменьшить количество применяемых элементов гидросхемы, снизить износ и динамические нагрузки при разгоне и торможении вращающихся части кинематических пар опорно-поворотной платформы землеройной машины [5,6].

Технический результат достигается тем, что на комбинированном энергосберегающем приводе поворотной платформы с целью повышения энергоэффективности и долговечности предусмотрена электронная система управления, взаимодействующая с гидромеханической системой привода. Гидромеханическая система включает регулируемый насос, гидрораспределитель, предохранительные и обратные клапаны, причем в качестве предохранительных клапанов используют клапаны с двумя настроенными давлениями, реле-регулятор, соединенные между собой гидромагистралями (рис. 1).

Электронная система управления помогает оценить усилие, моменты, действующие на шестерню поворотного круга, и автоматически распределить усилие между усилителем и шестерню гидромотора, тем самым снижая рабочее давление магистрали в 1,5 раза. Для этого на выходном валу между верхним и нижним радиально-сферическими подшипниками гидромотора установлен входной датчик угла поворота платформы, взаимодействующий с электронным блоком управления (ЭБУ) при передаче сигнала. Чем больший крутящий момент создает гидромотор, тем больше должно быть дополнительное усилие со стороны усилителя гидромотора. Величину крутящего момента на приводной шестерне гидромотора оценивает входной датчик крутящего момента (во многих конструкциях датчик крутящего момента объединен с датчиком угла поворота). Выходные контакты датчика крутящего момента обеспечивают его взаимодействие с предохранительными клапанами давления рабочей жидкости и ЭБУ, далее ЭБУ обрабатывает, анализирует

сигналы и вырабатывает управляющее воздействие, направляя сигналы на электродвигатель усилителя. Электродвигатель усилителя расположен в специально изготовленном посадочном месте, размещенном на поворотной платформе в свободном пространстве ниши гидромотора. Эффект энергосбережения происходит также за счет использования динамической нагрузки поворотной платформы и рабочего оборудования, которая характеризуется крутящим моментом на заданный угол поворота платформы.

На рисунке 1 представлена конструкция энергосберегающего привода поворотной платформы, который преобразует крутящие и инерционные моменты в полезную работу через усилие, создаваемое усилителем. Энергосберегающий привод поворотной платформы землеройной машины содержит низкомоментный аксиально-поршневой гидромотор 15 с двухступенчатым планетарным редуктором 22, увеличивающим крутящий момент и уменьшающим частоту вращения поворотной платформы.

На выходном валу гидромотора 15 жестко закреплена солнечная шестерня 16, находящаяся в постоянном зацеплении с сателлитами 11. Сателлиты обеспечивают вращение водила 10 и вала, расположенных в корпусе 20. Увеличение крутящего момента и уменьшение частоты вращения поворотной платформы осуществляет блок шестерен и сателлитов, содержащий солнечную шестерню 18, которая жестко закреплена на валу и находится в постоянном зацеплении с сателлитами 9, которые обкатываются по нижним внутренним зубьям зубчатого венца корпуса 19, приводя во вращение водило 8 и вал 24, имеющий повышенный крутящий момент. Обе планетарные передачи самоустанавливающиеся. Вал 24 установлен в корпусе 22 на сдвоенных радиально-сферических подшипниках 4 и 7, обеспечивающих вращение вала 24 и распределение динамических нагрузок в проектной плоскости. На выходном валу между верхним и нижним радиально-сферическими подшипниками гидромотора установлен датчик угла поворота платформы 5, имеющий герметизированный корпус. Контактная клемма датчика выведена через специально фрезерованное отверстие корпуса 22. Контроль возникающего крутящего момента при динамических нагрузках осуществляет датчик крутящего момента 3, расположенный на валу 24 между нижним радиально-сферическим подшипником 4 и шестерней 2.

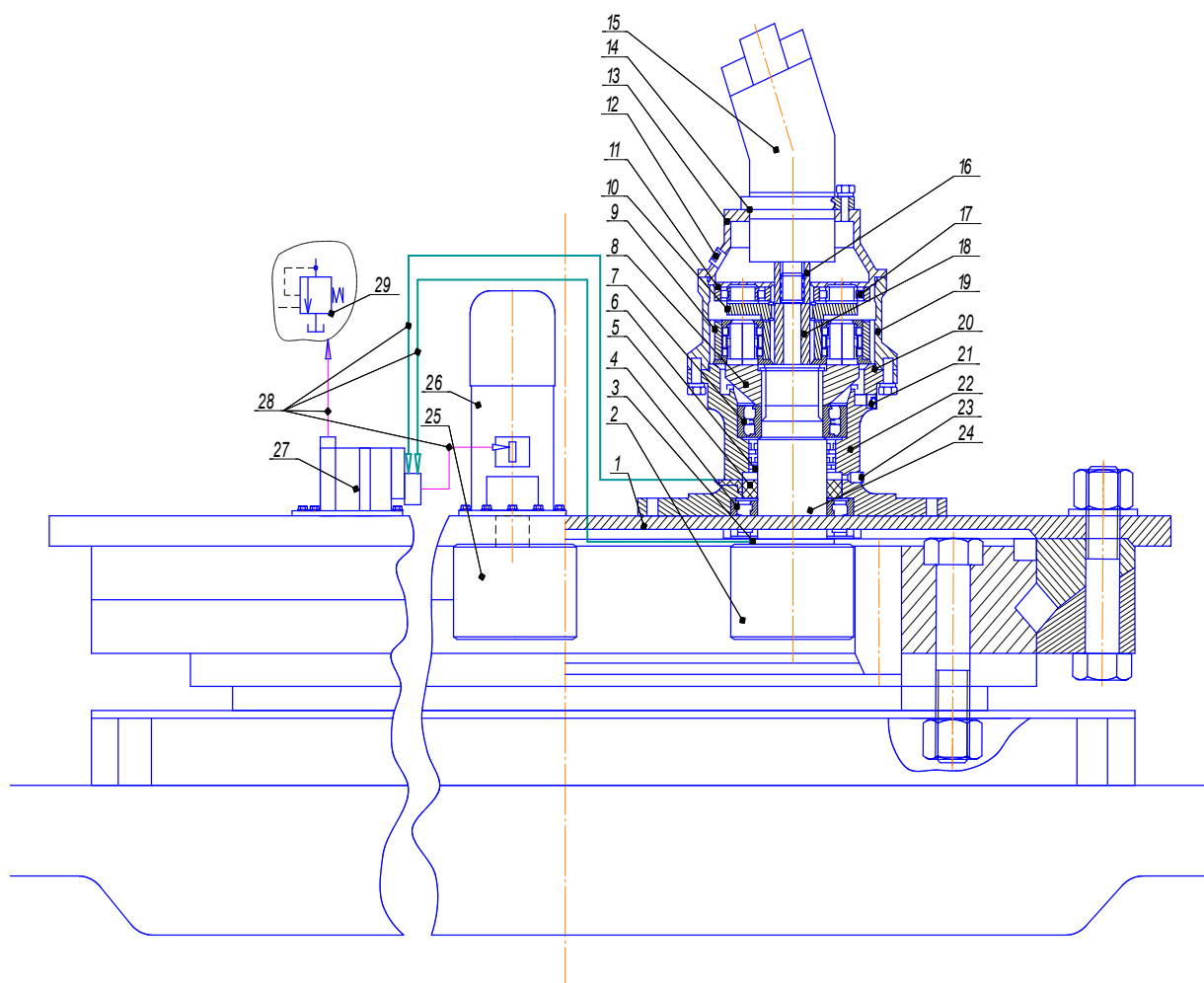


Рис. 1. Конструкция энергосберегающего привода поворотной платформы землеройной машины

На конце вала 24 жестко закреплена шестерня 2, которая, обкатываясь по внутреннему зубчатому венцу опорно-поворотного устройства 1, заставляет платформу поворачиваться относительно пневмоколесного ходового устройства экскаватора. При значительной величине крутящего момента на шестерне 2, считываемого датчиками 3 и 5, срабатывает электроусилитель, содержащий электродвигатель 26 и приводную шестерню 25. управление осуществляет ЭБУ 27.

Устройство работает следующим образом. В момент начала работы поворотной платформы экскаватора 1 в работу включается гидромотор 15. Последний, преобразуя кинетическую энергию потока рабочей жидкости во вращательное движение выходного вала, передает усилие на двухступенчатый планетарный редуктор 22, увеличивающий крутящий момент и уменьшающий частоту вращения поворотной платформы. Солнечная шестерня 16 жестко

закреплена на выходном валу гидромотора 15 и образует кинематическую связь с сателлитами 11. Крутящие моменты передаются через сателлиты, которые обкатываются по верхним внутренним зубьям зубчатого венца корпуса 20, приводя во вращение водило 10 и вал.

С целью равномерного движения платформы и выравнивания тангенциальных скоростей на валу жестко закреплена солнечная шестерня 18, находящаяся в постоянном зацеплении с сателлитами 9, которые обкатываются по нижним внутренним зубьям зубчатого венца корпуса 20, приводя во вращение водило 8 и вал 24. При перемещении поворотной платформы 1 на определенный угол возникают угловые скорости (не одинаковые по значению в разный интервал времени), моменты инерции и силы сопротивления. Для эффективного использования этих сил разработана следящая система с электроусилителем 26.

При величине давления рабочей жидкости, равного 17 МПа, на кинематической паре «венец поворотной платформы – шестерня планетарного редуктора» возникает увеличенный крутящий момент, что сопровождается режимом повышением динамических нагрузок. Датчики 3 и 5 определяют изменения крутящего момента, возникающего также от действия инерционных сил собственных масс оборудования при заданном угле поворота платформы 1. Далее сигнал по линиям связи от датчиков 3 и 5 передается на обрабатывающий их электронный блок управления 27. Анализируя угловые скорости и действующие моменты, ЭБУ 27 передает сигнал на электродвигатель усилителя 26 и предохранительный клапан 29 гидравлического привода. С целью понижения давления в гидромоторе 15 срабатывает предохранительный клапан 29. В этот момент включается электроусилитель 26 и перераспределяет усилие между приводными шестернями 2 и 25 редуктора 22 и усилителя 26 соответственно. Особенно эффективна работа усилителя в начале поворота платформы, когда происходит резко нарастающее ускорение, и в конце поворота при резкой остановке платформы. Данный эффект препятствует резкому троганию платформы с места и порыву гидромагистралей. Система датчиков с электроусилителем обеспечивает равномерность хода в интервале времени поворота, значительное снижение потерь энергии при разгоне и торможении платформы 1, а также преобразование сил сопротивления и моментов инерции вращающейся платформы в полезную работу. Потенциал гибридных систем привода очень велик, особенно при создании и разработке интерактивных систем приводов.

Важно отметить принципиальную роль электродвигателя в работе энергоэффективного механизма поворота платформы. Электродвигатель в данном процессе выступает в роли силового механизма. При разгоне поворотной платформы за короткий промежуток времени t_1 за счет больших собственных масс при увеличении угла поворота φ резко возрастает значение момента инерции. За счет этого в

момент времени t_1 наблюдается рост удельной окружной силы в шестернях зацепления механизма поворота. Действие указанных сил неизбежно влечет появление контактных напряжений σ_n и напряжений изгиба σ_i на контактной поверхности зубьев шестерен. В этот момент редуктор находится в максимально нагруженном состоянии. Входные (давление, расход рабочей жидкости) и выходные (крутящий момент, мощность зацепления шестерен) параметры редуктора характеризуют величину сил, приложенных к контактной поверхности зубьев. Этот режим является критически опасным для кинематической пары зацепления. В момент разгона поворотной платформы действующие напряжения σ_n и σ_i не распределены по всей поверхности, а сконцентрированы только по ширине контактного зуба и крайним точкам эвольвенты прилегающих зубьев. Именно в переходной момент времени работы редуктора $t_1 \rightarrow t_2$ поворот платформы сопровождается большой удельной энергоемкостью. Это объясняется тем, что большая часть энергии или мощность в зацеплении расходуется на преодоление инерционных и гидравлических сил сопротивления. В этот момент величина давления в гидромоторе редуктора составляет $P = 16$ МПа. КПД редуктора $\eta = 0,8$. Соответственно, несмотря на энергозатратность процесса, потенциал механизма используется в полной мере. Далее с ростом сил сопротивления в период $t_2 \rightarrow t_3$ КПД редуктора значительно снижается до $\eta = 0,65$, а энергоемкость увеличивается. Данное явление объясняется стабильно действующими нагрузками за короткий промежуток времени $t_2 = 3$ с. За время заключительного периода поворота платформы t_3 торможение осуществляется при экстремально высоких нагрузках, когда силы инерции резко возрастают, вызывая мгновенный всплеск напряжений в контактных шестернях. При этом гидропривод также находится в нагруженном состоянии. Важная задача при этом состоит в адаптации механизма поворота к изменяющимся во времени значениям инерционных сил, моментов, ускорений [7,8].

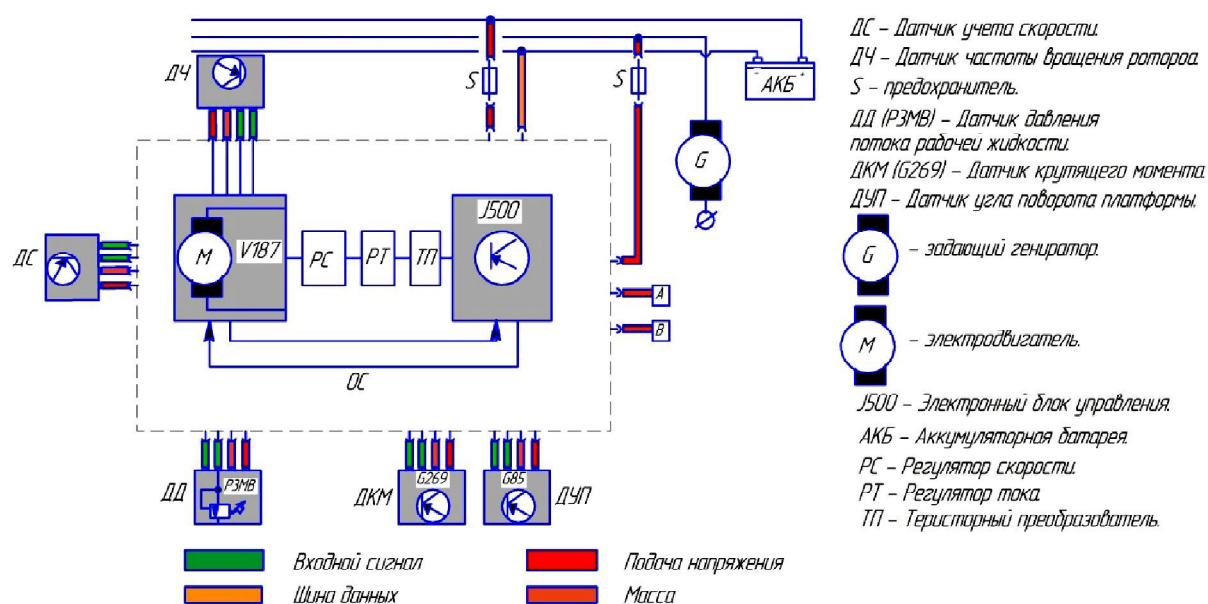


Рис. 2. Функциональная схема электрической части гибридного привода

Электрический усилитель обеспечивает экономию энергии управления поворотной платформой. В отличие от системы управления с гидросилителем, в которой насос работает постоянно, в поворотной платформе с электрическим усилителем используется энергия электродвигателя только при повороте платформы. Благодаря снижению потребляемой мощности уменьшается расход топлива экскаватора. Функциональная схема адаптивной системы управления поворотной платформой представлена на рисунке 2.

Управление электроусилителем осуществляется программой, записанной в память ЭБУ усилителя управления поворотом J500. В настоящий момент в управлении платформой может использоваться несколько различных программ. Также можно произвести установку соответствующей программы на основании данных диагностики, измерений и информационной системы VAS 5051, в которой отражается дополнительный крутящий момент в зависимости от крутящего момента на ведущей шестерне редуктора. Крутящий момент передается в виде сигнала на ЭБУ усилителя управления платформой при смещении магнита относительно чувствительного элемента. При неисправности обеих частей датчика крутящего момента следует заменить механизм усилителя. При обнаружении неисправности электроусилитель отключается. Отключение происходит

«постепенно». При «постепенном» отключении ЭБУ усилителя управления поворотной платформой рассчитывает дополнительное усилие по данным от датчика угла поворота платформы G85 и электродвигателя V187. Электродвигатель V187 усилителя включается через определенные промежутки времени, то есть когда на ведущей шестерне возникают пиковые нагрузки. Электродвигатель V187 бесщеточный, асинхронный. Максимальный дополнительный крутящий момент создается при нагруженном режиме редуктора (разгон и торможение). Тем самым, включаясь в работу, часть нагрузки электродвигатель забирает на себя и передает на свою приводную шестерню. В итоге, сумма усилий двух элементов распределяется по большей площади зацепления (две ведущие шестерни) и обеспечивается равномерное движение платформы, минуя переходные режимы нагружения. С другой стороны вала электродвигателя установлен магнит, который используется ЭБУ усилителя для определения частоты вращения ротора. Этот сигнал ЭБУ усилителя служит для определения скорости вращения поворотной платформы. Необходимое напряжение подается на электродвигатель V187 усилителя поворота платформы. Блок-схема электроусилителя поворота платформы экскаватора на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами представлена на рисунке 3.

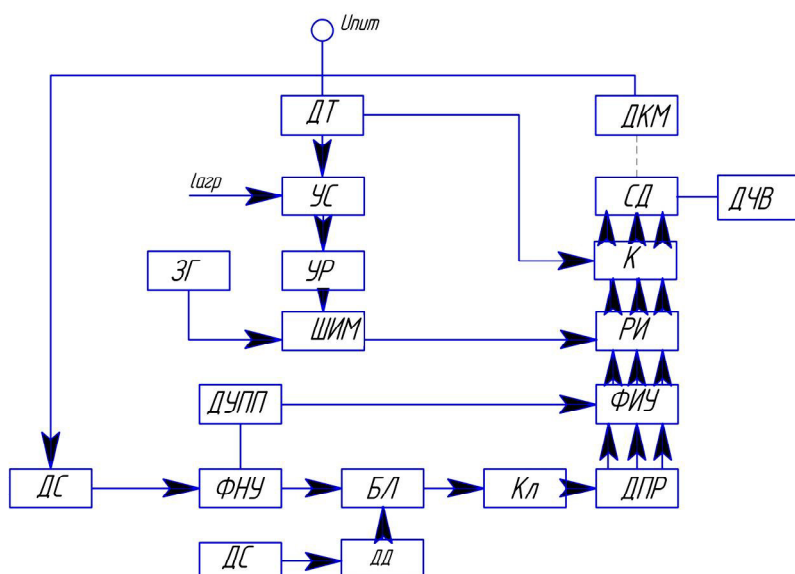


Рис. 3. Блок-схема электроусилителя поворота платформы экскаватора на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами

Рассматривая принцип работы механизма, выделим основные моменты функционирования. При повороте платформы в одну сторону сигнал определенной полярности с датчика угла поворота платформы ДУПП (датчик момента) поступает на один из входов формирователя напряжения управления ФНУ. На второй его вход поступает сигнал с датчика угла ДКМ поворота платформы ДУПК, где происходит их сравнение. С выхода ФНУ поступает сигнал на блок логики БЛ, который через замкнутый ключ Кл управляет датчиком положения ротора ДПР. Последний, в свою очередь, через формирователь импульсов управления ФИУ, связан с распределителем импульсов РИ, на выходе которого формируются специальные сигналы управления шестью ключами коммутатора К, к выходу которого подключен исполнительный синхронный двигатель СД, который обрабатывает заданный угол скорость поворота платформы.

Если платформа поворачивается в обратную сторону или возвращается в исходное положение, то сигнал с ДУПП меняется на противоположный и дополнительно воздействует на ФИУ, на выходе которого два слаботочных сигнала управления по фазам двигателя меняются местами, что приводит к вращению исполнительного двигателя в обратную сторону. После каждой обработки заданного угла поворота Кл разрывает связь, идущую к ДПР, и двигатель останавливается, фиксируя платформу в заданном положении.

Так как исполнительный двигатель постоянно работает в режиме пуска и торможения, то необходимо ограничить большие пусковые токи, потребляемые двигателем. Эту функцию выполняют следующие узлы:

- датчик тока ДТ;
- узел сравнения УС;
- усилитель рассогласования УР;
- задающий генератор ЗГ;
- широтно-импульсный модулятор ШИМ.

Технический эффект использования адаптивной системы выражается в том, что при повороте платформы кинематическая энергия используется на 32 % больше, чем при обычной схеме. Энергоэффективность увеличивается за счет регулирования нагрузочных режимов путем включения электродвигателя. Управление электродвигателем осуществляется за счет поступающего сигнала напряжения, величина которого регулируется исходя из изменяющихся величин сил и моментов инерции оборудования и платформы экскаватора.

Заключение

Использование заявленного энергосберегающего механизма поворотной платформы обеспечивает преобразование моментов инерции рабочего оборудования в механическую энергию и полезную работу, равномерное распределение усилия по рабочим поверхностям кинематических пар, и, как следствие, ведет к повышению энергоэффективности и долговечности всего гидропривода экскаватора.

Библиографический список

1. Бондарович, Б. А. Надёжность металлоконструкций землеройных машин. Методы оценки и расчёта / Б. А. Бондарович, Д. И. Фёдоров и др. – М.: Машиностроения, 1971. – 216 с.
2. Волков, Д. П. Проблемы динамики, прочности, долговечности и надёжности строительных и дорожных машин / Д. П. Волков // Строительные и дорожные машины. – 1993. – № 5. – С. 4-9.
3. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
4. Brussat T.R. An approach to predicting the growth to failure of fatigue crack subjected to arbitrary cyclic loading, Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, 1971, American Society For Testing and Materials, pp. 122-143.
5. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
6. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448с.
7. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Из-во стандартов, 1989. – 23 с.
8. ГОСТ 27.203-83 Надёжность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надёжности. – 23 с.

DEVELOPMENT OF HYBRID DRIVE'S CONSTRUCTION OF A TRAVERSING PLATFORM OF AN EARTHMOVING MACHINE FOR IMPLEMENTING CONSTRUCTION WORKS

V. N. Kuznetsova, V. V. Savinkin

Abstract. The article is devoted to the problem of ensuring energy-saving of a traversing platform's mechanism of the single-bucket excavator at work. The analysis of constructions of modern hydraulic excavators allows drawing a conclusion on need of developments for perfecting control of a hydraulic circuit at implementing technological operations. The authors come to a conclusion that the construction and principle of work of pumping and accumulator hydraulic circuits of an excavator's traversing platform have essential shortcomings. The authors have offered a construction of the energy saving mechanism of the transversing platform for the maximum use of its kinetic energy, reduction of wear and decreasing loadings in the mechanism of a platform's transverse. This development will provide uniform distribution of effort over working surfaces of kinematic couples and will lead to increasing energy efficiency and durability of a hydraulic circuit of the single-bucket excavator.

Keywords: single-bucket excavator, control, efficiency, energy, recuperation.

References

1. Bondarovich B. A., Fjodorov D. I. *Nadjozhnost' metallokonstrukcij zemlerojnyh mashin. Metody ocenki i raschjota* [Reliability of metal structures of earth-moving machines. Methods of assessment and calculation]. Moscow, Mashinostroenija, 1971. 216 p.
2. Volkov D. P. Problemy dinamiki, prochnosti, dolgovechnosti i nadjozhnosti stroitel'nyh i dorozhnyh mashin [Problems of dynamics, strength, durability and reliability of building and road machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 1993, no 5. Pp. 4-9.
3. Alyamovskiy A. A. SolidWorks/COSMOSWorks. *Inzhenernyj analiz metodom konechnyh jelementov* [SolidWorks / COSMOSWorks. Engineering analysis using finite elements method]. Moscow, DMK Press, 2004. 432 p.
4. Brussat T. R. An approach to predicting the growth to failure of fatigue crack subjected to arbitrary cyclic loading, Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, 1971, American Society For Testing and Materials. pp. 122-143.
5. Bolotin V. V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij* [Predicting durability of machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 312 p.
6. Bolotin V. V. *Resurs mashin i konstrukcij* [Durability of machines and structures] Moscow, Mashinostroenie, 1990. 448p.
7. GOST 27.002-89. *Nadjozhnost' v tehnikе. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija* [State standard 27.002-89. Reliability in technique. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow, Iz-vo standartov, 1989. 23 p.
8. GOST 27.203-83 *Nadjozhnost' v tehnikе. Tehnologicheskie sistemy. Obshhie trebovanija k metodam ocenki nadjozhnosti* [State standard 27.203-83 Reliability in technique. Technological systems. General requirements for methods of reliability's assessment. Moscow, Iz-vo standartov, 1983. 23 p.

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

Савинкин Виталий Владимирович (Казахстан, г. Петропавловск) – кандидат технических наук, заведующий кафедрой Транспорт и машиностроение Северо-Казахстанского государственного университета им. М. Козыбаева (150000, Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 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)

Savinkin Vitaliy Vladimirovich (Kazakhstan, Petropavlovsk) – candidate of technical sciences, head of the department "Transport and mechanical engineering" of The North Kazakhstan state university of M. Kozybayev (150000, Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin St., 86)