

11. Котлобай, А. Я. Объемные гидравлические передачи ходового оборудования транспортно-тяговых машин / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело // Инженер-механик. – 2017. – №2 (75). – С. 18–25.

УДК 69.05–82–229.384

Объемная гидродифференциальная передача мобильной машины

Котлобай А. Я., Котлобай А. А., Юнусов Ю. Ш., Быковский Д. В.
Белорусский национальный технический университет

Предприятиями транспортного машиностроения ведется поиск направлений развития приводов оборудования мобильных машин, роботизированных систем специального назначения. Активно развиваются объемные гидропередачи (ОГП) в приводах мобильных машин.

Попытки классифицировать варианты построения структурных схем ОГП с внутренним разветвлением потока мощности, реализованных мировыми производителями, и гипотетически возможных, позволили автору [1] условно разделить ОГП на две группы в зависимости от фиксирования элементов насоса либо гидромотора. Рассмотрим примеры реализации ОГП с внутренним разветвлением потока мощности второй группы – ОГП с неподвижными элементами насоса (*рисунок 1*).

Структура ОГП с внутренним разветвлением потока мощности на базе аксиально-поршневых гидромашин предполагает связь ведущего вала с блоком цилиндров 5 насоса 1 (см. *рисунок 1, а, б*) при зафиксированных наклонной шайбе 6 и гидрораспределителе насоса 1, либо с наклонной шайбой 6 насоса 1 и гидрораспределителем (см. *рисунок 1, в, г*), при неподвижном блоке цилиндров 5 насоса 1. Блок цилиндров 5 насоса 1 связан с блоком цилиндров 7 гидромотора 2 (см. *рисунок 1, а*), либо с наклонной шайбой 8 гидромотора 2 (см. *рисунок 1, б*). Ведомый вал связан с наклонной шайбой 8 гидромотора 2 (см. *рисунок 1, а*), либо с блоком цилиндров 7 гидромотора 2 (см. *рисунок 1, б*). Наклонная шайба 6 насоса 1 связана с наклонной шайбой 8 (см. *рисунок 1, в*), либо с блоком цилиндров 7 (см. *рисунок 1, г*) гидромотора 2. Ведомый вал связан с блоком цилиндров 7 (см. *рисунок 1, в*), либо с наклонной шайбой 8 гидромотора 2 (см. *рисунок 1, г*). В механических линиях связи структурных элементов насоса 1 и гидромотора 2 с ведомым валом могут включаться промежуточный 3 и выходной 4 редукторы, обеспечивающие получение заданного диапазона скоростей вращения n_2 ведомого вала, при фиксированном значении частоты вращения ведущего вала n_1 .

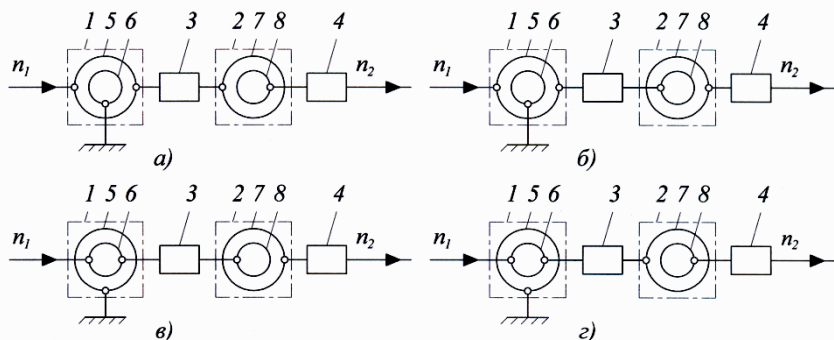


Рис. 1. Структурные схемы ОГП с внутренним разветвлением потока мощности:

- 1 – насос; 2 – гидромотор; 3, 4 – промежуточный, выходной редуктор;
 5, 7 – блок цилиндров насоса, гидромотора; 6, 8 – наклонная шайба
 и гидрораспределитель насоса, гидромотора

Анализ структуры ОГП с внутренним разветвлением потока мощности показывает, в ОГП, реализованных на основании структурных схем с фиксированным положением наклонной шайбы и гидрораспределителя насоса возможно применение аксиально-поршневых насосов с традиционной системой регулирования объема посредством изменения угла наклона шайбы 6 насоса 1 (см. рисунок 1, а, б). Наряду с традиционным методом регулирования объема насоса посредством изменения угла наклона шайбы насоса возможно применение метода фазового регулирования, состоящего в изменении относительного углового положения наклонной шайбы с неизменным углом наклона и гидрораспределителя. В применении к рассматриваемым структурным схемам ОГП (см. рисунок 1, а, б) метод фазового регулирования может быть реализован поворотом наклонной шайбы, либо гидрораспределителя относительно оси насоса [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Рассмотрим пример конструктивной схемы ОГП с внутренним разветвлением потока мощности (см. рисунок 1, б) на основе технической реализации метода фазового регулирования по первому направлению [10].

ОГП включает аксиально-поршневой насос 1 переменной производительности, аксиально-поршневой гидромотор 2 постоянного объема, промежуточный планетарный редуктор 3, выходной планетарный редуктор 4 (рисунок 2).

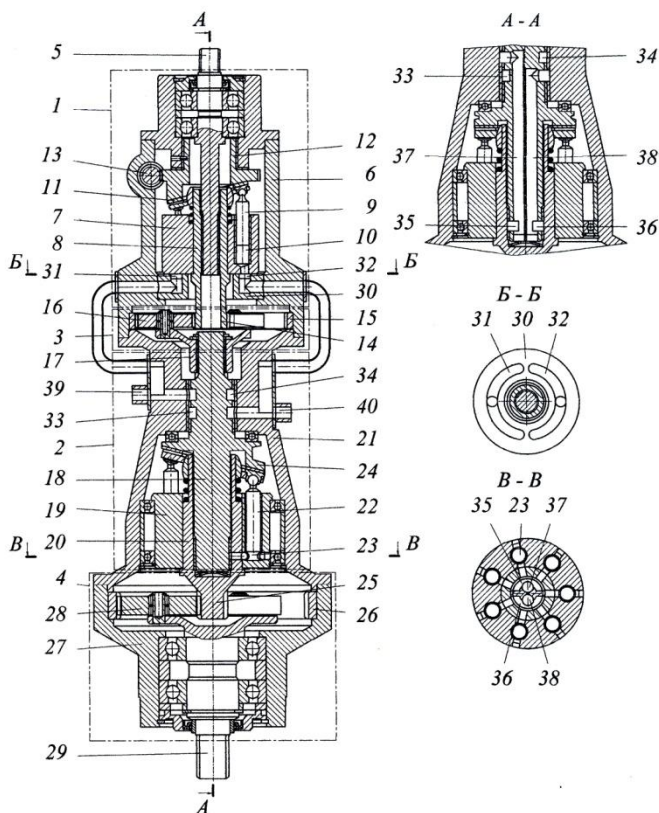


Рис. 2. Конструктивная схема ОГП с внутренним разветвлением потока мощности

Аксиально-поршневой насос 1 переменной производительности включает приводной вал 5, установленный в подшипниковом узле передней крышки корпуса 6, блок цилиндров 7 связанный с втулкой 8, связанной посредством шлицевого соединения с приводным валом 5. Блок цилиндров 7 оснащен поршнями 9, образующими рабочие полости 10. Поршни 9 прижимаются к поверхности наклонной шайбы 11. Наклонная шайба 11 закреплена на ступице 12, установленной в подшипниковом узле скольжения передней крышки корпуса 6 с возможностью поворота относительно оси ОГП на угол $0 \pm 90^\circ$. Для обеспечения поворота ступица 12 оснащена зубчатым венцом червячного зацепления. Привод червяка 13 осуществляется автономным двигателем.

Промежуточный планетарный редуктор 3 включает солнечную шестерню 14, выполненную заодно с втулкой 8, коронную шестерню 15, установленную в корпусе 6 и сателлиты 16, установленные на осях водила 17. Водило 17, установлено на промежуточном валу 18 и связано с ним посредством шлицевого соединения.

Аксиально-поршневой гидромотор 2 постоянного объема включает блок цилиндров 19 связанный с втулкой 20, установленный по наружной поверхности в подшипниковом узле корпуса 21 аксиально-поршневого гидромотора 2 с возможностью поворота относительно оси. Поршни 22 образуют рабочие полости 23 и прижимаются к поверхности наклонной шайбы 24, выполненной заодно с промежуточным валом 18. Промежуточный вал 18 взаимодействует наружной поверхностью с внутренней поверхностью втулки 20 блока цилиндров 19 и опирается на корпус 21 посредством упорного подшипника. Наклонные шайбы 11, 24 выполнены с постоянными углами наклона.

Выходной планетарный редуктор 4 включает солнечную шестерню 25, выполненную заодно с втулкой 20, коронную шестерню 26, установленную в корпусе 27 планетарного редуктора 4 и сателлиты 28, установленные на осях водила, выполненного заодно с ведомым валом 29, установленным в подшипниковом узле корпуса 27 планетарного редуктора 4.

Гидрораспределитель аксиально-поршневого насоса 1 выполнен в виде опорно-распределительного диска 30, взаимодействующего с торцевой поверхностью блока цилиндров 7. Опорно-распределительный диск 30 закреплен в корпусе 6 и оснащен двумя полукольцевыми пазами 31, 32, выполненными на торцевой поверхности. Полости полукольцевых пазов 31, 32 связаны с полостями кольцевых канавок 33, 34, образованных на наружной поверхности промежуточного вала 18.

Гидрораспределитель аксиально-поршневого гидромотора 2 включает группу диаметрально противоположных сегментных пазов 35, 36 с центральным углом 180° , образованную на наружной поверхности промежуточного вала 18. Продольная плоскость сегментных пазов 35, 36 совпадает с плоскостью наклона шайбы 24. Полости сегментных пазов 35, 36 связаны каналами 37, 38 промежуточного вала 18 с полостями кольцевых канавок 33, 34.

Рабочие полости 10 блока цилиндров 7 связаны каналами с полостями полукольцевых пазов 31, 32 опорно-распределительного диска 30. Рабочие полости 23 блока цилиндров 19 связаны радиальными каналами с полостями сегментных пазов 35, 36.

К каналам 39, 40, связанным с кольцевыми канавками 33, 34 подключаются контур подпитки и предохранительные клапаны (не показаны). Каналы 37, 38 закрыты технологическими заглушками.

Приводной вал 5 аксиально-поршневого насоса 1 вращается (по часовой стрелке) от двигателя (не показан), и приводит во вращение втулку 8 с блоком цилиндров 7 аксиально-поршневого насоса 1, солнечную шестерню 14, сателлиты 16 с водилом 17, промежуточный вал 18 с наклонной шайбой 24 аксиально-поршневого гидромотора 2. При вращении блока цилиндров 7 поршни 9 прижимаются к поверхности наклонной шайбы 11 и совершают возвратно-поступательное движение в блоке цилиндров 7.

В начальном (условно) положении наклонной шайбы 11 (см. рисунок 2) плоскость симметрии полукольцевых пазов 31, 32 перпендикулярна плоскости наклона шайбы 11. Рабочие полости 10 при движении поршней 9 наружу из блока цилиндров 7 (такт всасывания), связаны с кольцевой канавкой 34, полукольцевым пазом 31 и с кольцевой канавкой 33, полукольцевым пазом 32 половину хода поршней 9. Аналогично, рабочие полости 10 цилиндров, поршни 9 которых, совершают движение внутрь блока цилиндров 7 (такт нагнетания), связаны с полукольцевым пазом 32 и кольцевой канавкой 33, и с полукольцевым пазом 31 и кольцевой канавкой 34 половину хода поршней 9.

При движении поршней 9 наружу из блока цилиндров 7 при повороте приводного вала 5 и блока цилиндров 7 на угол $0\pm 90^\circ$ – первая половина хода поршня 9 при всасывании (ход всасывания поршня 9 осуществляется за 180° поворота приводного вала 5 и блока цилиндров 7), рабочая жидкость поступает из полости кольцевой канавки 34 в полости полукольцевого паза 31 и рабочие полости 10. При повороте приводного вала 5 и блока цилиндров 7 на угол $90^\circ \div 180^\circ$ – вторая половина хода поршня 9 при всасывании, рабочая жидкость поступает из полости кольцевой канавки 33 в полости полукольцевого паза 32 и рабочие полости 10.

При движении поршней 9 внутрь блока цилиндров 7 при повороте приводного вала 5 и блока цилиндров 7 на угол $0\pm 90^\circ$ – первая половина хода поршня 9 при нагнетании рабочая жидкость из рабочих полостей 10 поступает в полости полукольцевого паза 32 и кольцевой канавки 33. При повороте приводного вала 5 и блока цилиндров 7 на угол $90^\circ \div 180^\circ$ – вторая половина хода поршня 9 при нагнетании рабочая жидкость из рабочих полостей 10 поступает в полости полукольцевого паза 31 и кольцевой канавки 34.

Каждый поршень 9 работает в разных фазах, т.е. всасывает рабочую жидкость в процессе всасывания из полостей кольцевых канавок 33, 34 и нагнетает рабочую жидкость в процессе нагнетания в полости кольцевых канавок 34, 33. Эквивалентный рабочий объем каждого цилиндра формируется как произведение площади каждого цилиндра блока цилиндров 7 на величину эффективного хода поршня 9 на такте нагнетания. Такты всасывания, нагнетания каждого цилиндра блока цилиндров 7 сдвинуты по

времени, и суммарно движения рабочей жидкости в полостях кольцевых канавок 33, 34 нет. Эквивалентный рабочий объем аксиально-поршневого насоса 1, равный сумме всех эквивалентных рабочих объемов 10 цилиндров минимальный – нулевой. Подача рабочей жидкости аксиально-поршневого насоса 1 минимальная – нулевая.

Приводной вал 5 вращает блок цилиндров 7 с втулкой 8 и солнечной шестерней 14. Солнечная шестерня 14 приводит во вращение сателлиты 16, которые взаимодействуют с короной шестерней 15. При неподвижной коронной шестерне 15 водило 17, с осями сателлитов 16 и промежуточным валом 18 вращается в направлении вращения солнечной шестерни 14 со скоростью вращения, определяемой передаточным отношением промежуточного планетарного редуктора 3. При нулевой подаче аксиально-поршневого насоса 1 рабочие полости 23 блока цилиндров 19 запираются, поршни 22 аксиально-поршневого гидромотора 2 блокируются, и наклонная шайба 14 вращает блок цилиндров 19 с втулкой 20 и солнечной шестерней 25. Солнечная шестерня 25 приводит во вращение сателлиты 28, которые взаимодействуют с короной шестерней 26. Водило с осями сателлитов 28 и ведомым валом 29 вращается в направлении вращения солнечной шестерни 25 со скоростью вращения, определяемой передаточным отношением выходного планетарного редуктора 4:

$$n_{29} = n_5 \cdot i_3 i_4^{-1}; \quad i_3 = \frac{n_{14}}{n_{18}}; \quad i_4 = \frac{n_{25}}{n_{29}} > 1, \quad (1)$$

где $n_5, n_{14}, n_{18}, n_{25}, n_{29}$ – скорость вращения приводного вала 5, солнечной шестерни 14, 25, промежуточного вала 18, ведомого вала 29; i_3, i_4 – передаточное число промежуточного планетарного редуктора 3, выходного планетарного редуктора 4.

Мощность приводного вала 5 передается ведомому валу 29 механическим путем.

При повороте ступицы 12 с наклонной шайбой 11 в подшипниковом узле посредством двигателя и червяка 13 на 90° по часовой стрелке плоскость симметрии полукольцевых пазов 31, 32 совпадает с плоскостью наклона шайбы 11.

При движении поршней 9 наружу из блока цилиндров 7 рабочая жидкость из полости кольцевой канавки 33 поступает в полость полукольцевого паза 32 и рабочие полости 10. При движении поршней 9 внутрь блока цилиндров 7 рабочая жидкость из рабочих полостей 10 поступает в полости полукольцевого паза 31 и кольцевой канавки 34. Полость кольцевой канавки 33 является всасывающей, а полость кольцевой канавки 34 – напорной. Каждый цилиндр полный ход поршня 9 работает в одной фазе, т.е.

всасывает рабочую жидкость из полости кольцевой канавки 33 и подает ее в полость кольцевой канавки 34. Эквивалентный рабочий объем аксиально-поршневого насоса 1 равный сумме всех эквивалентных рабочих объемов 10 цилиндров максимальный. Подача рабочей жидкости аксиально-поршневого насоса 1 максимальная.

Из полости кольцевой канавки 34 рабочая жидкость поступает по каналу 37 в полость сегментного паза 35, и в рабочие полости 23 блока цилиндров 19 аксиально-поршневого гидромотора 2. Поршни 22 выдвигаются, и, взаимодействуя с наклонной шайбой 24, поворачивают блок цилиндров 19 с втулкой 20 и солнечной шестерней 25 относительно оси ОГП. При движении поршней 22 внутрь блока цилиндров 19 рабочая жидкость из рабочих полостей 23 поступает в полость сегментного паза 36, и по каналу 38 в полость кольцевой канавки 33.

Приводной вал 5 вращает блок цилиндров 7, и, через промежуточный планетарный редуктор 3, промежуточный вал 18 с наклонной шайбой 24. В данном положении наклонной шайбы 11 приводной вал 5, промежуточный вал 18 с наклонной шайбой 24 и блок цилиндров 19 с солнечной шестерней 25 вращаются в одном, либо различных направлениях в зависимости от соотношения параметров гидропередачи. Солнечная шестерня 25 приводит во вращение сателлиты 28 и приводной вал 29 со скоростью вращения, определяемой передаточным отношением выходного планетарного редуктора 4.

$$n_{29} = n_5 \frac{1 - ki_3}{i_3 i_4}, \quad k = \frac{q_n}{q_m}, \quad (2)$$

где q_n , q_m – объем аксиально-поршневого насоса 1, аксиально-поршневого гидромотора 2;

k – коэффициент, характеризующий отношение объемов насоса 1 и гидромотора 2.

Мощность ведущего вала 5 передается ведомому валу 29 механическим и гидравлическим путями.

Для компенсации утечек рабочей жидкости в канал 40 подается рабочая жидкость из контура подпитки (не показан). При перегрузке ведомого вала 29 часть рабочей жидкости вытекает из канала 39 через предохранительный клапан в бак гидросистемы (не показаны).

При повороте ступицы 12 с наклонной шайбой 11 в подшипниковом узле посредством двигателя и червяка 13 на 90° против часовой стрелки плоскость симметрии полукольцевых пазов 31, 32 совпадает с плоскостью наклона шайбы 11. В данном положении наклонной шайбы 11 полость кольцевой канавки 34 является всасывающей, а полость кольцевой канавки

33 напорной. Эквивалентный рабочий объем аксиально-поршневого насоса 1 равный сумме всех эквивалентных рабочих объемов 10 цилиндров максимальный. Подача рабочей жидкости аксиально-поршневого насоса 1 максимальная.

Из полости кольцевой канавки 33 рабочая жидкость поступает по каналу 38 в полость сегментного паза 36, и в рабочие полости 23 блока цилиндров 19 аксиально-поршневого гидромотора 2. Поршни 22 выдвигаются, и, взаимодействуя с наклонной шайбой 24, поворачивают блок цилиндров 19 с втулкой 20 и солнечной шестерней 25 относительно оси ОГП. При движении поршней 22 внутрь блока цилиндров 19 рабочая жидкость из рабочих полостей 23 поступает в полость сегментного паза 35, и по каналу 37 в полость кольцевой канавки 34. В данном положении наклонной шайбы 11 приводной вал 5, промежуточный вал 18 с наклонной шайбой 24 и блок цилиндров 19 с солнечной шестерней 25 вращаются в одном направлении. Ведомый вал 29 вращается со скоростью:

$$n_{29} = n_5 \frac{1 + ki_3}{i_3 i_4} . \quad (3)$$

Мощность приводного вала 5 передается ведомому валу 29 механическим и гидравлическим путем.

Для компенсации утечек рабочей жидкости в канал 39 подается рабочая жидкость из контура подпитки (не показан). При перегрузке ведомого вала 29 часть рабочей жидкости вытекает из канала 40 через предохранительный клапан в бак гидросистемы (не показаны).

Параметры режима работы (1), (2), (3) гидродифференциальной передачи при $n_5 = 2100 \text{ мин}^{-1}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Скорость вращения ведомого вала n_{29} (мин^{-1})

i_3	k						
	против часовой стрелки			0	по часовой стрелке		
	1,0	0,6	0,2		0,2	0,6	1,0
1	2	3	4	5	6	7	8
$i_4 = 3,0$							
1,0	1400	1120	840	700	560	280	0
2,0	1050	770	490	350	210	-70	-350
4,0	875	595	315	175	35	-245	-525
$i_4 = 2,0$							
1,0	2100	1680	1260	1050	840	420	0

продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
2,0	1575	1155	735	525	315	-105	-525
4,0	1313	893	473	263	53	-368	-788
$i_4 = 1,0$							
1,0	4200	3360	2520	2100	1680	840	0
2,0	3150	2310	1470	1050	630	-210	-1050
4,0	2625	1785	945	525	105	-735	-1575
знак (-) – реверсирование ведомого вала 29							

Анализ показывает, что изменяя параметры ОГП можно получить нужный диапазон изменения скорости вращения ведомого вала при изменении подачи насоса. Так, например, при $i_3=i_4=1,5$ и $k=1,0$ обеспечивается диапазон изменения скоростей вращения ведомого вала $n_{29}=(2333\div-467)$ мин⁻¹, что совпадает с параметрами механических трансмиссий транспортно-тяговых машин.

При повороте наклонной шайбы 11 на 90° от нейтрального положения по часовой стрелке и против обеспечивается реверсирование подачи аксиально-поршневого насоса 1 переменной производительности при изменении ее от нулевого до максимального значений. ОГП обеспечивает передачу мощности приводного вала 5 на ведомый вал 29 двумя потоками: гидравлическим через рабочую жидкость и механическим через приводной вал 5, промежуточный вал 18 с наклонной шайбой 24 и блок цилиндров 19. Разделение потока мощности внутреннее.

Положительным фактором ОГП является относительно простая конструктивная схема, что может оказаться определяющим при разработке ОГП для привода ходового оборудования роботизированных систем специального назначения.

Литература

1. Петров, В. А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин / В. А. Петров. – М. : Машиностроение, 1988. – 248 с.
2. Котлобай, А. Я. Фазовое регулирование насосных установок машин инженерного вооружения / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело // Инженер-механик. – 2017. – №4 (77). – С. 10–176.
3. Гидродифференциальная передача: пат. 11227 U Респ. Беларусь, F 16H 61/44, F 15B 11/22 // С. И. Воробьев, О. В. Корзун, Т. Н. Саевич, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай; заявители С. И. Воробьев, О. В. Корзун, Т. Н. Саевич, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай. – № u 20160137; заявл. 2016.04.22; опубл. 2016.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 5.

4. Аксиально-поршневая гидромашинa: пат. 20980 С1 Респ. Беларусь, F 15В 11/22 // А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ю. Шляхтун, В. Ф. Тамело; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20131439; заявл. 2013.12.04; опубл. 2017.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 2.

5. Аксиально-поршневая гидромашинa: пат. 9326 U Респ. Беларусь, F 15В 11/22 // А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело, С. А. Позняк; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № u 20121179; заявл. 2012.12.28; опубл. 2013.06.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3.

6. Аксиально-поршневая гидромашинa: пат. 18365 С1 Респ. Беларусь, F 04В 1/12 // А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20111501; заявл. 2011.11.11; опубл. 2014.06.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3.

7. Аксиально-поршневая гидромашинa: пат. 21409 С1 Респ. Беларусь, F 15В 11/22 // А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20140247; заявл. 2014.05.02; опубл. 2017.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 5.

8. Гидродифференциальная передача: пат. 21410 С1, Республика Беларусь, F 16Н 61/44, F 15В 11/22 / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, Е. Н. Малец; Белорусский национальный технический университет. – № а 20140338; заявл. 2014.06.18; опубл. 2017.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 5.

9. Аксиально-поршневая гидромашинa: пат. 21749 С1 Респ. Беларусь, F 15В 11/22 // А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20150103; заявл. 2015.02.20; опубл. 2018.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2018. – № 2.

10. Гидродифференциальная передача: пат. 22682 С1, Республика Беларусь, F 16Н 39/10 / А. А. Поддубный, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, А. И. Герасимюк, А. М. Куксо; «Белорусский государственный университет транспорта», Белорусский национальный технический университет. – № а 20180149; заявл. 2018.04.20; опубл. 2019.08.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2019. – № 4.