

В порядке дискуссии

Рекуперативная система привода грузоподъёмных машин

Известно, что при коэффициенте полезного действия (КПД) силовых приводов грузоподъёмных механизмов, близком к 1, энергия для подъёма груза на высоту H равна энергии, получаемой от груза при опускании с высоты H , т.е. при наличии аккумулирующих устройств в их приводе на процесс подъёма груза в реальной машине (с возможностью аккумулирования потенциальной энергии при его опускании) требуется только компенсация суммарных потерь в этом приводе. В современных грузоподъёмных механизмах КПД составляет 0,65...0,8 (наибольшее его значение имеют механизмы, выполненные на базе симметричного гидроцилиндра, работающего в гидросистеме с замкнутым контуром циркуляции рабочей жидкости). Таким образом, по сравнению с существующими традиционными приводами грузоподъёмных механизмов машины с рекуперативной системой гидропривода будут эффективно работать от силовой энергетической установки мощностью в 3...5 раз меньшей.

Это особенно существенно для скоростных устройств большой грузоподъёмности, к которым например, относятся *грузоподъёмные лебёдки буровых установок*. Так, в современных буровых установках применяются мощные (сотни киловатт) исполнительные механизмы грузоподъёмностью 60–250 т и более. При этом процесс бурения требует частого и скоростного подъёма и опускания буровой колонны при наращивании или уменьшении её длины, т.е. проведения подъёмно-опускных операций в интервале вертикальных перемещений, равном 8...18 м (т.е. на длину ведущей трубы — квадрата или свечи). Так, при общей длине буровой колонны сотни метров время на подъём или опускание одного звена (труба 8...9 м или свеча 16...18 м) должно быть минимально, следовательно, скорость выполнения этих операций и мощность силового привода грузоподъёмного механизма должны быть значительны при традиционном исполнении грузоподъёмных устройств.

Очевидно, что рекуперативная система циклического привода (при выполнении операций опускание—подъём) должна включать в свой состав *аккумулятор соответствующей энергоёмкости*. В данном случае цикл работы составляет в среднем несколько минут, а энергоёмкость аккумулятора должна соответствовать работе, затрачиваемой при подъёме—опускании, например, колонны массой 100 т на величину вертикального перемещения 10 м. Следовательно, работа или накапливаемая энергия

$$A = 10 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 2,78 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Анализ существующих аккумуляторов (электрических, маховичных, грузовых, пневмогидравлических и т.д.) свидетельствует, что в данном случае они должны иметь очень большие размеры, а их стоимость и затраты на техническое обслуживание будут также велики. Наиболее приемлемыми в данном случае являются тепловые аккумуляторы, представляющие собой *теплоизолированную ёмкость с водой*. Система рекуперации должна преобразовывать потенциальную энергию положения груза при опускании в тепловую, а затем тепловую энергию — в механическую для привода грузоподъёмных устройств при подъёме.

Первая часть задачи решается с помощью дросселирования потока рабочей жидкости гидросистемы, переводящей потенциальную энергию положения груза при опускании в тепло рабочей жидкости на локальном гидравлическом сопротивлении. Наибольшая допустимая рабочая температура, например, жидкости ВМГЗ составляет 70°C. Минимальная рабочая температура в ёмкости с водой определяется способностью теплового двигателя усваивать тепловую энергию при заданной температуре. При использовании фреона R13 в качестве рабочего тела теплового двигателя минимальная рабочая температура может быть принята равной 30°C (критическая температура фреона 13 составляет 29°C). Следовательно, рабочий температурный диапазон воды в ёмкости для нор-

В.Ф. ЩЕРБАКОВ,
канд. техн. наук (МАДИ)

мального функционирования теплового двигателя

$$\Delta t = T_{\max} - T_{\min} = 70 - 30 = 40^{\circ}\text{C}.$$

Определим требуемую вместимость водяного бака на основании теплового баланса

$$\Theta = c_{\text{в}} m \Delta t,$$

где Θ – количество тепловой энергии ($\Theta = 10034,4$ кДж); $c_{\text{в}}$ – удельная теплоёмкость воды [$c_{\text{в}} = 4,181$ кДж/(кг·°К)]; m – масса воды.

Следовательно, необходимая масса воды $m = 10034,4 / (4,181 \cdot 40) = 60$ кг.

Таким образом, *тепловой аккумулятор* представляет собой *теплоизолированную (например, строительной пеной) ёмкость (вместимостью 60 л) с водой и двумя теплообменниками* – трубчатыми змеевиками для охлаждения рабочей жидкости гидросистемы и нагрева рабочего тела – фреона теплового двигателя. Из конструктивных соображений в качестве теплового аккумулятора выбираем теплоизолированную ёмкость объёмом 100 л.

Следующим компонентом рекуперативной системы является *тепловой двигатель* [1], работающий на запасённой тепловой

энергии в ёмкости с водой. В качестве базы теплового двигателя можно использовать *модернизированный автомобильный дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) типа ЯМЗ-236*.

Техническая характеристика двигателя ЯМЗ-236

Число цилиндров	6
Расположение цилиндров	V-образное с углом 90°
Диаметр цилиндра, мм	130
Ход поршня, мм	140
Рабочий объём цилиндра, л	11,5
Степень сжатия	16,5
Мощность, кВт (л.с.)	132 (180)
Максимальная частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	2100
Максимальный крутящий момент при частоте вращения 1250–1450 мин ⁻¹ , Н·м (кг·м)	667 (68)

В качестве *рабочего тела теплового двигателя*, но в замкнутом бестопливном цикле используем, например, *фреон 13*.

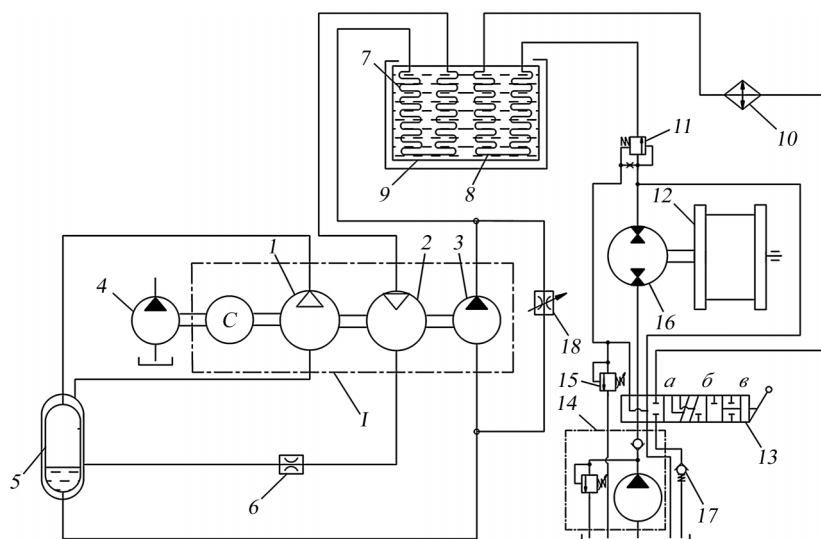
Теплофизические характеристики фреона 13

Температура кипения при давлении 100 кПа (1 кг/см ²), °С	-81,5
Критическая температура, °С	29,13
Критическое давление, МПа (кг/см ²)	3,9 (39)
Критическая плотность пара, кг/дм ³	1,75
Плотность насыщенного пара (при $t = -20^{\circ}\text{C}$), кг/дм ³	0,8
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·°К)	0,58

Модернизация используемого ДВС минимальна и связана с переводом его работы на бестопливный режим следующим образом.

- На поршнях делают проточки под уплотнительные кольца фирмы «Симрит».
- Распределительный вал заменяется, причём кулачки на нём делают с таким расчётом, чтобы один ряд поршней работал в режиме пневмомотора, а другой – в качестве компрессора.

Рекуперативная система привода на примере грузоподъёмной лебёдки (см. рисунок) создаётся по следующей схеме. Гидропривод лебёдки 12 выполнен на базе обратимой гидромашины 16 (радиально-поршневой высокомоментный насос-мотор), которая в зависимости от позиции гидрораспределителя-переключателя режимов работы 13 работает в режиме: гидромотора – подъёма груза (позиция а), реверса гидромотора – «принудительного» опускания груза (позиция б), гидронасоса – опускания груза с заданной скоростью и рекуперацией потенциальной энергии положения груза (позиция в). В последнем случае управля-



Принципиальная схема рекуперативной системы привода грузоподъёмной лебёдки: С – электростартер; 1 – ДВС ЯМЗ-236; 1 – компрессор; 2 – пневмомотор; 3 – насос фреона; 4 – насос гидросистемы привода установки; 5 – ёмкость для фреона (жидкая фракция); 6 – дроссель (эжектор); 7 и 8 – теплообменники соответственно теплового двигателя и гидросистемы привода; 9 – аккумулятор; 10 – дополнительный теплообменник (рабочая жидкость–воздух); 11 – предохранительный клапан непрямого действия; 12 – грузоподъёмная лебёдка; 13 – распределитель управления режимами работы; 14 – насосная установка; 15 – управляющий клапан основным предохранительным клапаном 11; 16 – насос-мотор (обратимая гидромашина); 17 – подпорный клапан; 18 – дроссель регулировки теплового двигателя

ющим клапаном 15 можно настроить необходимое давление открытия клапана 11. Гидромашина 16 работает в режиме насоса и на клапане 11 происходит перевод потенциальной энергии опускаемого груза в тепло рабочей жидкости. Затем рабочая жидкость, пройдя теплообменник 8, отдавая тепло воде соответствующего аккумулятора 9, поступает в дополнительный теплообменник 10 и затем снова — на вход гидромашин 16, т.е. в режиме насоса гидромашин 16 работает по замкнутому контуру циркуляции рабочей жидкости через предохранительный клапан 11. Охлаждение рабочей жидкости осуществляется теплообменником 8, а при недостаточном охлаждении в нём — дополнительным теплообменником 10. Насосная установка 14 компенсирует утечки в замкнутом контуре гидромашин 16, а подпорный клапан 17 обеспечивает бескавитационную работу радиально-поршневой гидромашин 16 в насосном режиме.

Данная схема работы гидромашин 16 на клапан 11 позволяет не только регулировать скорость опускания груза с помощью управляющего клапана 15 на пульте управления, но и обеспечивать требуемое усилие (давление) режущего инструмента колонны на грунт (данная часть гидросхемы на рисунке не показана).

Как видно, гидросхема переводит потенциальную энергию положения груза в тепловую энергию воды аккумулятора, которая снимается теплообменником 7 при реализации термодинамического цикла работы теплового двигателя.

Рассмотрим работу теплового двигателя. При пуске стартером С происходит прокрутка пневмомотора 2, компрессора 1 и топливного насоса 3. За счёт дросселя 6 и последующего расширения фреона температура последнего понижается до $-10...-20^{\circ}\text{C}$ и сжатый в компрессоре 1 парообразный фреон до давления 1 МПа сжимается в ёмкости 5. Топливный насос 3 подаёт фреон в теплообменник 7, где он нагревается более критической температуры, и обеспечивается за счёт расширения соответствующее давление 3,9 МПа и газообразный фреон под этим давлением направляется в пневмомотор 2, создавая требуемый момент на его валу. Скорость вращения такого двигателя определяется величиной момента сопротивления и степенью открытия дросселя 18 байпасной системы регулирования. При пуске теплового двигателя и на полной его мощности

дроссель 18 должен закрываться, а при его остановке — полностью открываться.

Таким образом, в тепловом двигателе обеспечивается полезное использование перепада (разницы) давления фреона при температуре более 29°C (критическое давление 3,9 МПа) [2] и давлении холодного фреона 1 МПа (при -10°C) при конденсации с помощью компрессора. Следовательно, рабочее эффективное давление в тепловом двигателе

$$\Delta p = 3,9 - 1 = 2,9 \text{ МПа},$$

что соизмеримо со средним эффективным рабочим давлением любого ДВС, в частности, ЯМЗ-236. При этом цикл работы пневмодвигателя значительно эффективнее, чем у четырёхтактного ДВС.

Таким образом, не смотря на то, что только половина цилиндров ДВС ЯМЗ-236 работает как пневмодвигатель, и что у компрессора существуют затраты на сжатие фреона, выходная мощность фреонового теплового двигателя будет значительно больше (почти вдвое) мощности традиционного двигателя ЯМЗ-236.

Мощность фреонового теплового двигателя может быть использована как для непосредственного привода каких-либо исполнительных механизмов рабочего оборудования, так и для силового привода грузоподъёмной лебёдки. В последнем случае реализуется замкнутая рекуперативная система, использующая потенциальную энергию положения груза, и следовательно, возможно иметь значительно меньшую мощность установленной энергетической установки машины в целом.

Список литературы

1. Щербakov В.Ф. Бестопливный тепловой двигатель с использованием возобновляемой энергии // *Строительные и дорожные машины*. 2008. № 1. С. 52–54.
2. Варгафик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей* М.: Наука, 1972.

СДМ

3