Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени Горного института. Том XXIV, 1950 г.

II. Горное дело

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОПРИВОДА К РУДНИЧНОМУ ПОДЪЕМУ

Проф. *Ф. Н. Шклярский*

Идея применения гидроэлектропривода к рудничному подъему возникла у автора настоящей статьи в 1944 г. В целях ее осуществления, по предложению автора и под его научным руководством, в 1945 г. была организована в Ленинградском горном институте исследовательская работа при участии доц. А. Е. Максимова в качестве ответственного исполнителя.

После получения теоретических и экспериментальных результатов исследования совместными усилиями научных работников кафедры горной электротехники ЛГИ и группы инженеров в 1947 г. была осуществлена первая в горной практике и гидроэлектрическая подъемная машина.

Принцип действия гидроэлектропривода состоит в следующем. Между постоянно вращающимся электродвигателем и машиной-орудием, в данном случае — подъемной машиной, вставлено гидрозвено — центробежная гидромуфта, благодаря чему в зависимости от степени заполнения гидромуфты рабочей жидкостью представляется возможным

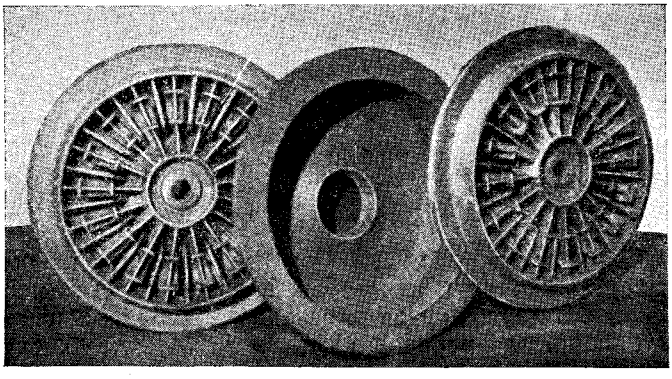


Рис. 1. Центробежная гидромуфта в разобранном виде. В середине — чаша, по бокам — рабочие колеса (роторы)

получать различные значения скорости подъема — от нуля до максимума.

Гидромуфта состоит из насосного и турбинного колеса (ротора), между которыми в собранном виде имеется зазор в 3—4 *мм*; чтобы ра-

бочая жидкость не выливалась, турбинное колесо охватывается чашей. Центробежная гидромуфта в разобранном виде представлена на рис. 1.

Насосное колесо гидромуфты насажено на ведущий вал постоянно вращающегося двигателя, а турбинное — соединено с ведомым валом машины-орудия, в данном случае с валом подъемной машины. При соответственном заполнении жидкостью (маслом, водой) рабочей полости гидромуфты получается вращение ее турбинного колеса с той или иной скоростью, зависящей от количества жидкости, поступающей в гидромуфту. Если рабочая жидкость не поступает в гидромуфту, ее насосное колесо, вращающееся с постоянной скоростью приводного двигателя, не передает движения турбинному колесу, и это колесо, а также ведомый вал подъемной машины, с которой оно соединено, будут находиться в покое. По мере постепенного увеличения количества рабочей жидкости, поступающей в гидромуфту, соответственно увеличится скорость турбинного колеса, а вместе с тем и ведомого вала подъемной машины. При полном заполнении рабочей жидкостью гидромуфты турбинное колесо, а вместе с ним и ведомый вал, будут вращаться с полной скоростью, отличающейся от скорости приводного двигателя на величину скольжения гидромуфты, составляющую 2—3%.

Благодаря идентичности конструкции насосного и турбинного колес [1] гидромуфта является механизмом обратимым. Поэтому передача мощности возможна как от двигателя к машине-орудию, так и в обратном направлении. Это свойство гидромуфты весьма ценно. Оно дает возможность осуществлять генераторный тормозной режим при спуске груза с возвратом энергии системе (в сеть).

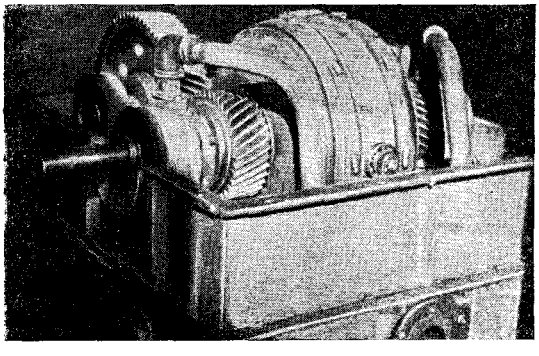


Рис. 2. Общий вид гидрозубчатого турбомеханического редуктора со снятой крышкой

Таким образом, в данной системе гидроэлектропривода электрическая коммутация управления подъемными операциями заменяется гидравлической.

Чтобы гидроэлектропривод можно было применить к уже существующим подъемным машинам, между подъемным двигателем и подъемной машиной поместили промежуточное звено — гидрозубчатый (турбомеханический) редуктор (рис. 2). Редуктор состоит из объединенных в общую конструкцию двух центробежных гидромуфт (посередине) — одна для переднего хода, другая для заднего; зубчатых передач (по бокам) соответственно для переднего и заднего хода; труб, служащих для подвода к гидромуфтам рабочей жидкости. Вся конструкция помещена в общий кожух, залитый до определенного уровня маслом. Этот гидрозубчатый редуктор рассчитан на мощность 100 *квт* при передаточном числе реверсивной зубчатой передачи 1 : 2 и скорости приводного двигателя 1500 об/мин.

---

[1] Эти колеса отличаются лишь числом лопаток: турбинное колесо имеет на две лопатки меньше, чем насосное.

Детали устройства гидрозубчатого (турбомеханического) редуктора и способ управления подъемной машиной видны на рис. 3, на котором представлен схематический продольный разрез редуктора и связь его с рычагом управления.

Ведущий вал *1* соединен шпонками с двумя насосными роторами *2*, к которым прикреплены чаши *3*. Чаши не дают рабочей жидкости выте-

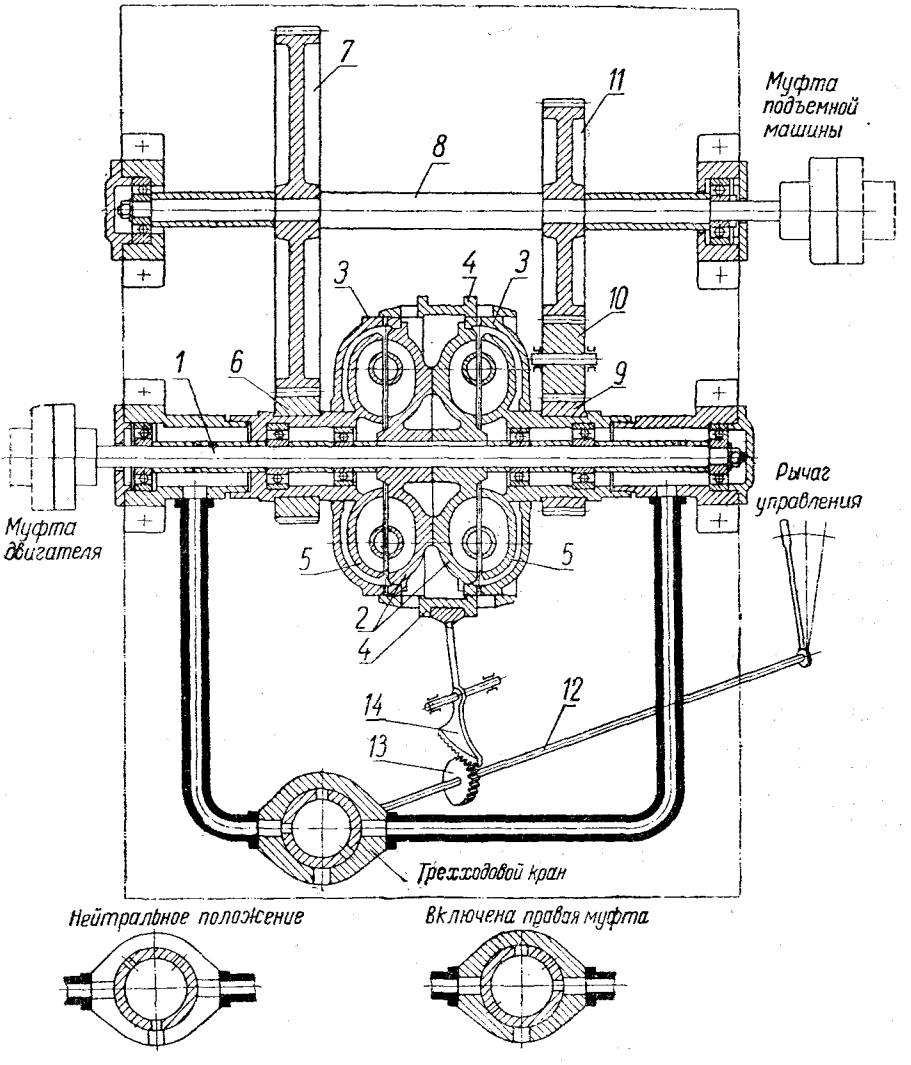


Рис. 3. Схематический продольный разрез гидрозубчатого редуктора и связь его с рычагом управления

кать. Снаружи они свободно обхватываются общим шиберным кольцом *4*, которое может перемещаться по их поверхности в осевом направлении.

Насосные колеса *2*, жестко соединенные с ведущим валом *1*, вращаются непрерывно вместе с приводным двигателем. Турбинные

колеса *5*, насаженные свободно на ведущем валу *1* на шариковых подшипниках, связаны шпонками с соответственными зубчатыми шестернями. Левый ротор *5* связан с шестерней *6*, которая сцепляется с зубчатым колесом *7*. Колесо заклинено на ведомом валу *8*, соединенном с валом подъемной машины. Правый ротор *5* связан с шестерней *9*, которая, в свою очередь, через паразитную шестерню *10* сцепляется с зубчатым колесом *11*, заклиненным на ведомом валу *8*. Таким образом, в зависимости от того, в которую из двух гидромуфт будет подаваться рабочая жидкость (масло), получится вращение ведомого вала *8* соответственно в ту или другую сторону.

Заполнение гидромуфт осуществляется при помощи небольшого питательного насоса [1], непрерывно подающего масло из нижней части кожуха через трехходовой кран, служащий для регулирования подачи рабочей жидкости в гидромуфты. Опорожнение гидромуфт достигается соответственным перемещением шиберного кольца *4*. Кольцо *4* устанавливают таким образом, чтобы имеющиеся в нем отверстия совпадали с отверстиями в чаше соответственной гидромуфты. Это дает возможность рабочей жидкости под действием центробежной силы вытекать из гидромуфты.

Управление трехходовым краном и шиберным кольцом осуществляется общим рычагом управления следующим образом.

Среднему положению рычага управления соответствует нейтральное положение трехходового крана. При таком положении рабочая жидкость из корпуса, в который заключен гидрозубчатый редуктор, перекачивается насосом обратно в тот же корпус, не попадая ни в одну из гидромуфт. Шиберное кольцо *4* при этом будет находится в среднем положении, при котором отверстия его совпадают с отверстиями чаш *3*, в результате чего гидромуфты окажутся опорожненными.

Машина приводится в действие соединенным с ней ведомым валом *8*. При этом рычаг управления выводится из среднего положения в соответственное крайнее. Например, при левом положении рычага управления (рис. 3) валик *12* поворачивает трехходовой кран в положение впуска рабочей жидкости в левую гидромуфту. Одновременно с этим валик *12* через зубчатую передачу *13—14* перемещает шиберное кольцо *4* вправо. В таком положении кольцо *4* перекроет отверстия левой чаши *3*, причем отверстия правой чаши *3* остаются открытыми. Таким образом, левая гидромуфта начнет заполняться рабочей жидкостью, правая же гидромуфта будет оставаться пустой. Левая гидромуфта в результате этого через свой турбинный ротор *5* и зубчатую передачу *6—7* приводит во вращение ведомый вал (а вместе с ним и барабан подъемной машины) с постепенно возрастающей скоростью, которая достигает максимального значения при заполнении объема левой муфты. Чтобы замедлить ход барабана, рычаг управления переводится из крайнего положения в среднее. Вследствие этого трехходовой кран и шиберное кольцо *4* перейдут в нейтральное положение, при котором гидромуфты окажутся опорожненными.

Перемещение рычага управления из среднего положения в противоположное крайнее (правое) положение обусловливает поворот трехходового крана в положение, при котором правая гидромуфта заполняется рабочей жидкостью. При этом приводится во вращение (посредст-

[1] Насос приводится в действие от особого электродвигателя. Мощность насоса составляет ~ 1% мощности подъемного двигателя.

вом зубчатых передач *9—10—11*) ведомый вал *8*, а с ним и барабан подъемной машины, в противоположном направлении.

При гидравлическом торможении «противовключением» (что практически может быть при завершении подъема в период замедления) необходимо заполнять жидкостью ту гидромуфту, рабочие колеса которой вращаются в противоположных направлениях. Эта операция осуществляется переводом рычага через среднее положение в другое крайнее положение.

Во время *спуска* груза в случае отрицательной статической нагрузки при торможении переставляют рычаг управления в крайнее положение, соответствующее направлению опускаемого груза. Под влиянием действия отрицательной статической нагрузки скорость турбинного колеса заполняемой гидромуфты будет возрастать и через некоторое время превзойдет скорость насосного колеса, после чего турбинное и насосное колеса поменяются ролями; вследствие этого энергия возвратится в систему за счет опускаемого груза, причем подъемный электродвигатель превратится в генератор, отдающий энергию в сеть. По окончании периода полного хода, чтобы осуществить период замедления и завершить подъем, можно применить гидравлическое торможение «противовключением», для чего необходимо рычаг управления, находящийся в соответственном крайнем положении, перевести через среднее положение в противоположное крайнее положение. Когда подъемные операции будут завершены, рычаг управления должен быть опять возвращен в среднее положение, а машина застопорена механическим тормозом.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что операции управления подъемной машиной сводятся в основном к быстрому переводу (без остановки в промежуточных положениях) рычага управления из среднего положения в соответственное крайнее положение и к перестановке этого рычага через определенный промежуток времени в среднее положение.

Следует при этом отметить, что независимо от применения в подъемных операциях гидравлического торможения той или иной системы подъемная машина должна быть снабжена механическим тормозным устройством, которое обязательно по правилам безопасности и без которого застопорить машину оказалось бы невозможным.

Также сохраняется вся нормальная предохранительная и защитная аппаратура подъемной машины, как-то: конечные выключатели, центробежные реле, максимальные и нулевые реле.

Следующие соображения приводят к выводу о необходимости применять в рассматриваемой системе гидроэлектропривода в качестве промежуточного гидрозвена центробежную гидромуфту, а не гидротрансформатор.

1. Гидромуфта при полном заполнении обладает жесткими характеристиками, обусловливающими практическую независимость скорости подъема от нагрузки, что дает возможность соблюдать заданную тахограмму при различных нагрузках.

Гидротрансформатору свойственны мягкие характеристики, при которых скорость в значительной степени зависит от нагрузки, ввиду чего при различных нагрузках будут иметь место различные тахограммы; последнее обстоятельство соответствующим образом влияет на скорость подъема, которая будет увеличиваться с уменьшением нагрузки, и, наоборот, уменьшаться с ее увеличением.

При более глубоких шахтах в случае неуравновешенной системы подъема, ввиду неуравновешенности канатов, при гидротрансформаторе

скорость в конце подъема может значительно повыситься и даже достигнуть недопустимых с точки зрения правил безопасности пределов.

2. Гидромуфта является механизмом обратимым, что, как указывалось выше, дает возможность получать генераторное гидравлическое торможение при спуске груза с возвратом энергии в сеть; гидротрансформатор между колесами (роторами) имеет особый направляющий аппарат; поэтому он не является механизмом обратимым и при спуске груза не дает возможности осуществлять генераторное торможение с возвратом энергии в сеть.

3. Гидромуфта, работающая вполне удовлетворительно не только при полном заполнении на автоматической характеристике с полной скоростью, но и при частичном заполнении на промежуточных характеристиках с пониженной скоростью, дает возможность удобно и достаточно устойчиво регулировать скорость, тогда как гидротрансформатор при частичном заполнении не обладает этим качеством.

4. Коэфициент полезного действия гидромуфты при номинальном режиме и полном заполнении достигает значения 0,97—0,98. При понижении скорости вращения ведомого вала к. п. д. ее уменьшается и в общем случае равен $1 - s$, где s — скольжение гидромуфты (турбинного колеса). Таким образом, в отношении потерь гидромуфта представляет полную аналогию с асинхронной машиной.

У гидротрансформатора номинальный к. п. д. достигает величины 0,90—0,91. При перегрузке и недогрузке к. п. д. гидротрансформатора значительно падает.

5. Гидротрансформатор, являясь гидравлическим преобразователем скорости и момента, дает возможность применять зубчатую передачу с меньшим передаточным числом, чем у гидромуфты, что является преимуществом гидротрансформатора. Если принять, что гидротрансформатор может дать передаточное отношение 1 : 10, то, пользуясь сравнительно тихоходным двигателем, вращающимся со скоростью 300—375 об/мин, можно было бы даже избежать применения зубчатой передачи вообще; однако при этом необходимо иметь в виду, что в указанном случае к. п. д. гидротрансформатора значительно понизился бы, вследствие чего общий к. п. д. подобной установки оказался бы ниже к. п. д. установки с гидромуфтой зубчатой передачи и быстроходного двигателя; кроме того, габариты гидротрансформатора с большим передаточным отношением значительно увеличились бы при одновременном усложнении его конструкции.

6. В отношении потерь энергии при операциях подъема системы с гидромуфтой и с гидротрансформатором в общем равноценны. Система с гидротрансформатором характеризуется постоянством мощности на ведущем валу в течение периода подъема без пускового пика, тогда как при системе с гидромуфтой диаграмма мощности аналогична диаграмме для асинхронного привода с уменьшенным, однако, пусковым пиком на $\sim 30\%$ за счет уменьшения влияния динамической составляющей в связи с тем, что при непрерывно вращающемся приводном двигателе масса его ротора не участвует в периодическом разгоне системы при осуществлении пусковых операций. При наличии мощных районных станций в связи с кольцеванием сети указанный пусковой пик мощности при системе с гидромуфтой практического значения не имеет.

На основании изложенного следует полагать, что гидротрансформатор, если и может быть применен к обслуживанию рудничного подъема, то только в случае наличия одного какого-нибудь режима при положительной статической нагрузке, что возможно, например, при скиповых

подъемах. Для клетевых подъемов общего назначения, которые должны обслуживать не только подъемы различных грузов, но и спуск их (причем желательно иметь генераторное торможение с возвратом энергии в сеть), гидротрансформатор неприменим, единственно же целесообразно пользоваться гидромуфтой с зубчатой передачей и с относительно быстроходным приводным двигателем.



Рис. 4. Общий вид подъемной установки с гидрозубчатым редуктором, с площадкой машиниста, барабанами и зубчатой передачей подъемной машины

На рис. 4 представлен общий вид подъемной установки с гидрозубчатым редуктором [1]. Там же видна площадка машиниста, барабаны и зубчатая передача подъемной машины.

На рис. 5 дан общий вид гидроэлектропривода подъемной установки, куда входят гидрозубчатый (турбомеханический) редуктор и приводный двигатель; справа виден питательный насос.

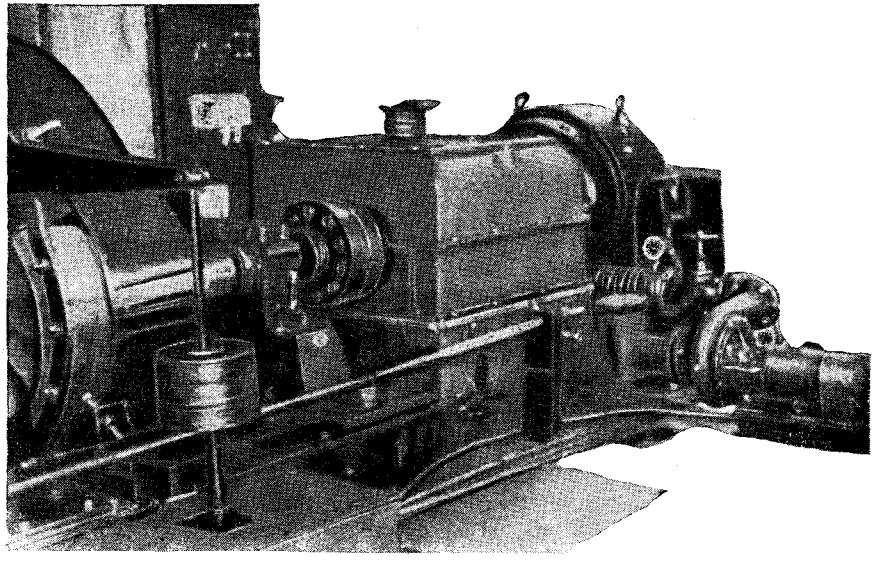


Рис. 5. Общий вид гидроэлектропривода подъемной установки, в состав которого входит гидрозубчатый редуктор и приводный двигатель; справа виден питательный насос

[1] В открытом виде этот гидрозубчатый редуктор представлен на рис. 2.

В случае замены в гидрозубчатом редукторе цилиндрической зубчатой передачи конической передачей получилась бы более удобная компоновка гидрозубчатого редуктора, при которой двигатель был бы расположен не по оси машины, как показано на рис. 4 и 5, а под углом 90° к указанной оси (рис. 6) со следующими обозначениями: *Б* — барабан подъемной машины; *З* — ее зубчатая передача; *Д* — двигатель; *К* —

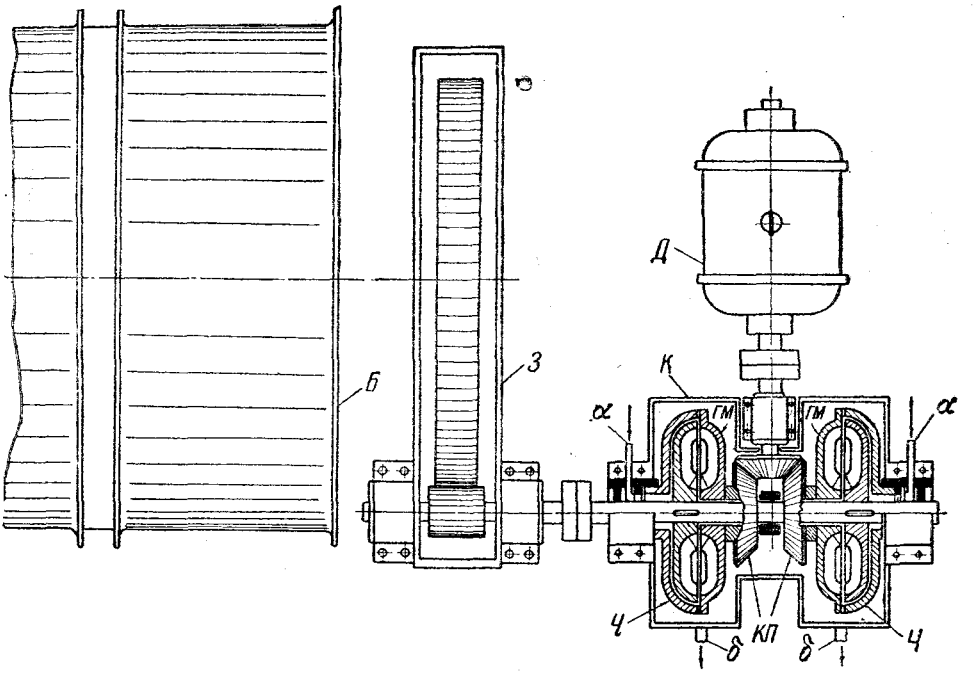


Рис. 6. Эскиз подъемной установки при конической зубчатой передаче гидрозубчатого редуктора. Подъемный двигатель расположен под углом 90° к оси машины

кожух гидрозубчатого редуктора, в состав которого входят: коническая зубчатая передача *КП* и гидромуфты *ГМ* с чашами *Ч*; *а* — трубки, по которым рабочая жидкость поступает в гидромуфты; *б* — трубки, по которым рабочая жидкость направляется к питательному насосу. При конической зубчатой передаче отпадает необходимость в паразитной шестерне для осуществления реверсии в существующей системе редуктора с цилиндрической передачей (на рис. 3 эта шестерня обозначена цифрой *10*).

При создании новых подъемных машин с гидроэлектроприводом было бы желательно вместо отдельного гидрозубчатого редуктора, помещаемого между подъемным двигателем и исполнительным органом подъемной машины, объединить все элементы гидравлической и зубчатой передачи в одну общую конструкцию. Это дало бы возможность иметь более компактную установку и повысило бы ее к. п. д. Схема подобной подъемной установки представлена на рис. 7 со следующими обозначениями: *Б* — барабаны подъемной машины, *Д* — подъемный двигатель, $З_{п}$ — зубчатая передача переднего хода, *З* — зубчатая передача заднего хода, *ГП* — гидропередача, $З_{пар}$ — паразитная шестерня.

На рис. 8 изображены диаграммы, построенные по показаниям приборов для подъемной установки с гидроэлектроприводом, работающей на одной из шахт, для режимов подъема и спуска груза. В продолжение периода $t_0 \cong 1$ сек., в течение которого происходит процесс заполнения

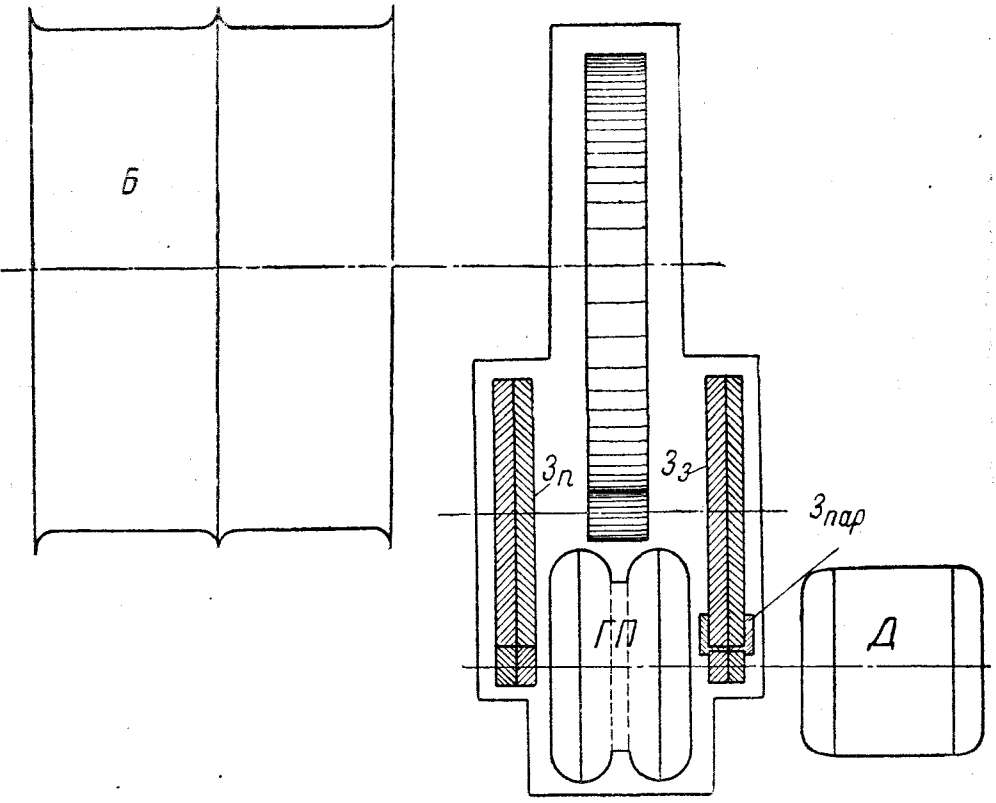


Рис. 7. Схема подъемной установки с объединенным гидрозубчатым редуктором

соответственной гидромуфты на 15—20%, система находится в покое; по истечении этого периода указанное частичное наполнение гидромуфты оказывается достаточным для получения надлежащего движущего усилия, в связи с чем начинается движение подъемной системы с постепенно увеличивающейся скоростью, которая достигает максимального значения по окончании наполнения гидромуфты. Этот процесс продолжается в течение периода t_1 [1].

По окончании периода полного хода t_2 в результате перевода рычага управления из крайнего положения в среднее происходит опорожнение гидромуфты, продолжающееся $\sim 0{,}5$—1 сек. После этого наступает период замедления t_3, осуществляемый при опорожненной гидромуфте.

Диаграмма мощности для режима подъема аналогична диаграмме при асинхронном приводе с той лишь разницей, что перегрузка привод-

[1] Следует заметить, что величина пускового ускорения, а следовательно, продолжительность пускового периода может регулироваться вентилем на маслопроводе, соединяющем питательный насос с трехходовым краном гидрозубчатого редуктора.

ного двигателя, а также потеря энергии в период пуска при системе с гидромуфтой меньше, чем обычно у асинхронных подъемных двигателей. Наряду с этим, в период паузы Θ имеются некоторые потери энергии, обусловленные непрерывным вращением приводного двигателя.

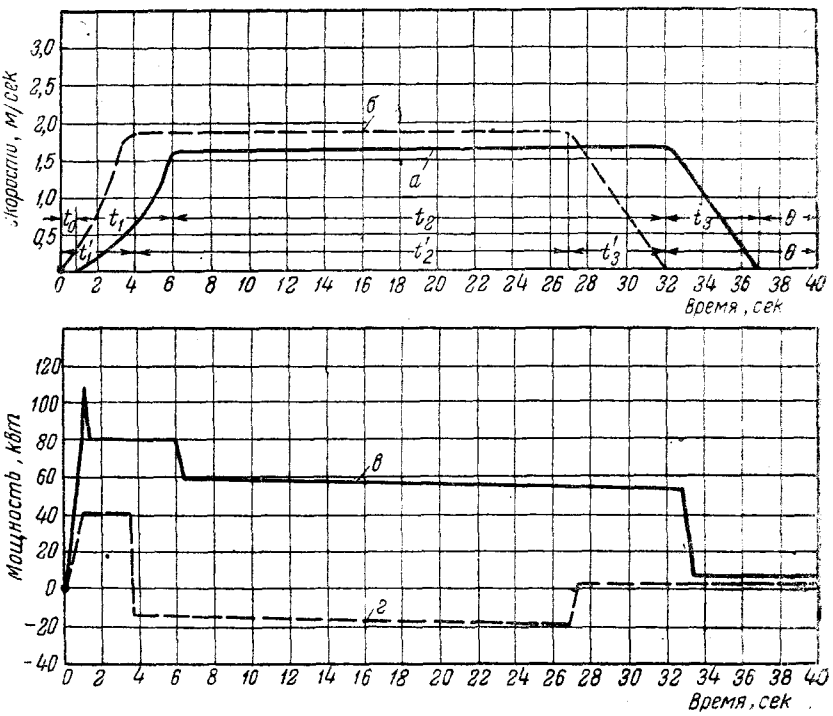


Рис. 8. Диаграммы, построенные по показаниям приборов для подъемной машины с гидроэлектроприводом, установленной на одной из шахт:

а — тахограмма при подъеме груза; **б** — тахограмма при спуске груза; **в** — диаграмма мощности, потребляемой из сети при подъеме груза; **г** — диаграмма мощности при спуске груза; t_0 — время, протекающее с момента перевода рычага управления из среднего положения в крайнее до момента трогания машины в ход; t_1 — период пуска; t_2 — период полного хода; t_3 — период замедления для режима подъема; t_1', t_2', t_3' — соответственные периоды пуска, полного хода и замедления для режима спуска; Θ — пауза

При режиме спуска груза период t_0, в течение которого подъемная система остается в покое при положительной статической нагрузке, отсутствует, так как под влиянием отрицательной статической нагрузки система после оттормаживания машины механическим тормозом сразу приходит в движение с возрастающей скоростью. В течение периода t_1 имеет место подгон системы при двигательном режиме приводного двигателя. После этого, с переходом скорости этого двигателя через синхронизм и превращения его в генератор, осуществляется в течение периода t_2 тормозной генераторный режим с возвратом энергии в сеть, при скорости спуска, превышающей скорость подъема на 5—6%. Период замедления t_3 осуществляется при помощи механического тормоза.

По сравнению с обычным приводом от асинхронного двигателя гидроэлектропривод в применении к рудничному подъему имеет следующие преимущества.

1. При постоянно вращающемся синхронном приводном двигателе имеется возможность значительно улучшить коэфициент мощности ($\cos\varphi$) шахтной сети, что для горных предприятий весьма важно. Примером может служить подъемная установка на одной из шахт, где до синхронизации подъемного двигателя средний коэфициент мощности по шахте составлял 0,6, а после синхронизации он повысился до 0,87.

2. Достигается снижение пусковых пиков мощности, причем ступенчатое электрическое управление заменяется главным гидравлическим.

3. Автоматизация пуска машины в ход осуществляется весьма просто.

4. Сглаживаются механические толчки и вибрации, устраняются перенапряжения в обмотках подъемного двигателя, улучшается вентиляция двигателя в связи с непрерывным его вращением, что способствует увеличению срока службы подъемной машины, канатов, двигателя.

5. Упрощается электрическая коммутационная схема в результате полной замены электрической аппаратуры управления подъемной машиной (реверсера, роторных электромагнитных панелей, магазинов сопротивлений, командо-контроллера) простой гидравлической аппаратурой, состоящей из гидромуфт с трехходовым краном и шиберным кольцом.

Гидроэлектропривод может быть выполнен на любые мощности. При этом, так как мощность, передаваемая гидромуфтой, пропорциональна ее диаметру в пятой степени, то с возрастанием указанной мощности габариты гидромуфты увеличиваются незначительно, что делает применение ее для подъемов больших мощностей (также с точки зрения общих размеров установки) весьма целесообразным.

Большое преимущество гидроэлектропривод имеет в применении к подземным лебедкам, работающим в атмосфере, опасной в отношении взрыва газа или пыли. Использование в качестве привода асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при наличии гидравлического управления подъемом дает совершенно безыскровую установку. При относительно продолжительных паузах во избежание непроизводительных потерь, обусловленных вращением приводного асинхронного короткозамкнутого двигателя, его можно выключать при помощи взрывобезопасного магнитного пускателя.

Стоимость подъемной установки гидроэлектроприводом не только не выше, чем такой же установки с обыкновенным асинхронным приводом, но при массовом изготовлении окажется ниже стоимости установки с асинхронным приводом. В отношении же простоты управления и ухода, а также возможности улучшения $\cos\varphi$, установка с гидроэлектроприводом имеет неоспоримые преимущества перед установкой с обыкновенным асинхронным приводом.

Необходимо указать еще на охлаждение рабочей жидкости—масла. Энергия скольжения при асинхронном приводе затрачивается на нагревание роторных сопротивлений (реостата); аналогично этому энергия скольжения гидромуфты затрачивается на нагрев масла, температура которого во время работы не должна превышать 70—80° С. В случае превышения при напряженной работе указанного предела необходимо принять меры к понижению температуры масла. Одним из средств для этой цели может служить, например, поверхностный обдув при помощи небольшого вентилятора, насаженного на ведущий вал перед гидрозубчатым редуктором. Опыт применения подобного вентилятора на одной из установок дал понижение температуры масла с 90 до 65°. Может быть применено также радиаторное охлаждение масла. Для указанной цели в зависимости от местных условий можно использовать и другие

способы охлаждения, например, при помощи змеевиков с охлаждающей водой [1], удлинения маслопроводов с вынесением их наружу и т. п.

На основании вышесказанного можно заключить, что совместными трудами научных сотрудников кафедры горной электротехники Ленинградского горного института и группы инженеров впервые в горной практике не только доказана возможность и целесообразность применения гидроэлектропривода к рудничному подъему при самых сложных режимах, включая подъем с *опрокидными* клетями, но и выявлены на деле в определенных условиях неоспоримые преимущества гидроэлектропривода по сравнению с обычным асинхронным приводом.

В заключение следует указать, что в 1948 г. заводом освоено серийное производство гидрозубчатых (турбомеханических) редукторов, которыми оборудованы все подъемные установки на шахтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Максимов. Гидроэлектропривод рудничных подъемных машин, «Горный журнал», 1948, № 11, стр. 37—40.
2. Описание конструкции и руководство по эксплоатации гидрозубчатого редуктора, изд. Механического завода, 1948.

[1] Аналогия с охлаждением электролита при жидкостных реостатах.