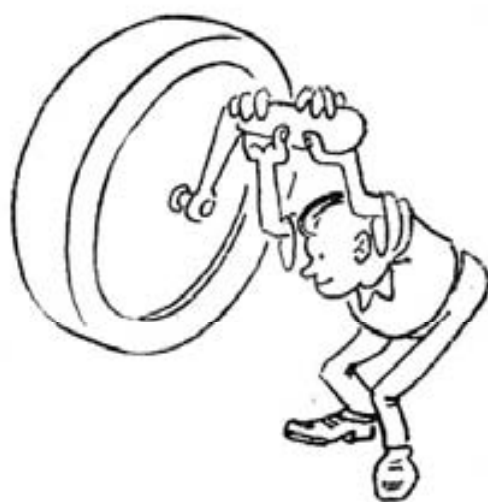


Н.В.Гулиа
МАХОВИЧНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Н.В.Гулиа

МАХОВИЧНЫЕ ДВИГАТЕЛИ



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1976

6П5
Г94
УДК 62—562 : 621.086

Гулиа Н. В.

Г94 Маховичные двигатели: М., «Машиностроение», 1976 г.

172 с. с ил.

В книге, написанной в популярной форме, рассказано о перспективных источниках энергии — маховичных двигателях.

Эти двигатели, являющиеся одновременно аккумуляторами энергии, особенно актуальны в связи с возрастающим загрязнением окружающей среды продуктами сгорания топлива в тепловых двигателях.

Описаны конструкции и принцип действия маховичных двигателей, приведены данные по их расчету и конструированию.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

Г 31300-126 126-76
038(01)-76

6П5

© Издательство «Машиностроение», 1976 г.

Вся жизнь есть Энергия . . .
Энергия — вечный восторг.

УИЛЬЯМ БЛЕЙК

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1929 г. английский археолог Леонард Вулли, производя раскопки Урского могильника в долине реки Евфрат в Месопотамии (территория современного Ирака), обнаружил массивный диск из обожженной глины диаметром около метра с круглым отверстием в центре. Близ периферии диска было и отверстие поменьше, в которое, по-видимому, когда-то была вставлена палка — рукоять. Наличие этого небольшого отверстия и решило судьбу диска — это был первый на Земле маховик, использовавшийся в качестве гончарного круга. Диск сидел на примитивной цапфе своим большим отверстием, а за рукоять его периодически раскручивал мастер. Массивный диск после раскрутки некоторое время вращался, расходуя накопленную кинетическую энергию, т. е. выполняя роль маховика. Гончар в это время обрабатывал стоящее на диске изделие. Был определен возраст этого первого маховика — его изготовили около 3500 лет до нашей эры.

Естественно, что древний гончар, пользуясь маховиком, и не подозревал, что его творение станет одним из самых перспективных двигателей через пять с половиной тысячелетий, в период невиданного расцвета науки и техники.

Чем же так перспективен инерционный или проще маховичный двигатель? Ведь сегодня его основные показатели все еще оставляют желать много лучшего. Дело в том, что современное развитие техники подготовило хорошую базу для резкого, можно сказать, качественного скачка полезных показателей этих двигателей. Они способны кратковременно развивать колоссальные мощности, недоступные другим двигателям. Трудно назвать двигатель, который был бы проще, надежнее и долговечнее маховичного. Экономичность маховичных двигателей чрезвычайно высока, так как, кроме того что маховичный двигатель имеет высокий к. п. д., он единственный из двигателей, который способен с большой эффективностью использовать (рекуперировать)

механическую энергию машины на спусках и при торможениях. И, наконец, нет двигателя, который в меньшей степени загрязнял бы окружающую среду вредными выделениями при работе.

Не стоит, наверное, даже упоминать о плачевной роли двигателя внутреннего сгорания в загрязнении атмосферы продуктами сгорания. Небезопасны в этом отношении и электрические силовые агрегаты с электроаккумуляторами: хотя вредные выделения их незначительны, при широком распространении этих аккумуляторов возникают новые проблемы. Маховичные же двигатели практически лишены каких-либо выделений при работе, что чрезвычайно важно с экологической точки зрения, очень актуальной в наше время.



Уже сегодня маховичные двигатели могли бы применяться с большей эффективностью, чем двигатели других типов, на общественном городском транспорте — автобусах и рельсовых машинах, внутризаводском транспорте, транспорте специального назначе-

ния — аэродромном, почтовом, прогулочном, рудничном и троллейном, в энергосистемах кратковременного действия, ручном инструменте и во многих других случаях.

А в перспективе! Сейчас трудно даже представить, какую роль в технике будущего будут играть маховичные двигатели.

Предвижу некоторое недоверие, даже скепсис читающих эти строки. Печальный опыт швейцарских гиробусов — маховичных автобусов, наших ветряков и транспортных машин с маховиками сделал свое дело — престиж маховичных двигателей был серьезно подорван.

А вместе с тем в США намечена к выпуску первая партия гиробусов для г. Сан-Франциско. Тщательные исследования научных центров — Университета им. Дж. Гопкинса, фирм «Локхид», «Юнайтед Эркафт Корпорейшн», опыты применения маховичных двигателей в Нью-Йоркском метрополитене, на автомобильных гибридах, летательных системах говорят совсем о другом — о несомненной перспективности маховичных двигателей. О том же говорят и исследования, проводимые Курским политехническим институтом в содружестве с рядом других организаций.

Но в целом — раздвоенность мнений, неопределенность.

Обходят маховичные двигатели осторожные конструкторы, закладывая в проект силовые установки для перспективных машин. Обходят их исследователи, ждущие «краткосрочно-диссертательных» тем для своего научного поприща. Обходят изобретатели и рационализаторы, желающие завтра же внедрить новшество. Обходят студенты и преподаватели, не имеющие

литературы по маховичным двигателям. И дело стоит. Правда, находятся энтузиасты среди ученых и конструкторов, руководителей и изобретателей, преданные идее маховичных двигателей, энергией и пылом которых уже кое-что сделано. Но как этого мало!

В одной из бесед с автором советский ученый-машиностроитель профессор Г. С. Маслов сказал, что для того «чтобы дать ход инерционным двигателям, прежде всего надо преодолеть инерционность взглядов».

Это побудило автора написать книгу об инерционных (маховичных) двигателях. Автора долго мучили сомнения — писать ли книгу о маховичных двигателях академичную, содержащую обильный теоретический материал, но для узкого круга специалистов, или же популярную, доступную широкому читателю. И выбор был сделан в пользу второй книги. Академик И. В. Петрянов-Соколов говорил: «По моему глубокому убеждению, будущее науки зависит не столько от специальной литературы, сколько от научно-популярной». Действительно, надо сперва доказать реальность маховичных двигателей, их перспективность, развеять мифы о тождественности их *perpetuum mobile*, зародить в душах читателей симпатию к маховичным двигателям и новые, беспокойные мысли.

Словом, проделать всю ту работу, преодолеть все те противоречия, что так неизбежны при становлении чего-нибудь нового, или вернее, хорошо забытого старого. А затем! Но... все по порядку.



ВВЕДЕНИЕ

Детство, отрочество, юность, итоги пройденного пути. Как уже было сказано выше, в 1922 г. Леонардом Вулли были предприняты раскопки в центральном районе Урского могильника. И здесь в 1929 г. он обнаружил изделие, которое теперь признается первым в истории человечества маховиком — двигателем, работающим на аккумулированной механической энергии.

Изделие это было обнаружено в гончарной мастерской, проработавшей несколько веков. Массивный диск диаметром более 30 дюймов (около 75 см) с центральным круглым отверстием насаживался на вертикальную стойку с подпятником, где свободно вращался с небольшим трением (рис. 1). Служил диск гончарным кругом, тем самым кругом, на котором древние гончары лепили свою продукцию и который, правда, не из глины, а из дерева встречался во дворцах фараонов Египта за 1000 лет до этого.

Так чем же примечателен диск древнего шумерского гончара? Настораживают здесь два факта: первый — зачем было выполнять диск таким тяжелым, когда по примеру египтян сделать его деревянным во много раз легче? Второй — близ периферии диска было проделано второе отверстие, куда вставлялась рукоятка. Для чего служила эта рукоятка?

Ответом могло быть только одно. Не будучи достаточно состоятельным, чтобы держать рабов, шумерский гончар, руководствуясь правилом «голь на выдумки хитра», сделал гениальное изобретение, открывшее новый этап в технике. Гончар периодически дергал за рукоятку, торчащую в диске снизу, разгонял диск-маховик, запасая в нем кинетическую энергию, а затем спокойно работал, пользуясь самостоятельно вращающимся «механизированным» кругом. И этот первый маховичный двигатель применялся еще в библейские времена, до изобретения транспортного колеса!

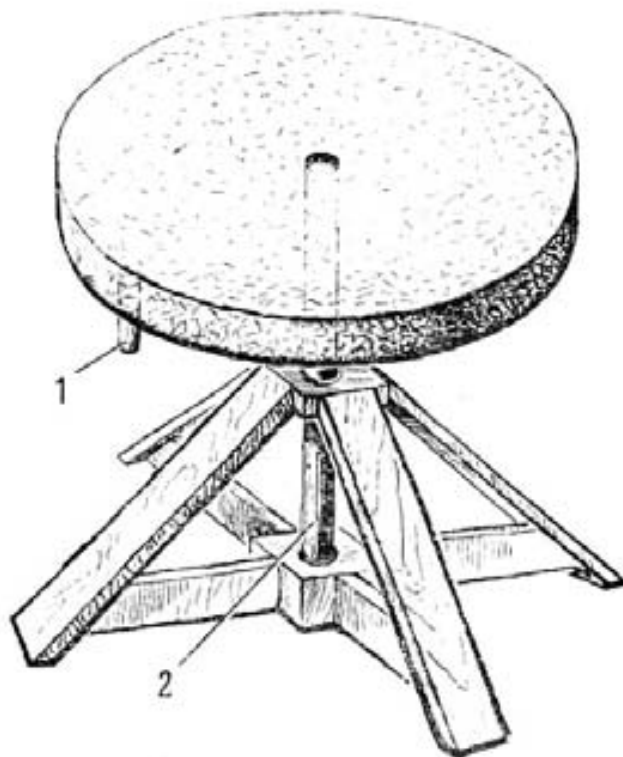


Рис. 1. Гончарный круг из раскопок Урского могильника:

1—маховик; 2—стойка

Более усовершенствованное, приводимое в движение ногами гончарное маховое колесо появилось лишь 1200 годами позднее на территории Желтой реки в Китае в гончарной мастерской Ланг Шан. Колесо это было уже каменное и имело существенно большую скорость вращения, чем маховик гончара: ноги-то в несколько раз сильнее рук и раскручивать маховик ногами было легче.

Следующий этап использования маховиков — водоподъемные устройства в Китае примерно 3000 лет назад. Долина реки Ло Хо, протекающей с севера на юг как приток Желтой реки, подвержена воздействию сильных ветров. Эти ветры сдували слой земли, образуя овраги глубиной до 70 м. Водоносные слои находились на 10—12 м ниже поверхности земли, и для орошения плодородных земель приходилось извлекать воду оттуда.

Для этого китайцы соорудили колеса, сидящие на горизонтальном валу, служащем кабестаном, на который навивалась веревка, несущая кожаные



ковши для воды. По периферии колеса располагались паруса; ветер, надувая их, вращал колесо, поднимая воду ковшами из источника. Было замечено, что если скорость колеса падает, то оно еще некоторое время вращается, поднимая ковши, пока они, перевесив, не начнут крутить колесо в обратном направлении. Для предотвращения этого два раба, скованные друг с другом, повисали на противоположной стороне колеса, ожидая нового порыва ветра.

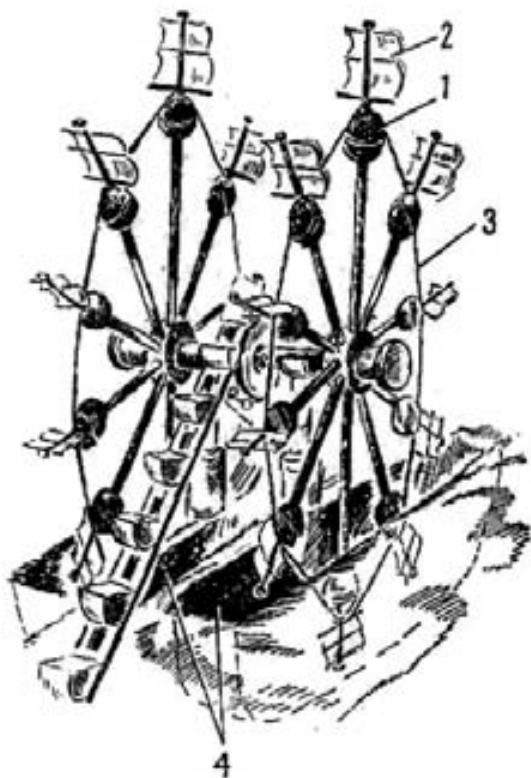


Рис. 2. Большое колесо Мандарина — гигантский маховик из древнего Китая (роль маховых масс играют привязанные к колесу тяжелые камни):
1—камни; 2—паруса; 3—трос;
4—траншея

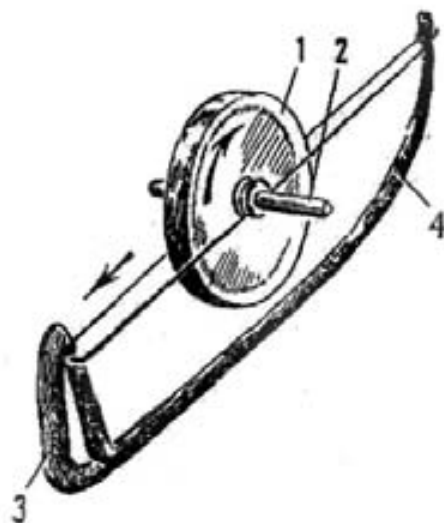


Рис. 3. Смычковая дрель с маховиком:
1—маховик; 2—ось; 3—рукоять; 4—смычок

Но случилось так, что рабов не стало (опять по бедности), и мастер, обслуживавший колесо, связав пару тяжелых камней, привесил их вместо рабов. Результат превзошел ожидания — налетевший порыв ветра раскрутил колесо вместе с камнями, и оно еще долго вертелось, поднимая сообразительному мастеру все новые и новые ковши с водой.

Стало быть, все дело в утяжелении обода колеса, превращении его в подобие маховика.

На этом принципе и было основано самое большое колесо, известное как гигантское колесо Пан По, существовавшее на закате цивилизации, носившей то же имя. Это большое колесо (рис. 2) «в четыре человеческих роста над землей и два — под землей», с бесконечной ковшовой цепью, качающей воду. Радиальные «спицы», на концах которых были помещены паруса, и тяжелые камни, укрепленные под ними, соединялись между собой хордальными распорками. Вал колеса, лежащий на деревянных втулках твердых пород, обильно смачивался водой, чтобы «вал плавал на воде» (так китайцы говорили о смазке подшипников водой). Изобретение подшипников с жидкой смазкой, связанное с осуществлением идеи маховика, было также чертой, значительно опережавшей техническую мысль той эры.

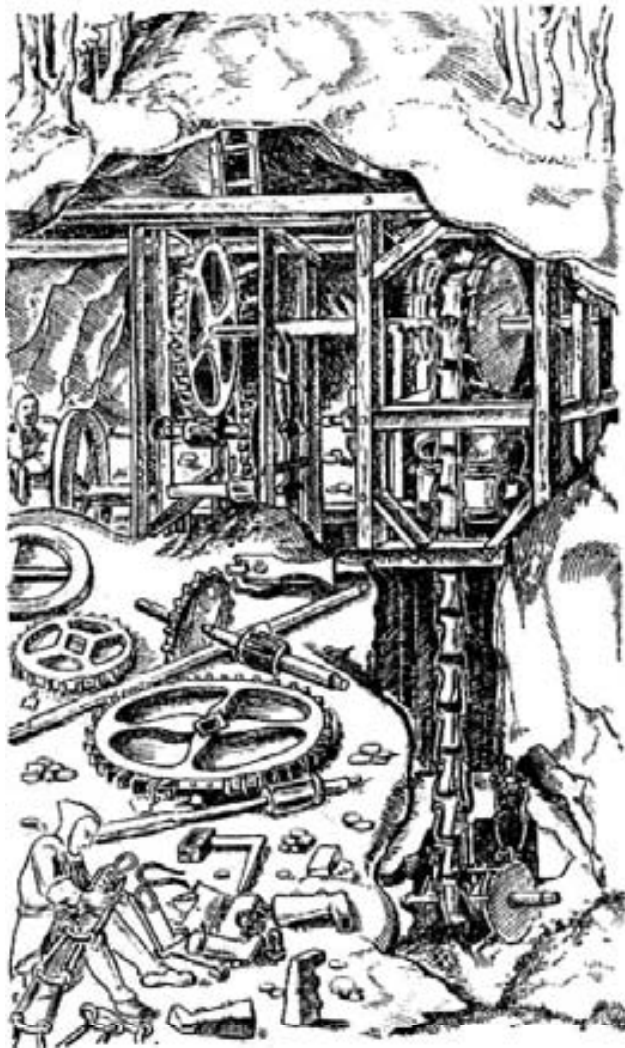


Рис. 4. Ковшовый водоподъемник с ручным приводом и маховиком (XVI век)

Принцип маховика использовался также в старинных смычковых дрелях (рис. 3). Здесь роль маховика играл тяжелый диск, насаженный на сверло, через которое, обвиваясь вокруг него, проходит тетива смычка. Двигая смычок взад-вперед, мастер, разгоняя маховик то в одну, то в другую сторону, мог, надавив на верхний конец сверла специальным твердым камешком с углублением, получить достаточно большое усилие сверления. Энергия, накопившаяся в маховике при разгоне, расходовалась на сверление при нажатии.

В последующие 3000 лет немного было сделано для развития идеи маховичного двигателя. Однако начавшееся в средневековье использование

механизмов, имеющих неравномерное вращение, особенно кривошипно-шатунных механизмов, возродило применение маховиков. Накапливая кинетическую энергию во время снижения рабочих нагрузок (или, например, удобном для человека положении рукоятки), маховик затем выделял ее для выполнения полезной работы. Кроме того, маховик уже тогда начинал служить для уменьшения неравномерности вращения.

Интересна конструкция водоподъемника с ручным приводом, выполненная почти целиком из металла. Этот механизм XV века был одним из первых, содержащих маховик в трансмиссии. На рис. 4 показан не только общий вид в сборе, детализировка, но и технология сборки и правила эксплуатации механизма (так раньше исполняли чертежи машин). Маховик виден на заднем плане как лежащий на земле, так и уже насаженным на вал рукоятки, которую крутит работник. Этот механизм описан средневековым ученым Г. Агрикола в его книге «De re metallica», изданной в Базеле в 1556 г.

Применялся маховик и в приводе поршневого насоса XV—XVI века; здесь он также приводится в движение мускульной силой человека (рис. 5).

Рис. 5. Маховик
в приводе насосов

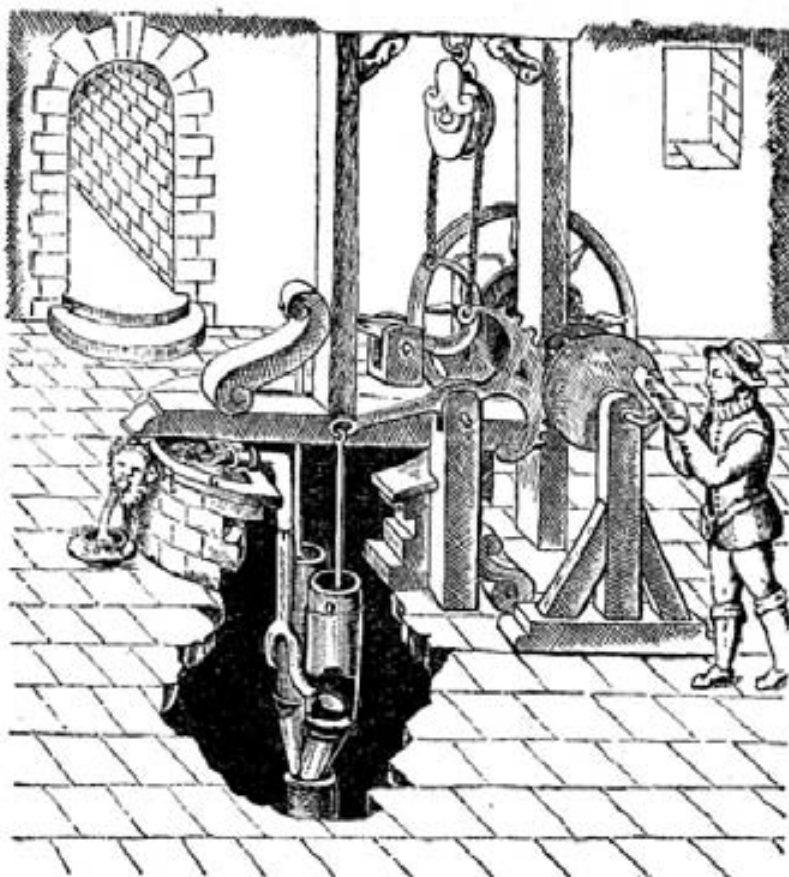


Рис. 6. Вододействующая
пильная установка
с маховиком
(XVI век)

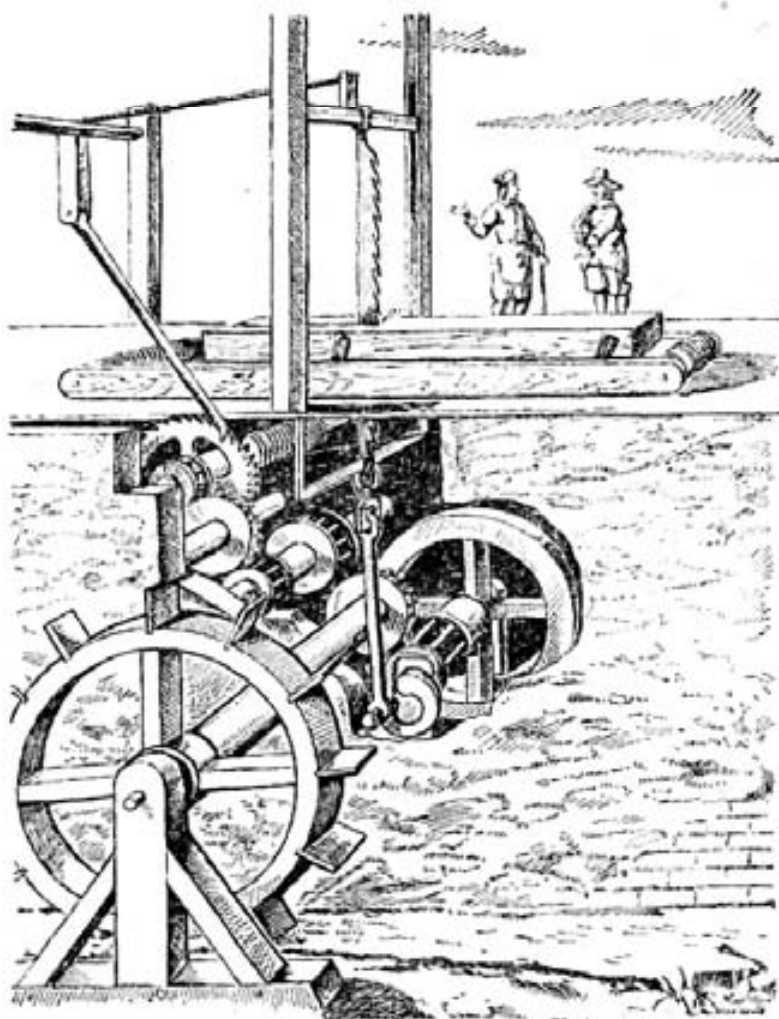
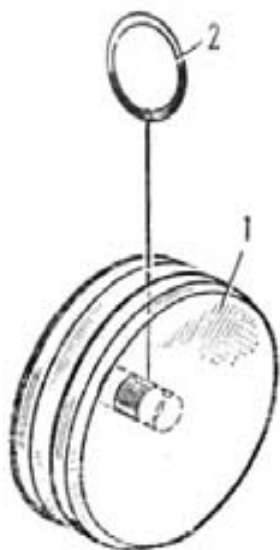


Рис. 7. Инерционная игрушка йо-йо:

1—маховик; 2—кольцо



Сравнительно крупный маховик применен и в вододействующей установке XVI века для распиливания бревен (рис. 6). Этот маховик устанавливался на коленчатом валу и служил для выравнивания хода машины.

С появлением паровых машин, а затем и двигателей внутреннего сгорания маховик стал неизменной их частью, где служил также для выравнивания хода машины. Таково же назначение маховика в разнообразных дробильных и ковочных машинах, прессах, механических ножницах и пр.

Однако такой режим работы не характерен для маховиков как двигателей, хотя именно для этих целей в мире выпускаются сотни миллионов самых различных маховиков. Нас интересуют такие режимы работы, когда за цикл работы (например, разгон и последующее выделение энергии для совершения работы) маховик сделает не менее 10 оборотов. Тогда его еще можно назвать двигателем. Так предложил поступать исследователь и конструктор маховичных устройств Роберт Кларк, речь о котором пойдет ниже. Однако он предложил ограничивать и время свободного вращения маховика семью сутками, чтобы маховик, не дай бог, не превратился в «вечный двигатель». Нам это опасение кажется излишним. Пусть превращается, если сможет. К тому же сейчас созданы подшипники с практически нулевым трением и, будучи помещен на таких опорах в вакууме, маховик будет вращаться очень долго, гораздо дольше недели, так и оставаясь маховичным, а не «вечным» двигателем.

Мы дали бы неполную биографию ранних лет маховичного двигателя, если бы упустили еще одно применение маховичных

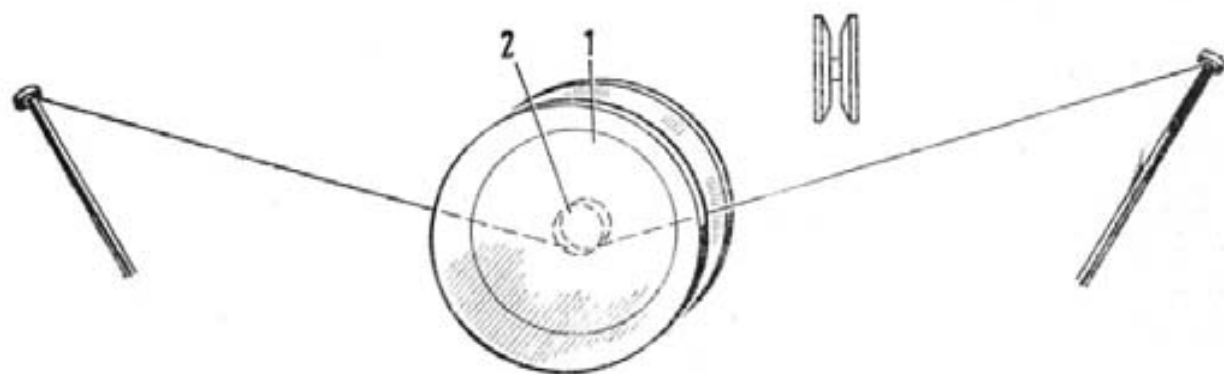


Рис. 8. Диаболо — инерционный реквизит древних и современных циркачей:

1—маховик; 2—ось

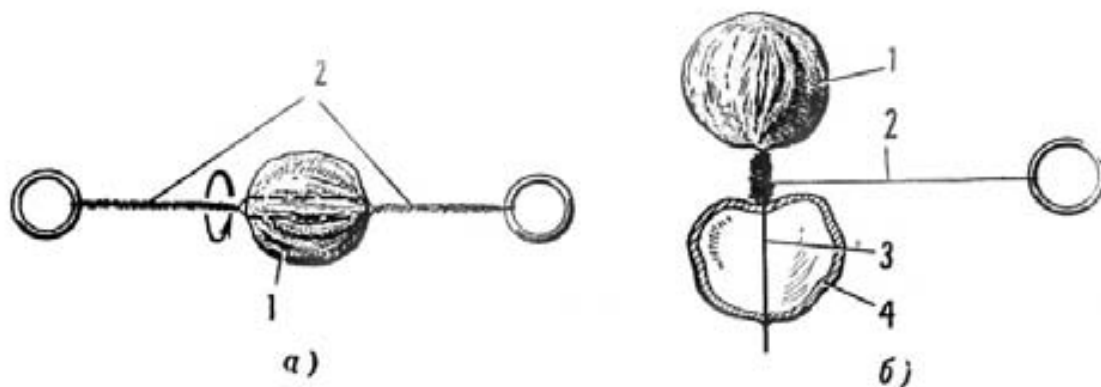


Рис. 9. Древние инерционные игрушки:

а—«полисудри» (распространена на Кавказе; маховая масса — крупный грецкий орех); б—кавказская игрушка также с использованием ореха (1—орех-маховик; 2—нить; 3—спица; 4—орех-подшипник)

двигателей — в игрушках. Игрушки с маховичными двигателями скорее не игрушки, а модели серьезных устройств. Так, например, всем известный инерционный автомобильчик стал прообразом гиробусов и других маховичных транспортных средств, маховичный вертолет — прообразом маховичных летательных машин, волчки — прообразом гироскопов, игрушка йо-йо — прообразом прибора — маятника Максвелла и т. д.

Самыми древними инерционными игрушками были, по-видимому, различные волчки. Волчок как игрушка достаточно широко распространен и сейчас. Он обычно приводится во вращение рукой и затем подстегивается плетью. Волчок демонстрирует одновременно два характерных свойства маховика: способность аккумулировать кинетическую энергию и сохранять положение оси вращения в пространстве — гироскопический эффект.

Более сложной игрушкой была йо-йо (рис. 7): маховик в виде диска с кольцевой прорезью подвешивали на нить; нить наматывалась на валик, образованный прорезью; второй конец нити удерживали в руках, и маховик предоставлялся свободному па-

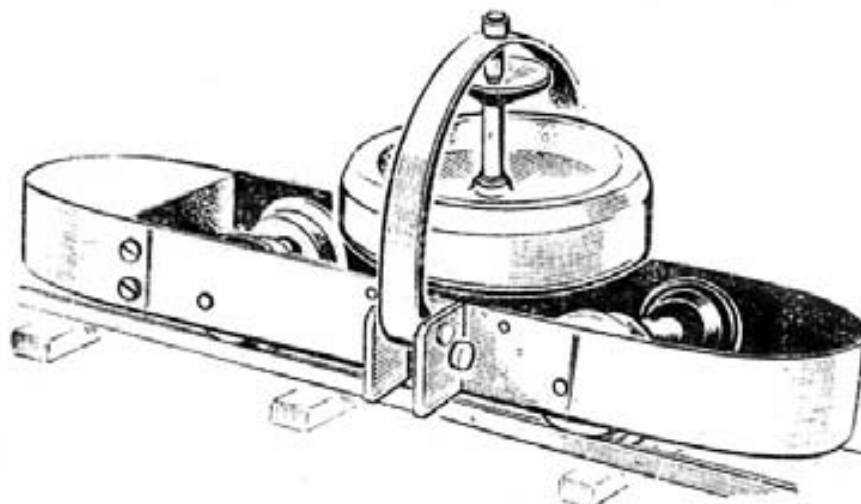


Рис. 10. Маховичный экипаж — игрушка

дению. Падая, он преобразовывал свою потенциальную энергию силы тяжести в кинетическую энергию поступательного и вращательного движения. При достижении нижней точки маховик получал такую угловую скорость, чтобы энергии, накопленной в нем, хватило для дальнейшего его подъема по нити. Эта игрушка была широко распространена в 30-х годах в США. По ее принципу действует хорошо известный прибор — маятник Максвелла.

Еще более сложная игрушка, требующая специальных навыков обращения с ней, — диаволо (рис. 8). Маховик диаволо приводится во вращение дерганьем шнура, и затем по приобретении достаточной скорости маховик подбрасывается и снова ловится на шнур. Диаволо использовался в основном цирковыми артистами.

Определенный интерес представляют также древние народные инерционные игрушки, распространенные преимущественно на Кавказе. Одна из них, называемая «полисудри» (рис. 9, а), крупный грецкий орех, в котором просверлены близко одно от другого два отверстия и через них пропущены нити, связанные по концам. Игрушку держат за эти концы, пропустив пальцы в петли. Для запуска орех, играющий роль маховой массы, закручивается на несколько оборотов; затем нить натягивается и, раскручиваясь, разгоняет орех. Последний накапливает кинетическую энергию, достаточную для того, чтобы закрутить нить в противоположном направлении. Периодическим дерганием нити орех раскручивается до 5—8 тыс. оборотов в минуту, издавая при этом характерное жужжание. Игрушка очень популярна у детей и в настоящее время.

Другая, менее распространенная игрушка (рис. 9, б), состоит из двух орехов: один насажен, например, на спицу и играет роль маховой массы, а другой — через него спица пропущена насквозь — роль подшипника. Игрушка удерживается в руке за этот второй орех, а первый разгоняется нитью, намотанной на спице. Накопленная кинетическая энергия позволяет закрутить нить на спице в обратном направлении. Так же, как и в первой игрушке, периодическим подергиванием за нить орех приводится в быстрое вращение.

Технически наиболее совершенными инерционными игрушками являются известные всем маховичные автомобили и им подобные. Маховичок игрушки раскручивается вращением ее по полу на колесах, а затем игрушка самостоятельно движется, расходуя энергию, накопленную в маховике (рис. 10).

И, наконец, следует отметить еще одну интересную инерционную игрушку — летающий пропеллер (рис. 11). Он представляет собой легкий обод, внутри которого помещены лопасти воздушного винта. При раскручивании пропеллер взлетает, и кинетическая энергия, накопленная в нем, расходуется на поддержание его полета в течение нескольких секунд. Построенный на

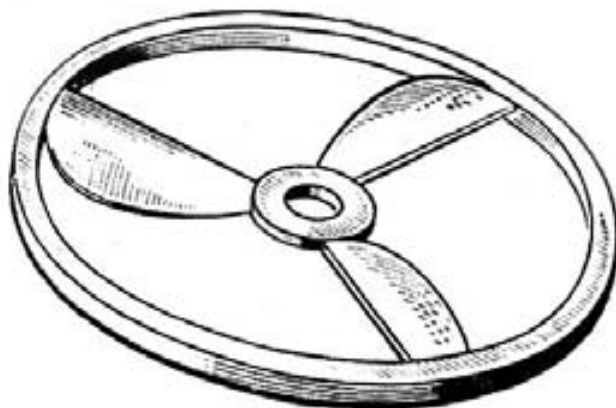
Рис. 11. Маховичный «летающий» пропеллер

этом принципе игрушечный вертолет совершает достаточно большие прыжки, используя для вертикального взлета кинетическую энергию маховика.

Итак, окончен ранний период развития маховичных двигателей. Пытливая мысль ученых и инженеров конца XIX и начала XX века создает много новых интересных и перспективных конструкций маховичных двигателей. Их строят, испытывают; они почти неизменно показывают хорошие результаты, но... продолжают оставаться на опытных или в лучшем случае весьма малочисленных конструкциях. Почему же? Потому, что идея маховичных двигателей, как это уже не раз случалось в технике, намного опередила не только научно-техническую базу, необходимую для их широкого применения, но и потребность общества в них. Применение маховичных двигателей связано с высоким уровнем цивилизации и культуры труда общества.

Ну, кому нужны были капризные «самобеглые тележки» Шуберского и Ланчестера, когда шло завоевание мира автомобилем? Кто заботился тогда об экономичности, кто думал о топливном кризисе, энергетическом голоде и глобальном загрязнении атмосферы выхлопными газами? Не столь нужно было это и в эпоху первых гиробусов (50-е годы нашего века), да и теми средствами нельзя было построить эффективный маховичный двигатель. Получилось так же, как и с реактивным движением, ракетами. Ракеты были известны еще в древнем Китае, великий Ньютон построил даже тележку, движущуюся реактивной струей пара. Движение ракет было прекрасно обосновано теоретически И. В. Мещерским и К. Э. Циолковским, но ни самих ракет, ни реактивных двигателей по существу еще не было. И вот настал золотой век реактивного движения. Развилась ракетная наука, невиданно преобразились конструкции, не имеющие ничего общего с древними ракетными шутихами.

Сейчас наступает век чистых и экономичных аккумуляторных двигателей, не исключена возможность, что и маховичных. Они нужны для победы Homo sapiens, человека мыслящего в его борьбе с грозящей всей цивилизации, всему живому на Земле опасностью, возникшей в результате его расточительного и бездумного в прошлом отношения к природе.





Кто не знаком с законами движения,
тот не может познать природу

ГАЛИЛЕЙ

ГЛАВА I

ФИЗИКА О МАХОВИКАХ

Главной и неотъемлемой частью маховичного двигателя, естественно, является маховик.

Состоит маховичный двигатель обычно из маховика с трансмиссией и ряда сопутствующих устройств. Сопутствующие устройства — это кожухи, ограждения, опоры, уплотнения, системы поддержания вакуума в кожухе и пр. Трансмиссия же у маховичных двигателей может быть одна, когда через нее производится раскрутка маховика и отбор мощности от него, или две (в редких случаях больше), когда разгон маховика и отбор мощности производятся через разные трансмиссии. Трансмиссии могут быть самыми разнообразными: механическими, электрическими, гидростатическими, гидродинамическими, пневматическими. Без трансмиссии обойтись трудно, но можно — в крайнем случае ее роль играет вал, рукоятка или тело самого маховика. Без сопутствующих устройств также можно обойтись. Например, в вакууме становится излишним герметичный кожух, уплотнения, системы поддержания вакуума. В невесомости можно обойтись (хотя бы временно) без опор. При отсутствии людей возле маховика становятся излишними ограждения и т. д. Конечно, лишь в исключительном случае можно представить маховичный двигатель, состоящий только из одного маховика. Например, этакий висящий в невесомости диск, разгоняемый вращающимся магнитным полем. Или газовым вихрем. Или просто руками.

Таким же образом производится и отбор энергии, идущей на создание магнитного поля, газового вихря или просто согревание рук в холодное время. Но уж без маховика маховичному двигателю, понятно, обойтись никак нельзя. Поэтому начнем с главного — с маховика, а именно: как накапливается в маховике та самая энергия, которая затем будет выделена им, как двигателем, на совершение работы.

ЖИЗНЬ В ДВИЖЕНИИ

Как известно из физики, любое движущееся тело является носителем кинетической энергии. Тела могут двигаться по-разному: поступательно, вращательно, произвольно в плоскости, вращаться вокруг неподвижной точки (как, например, волчок),

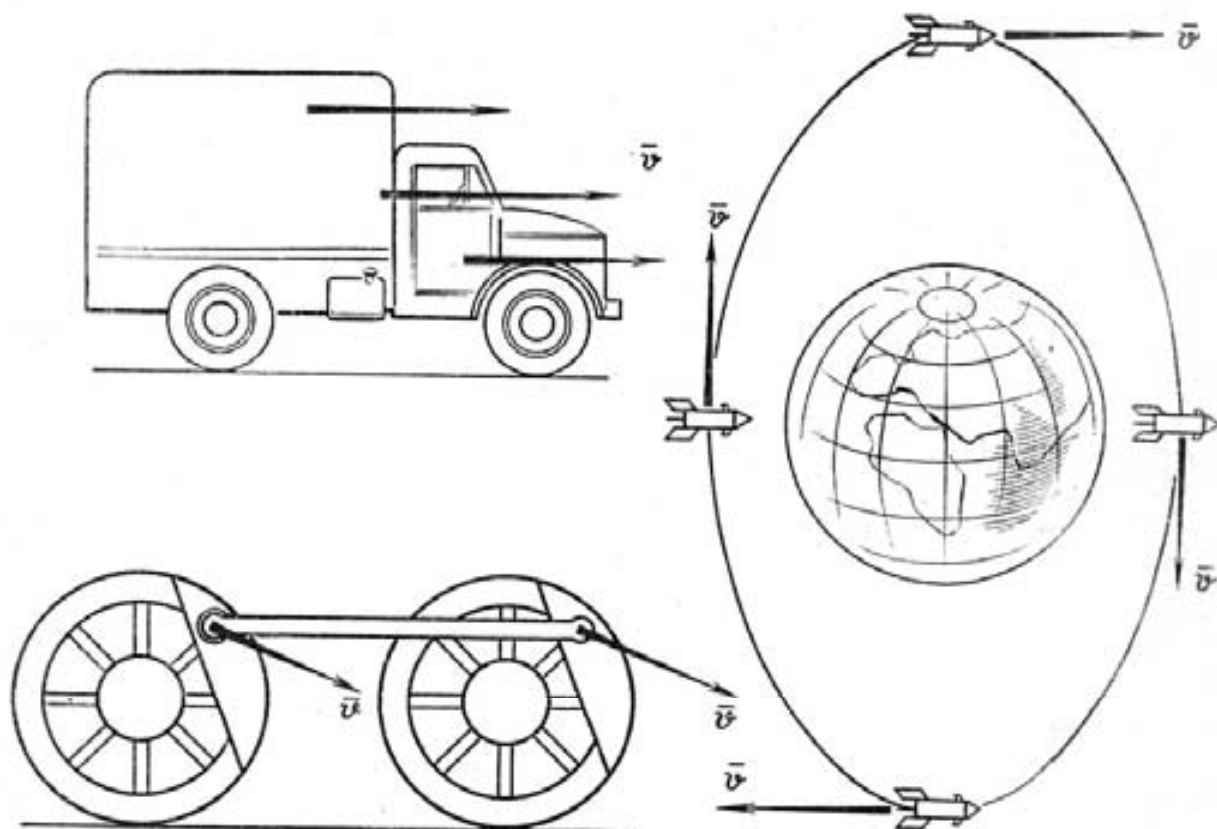


Рис. 12. Поступательное движение автомобиля, спарника и космического аппарата в невесомости (скорости всех точек этих тел совпадают)

двигаться произвольно в пространстве (как, например, космонавт в невесомости). Самый простой вид движения — поступательное. При этом все точки описывают одинаковые траектории, имеют одинаковые скорости и ускорения. Так движется, например, автомобиль по ровной дороге, спарник, соединяющий колеса паровоза, или космический корабль в состоянии невесомости — не вращаясь (рис. 12). Энергия T для поступательного движения тела пропорциональна массе m тела и квадрату скорости v движения

$$T = 0,5mv^2. \quad (1)$$

Если рассматривать движущееся тело как аккумулятор механической энергии, то для сравнения показателей лучше использовать не кинетическую энергию, а удельный показатель — удельную энергоёмкость или, как еще называют, плотность энергии. Этот показатель e представляет собой отношение кинетиче-

ской энергии тела к его массе и характеризует количество энергии, накопленной в единице массы аккумулятора. Для поступательно движущегося тела

$$e = \frac{T}{m} = 0,5 v^2. \quad (2)$$

Так, например, каждый килограмм массы автомобиля, движущегося со скоростью 100 км/ч, накапливает согласно формуле (2) 3850 Дж энергии; самолета, летящего со скоростью 1000 км/ч, в 100 раз больше — 385 000 Дж энергии, а космический корабль, имеющий скорость 10 км/с, — гигантскую энергию, равную 500 млн Дж!

Я уже не говорю об астероидах, имеющих еще большую скорость и энергию, растущую пропорционально квадрату скорости.

Вот идеальные аккумуляторы энергии, плотность энергии которых во много раз превышает не только плотность энергии лучших электрических аккумуляторов, но и плотность энергии самого горючего. Но... маленькая загвоздка. Как привязать к месту этот аккумулятор? Ведь нам нужен аккумулятор энергии, который находился бы, скажем, на автомобиле или на другой машине, а не сейчас в Москве, а через минуту — в Курске или Ленинграде. За ним не угонишься, а если попытаться это сделать, то сам превратишься в такой же аккумулятор!

Стало быть, надо как-то «привязывать» несущийся аккумулятор к неподвижной оси, а уж с нее и снимать энергию. Тут-то и появляются первые неприятности. Но, сказано — сделано, и мы, поймав на ходу, привязываем к оси гипотетической тонкой, невесомой, но очень прочной нитью длиной 1 м по килограмму массы автомобиля, самолета и космического корабля. Оказавшись привязанными, массы сразу же изменят свое бывшее движение и «заходят» по кругу, натягивая нить центробежной силой. Вот в этом-то натяге и вся трудность — очень уж большим он получается. Если просчитать центробежную силу $F_{ц}$, вызываемую движущейся по окружности радиуса $R=1$ м массой $m=1$ кг с принятыми ранее скоростями, то, учитывая, что

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R}, \quad (3)$$

один килограмм массы автомобиля натянет нить с силой 7,7 кН, килограмм массы самолета — 0,77 МН, а килограмм космического корабля и с вовсе безнадёжной силой — 1000 МН. Этого, конечно, не выдержит не только нить, но и самый прочный канат. А ведь мы считали нить невесомой. На самом же деле и она сама будет усиливать свой же натяг. Присмотревшись к формуле (3), можно как будто сделать обнадеживающий вывод, что, увеличив радиус, мы уменьшим центробежную силу, а стало быть, и натяжение нити. Увы, это только для невесомой нити. Для реальных конструкций маховиков как в виде дисков, так и



в виде стержней (а, оказывается, есть и такие!), напряжения в материале при вращении будут пропорциональны квадрату линейной скорости, т. е. накопленной кинетической энергии. Строго это будет доказано в гл. IV, а пока приведем лишь формулу для напряжений σ материала маховика плотностью ρ в виде кольца или тонкого обода (самая распространенная форма маховика)

$$\sigma = \rho v^2. \quad (4)$$

Как видим, радиуса кольца в формуле нет, значит напряжения во вращающемся кольце не зависят от его размеров, а только от плотности и квадрата скорости. Если вспомнить, что

$$e = 0,5v^2, \text{ а } v^2 = \frac{e}{0,5} = 2e,$$

то формула (4) примет вид

$$\sigma = 2\rho e. \quad (5)$$

Смысл ее таков: хочешь накопить больше энергии — во столько же раз увеличивай прочность материала маховика. Заранее скажу, что такие же по смыслу зависимости получаются для маховиков любой из применяемых форм.

Вернувшись снова к случаю вращающегося груза, привязанного к оси на невесомой нити, представим себе, что таких грузов не один, а несколько, много — n и вращаются они все вокруг той же оси на нитях различной длины — $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$, но все вместе, т. е. с равной угловой скоростью ω , описывая за один и тот же промежуток времени t равные углы φ (рис. 13). Линейная скорость каждого груза, как известно, равна $v = \omega h$. Тогда, подставив это в формулу (1) и просуммировав энергию для всех грузов получим

$$T = \sum (0,5m_k v_k^2) = \sum (0,5m_k \omega^2 h_k^2) = 0,5\omega^2 \sum m_k h_k^2. \quad (6)$$

Мы могли вывести ω^2 за знак Σ , так как договорились, что ω постоянна для всей системы грузов, а постоянный множитель, как известно, выносится за знак суммы Σ . Оставшийся под знаком суммы член $m_k h_k^2$ — произведение k -й массы на квадрат k -го радиуса — известен в механике как осевой момент инерции k -й точки — J_k . Момент инерции тела является количественной мерой инертности (т. е. легкости или трудности разгона) для вращательного движения, так же как масса тела — для поступательного. А сумма моментов инерции всех точек системы (или, что одно и то же, тела) равна моменту инерции всей системы или тела

$$\sum m_k h_k^2 = J.$$

Тогда

$$T = 0,5J\omega^2, \quad (7)$$

т. е. кинетическая энергия вращающегося тела пропорциональна моменту инерции этого тела относительно оси вращения и квадрату угловой скорости тела. Вот она энергия, запасаемая в маховике!

В самом общем случае движения (пример с космонавтом в невесомости) бывает так, что оно всегда складывается из поступательного движения со скоростью v и вращательного вокруг

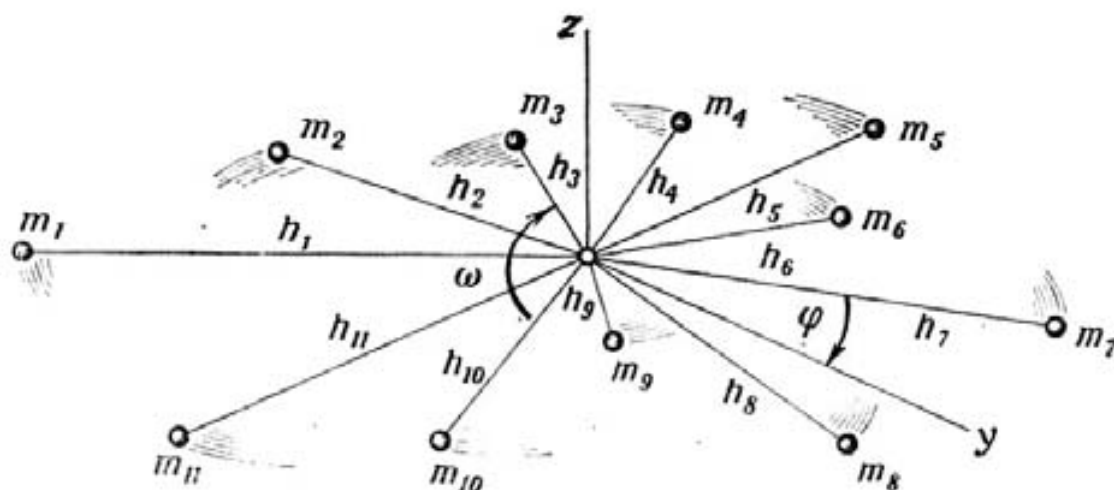


Рис. 13. Грузы m_1, m_2, m_3 и т. д. вращаются вокруг оси так, что нити длиной $h_1, h_2, h_3 \dots$ и т. д. описывают в равные промежутки времени t равные углы φ , т. е. с равной угловой скоростью ω

оси, пусть даже не неподвижной, с угловой скоростью ω . И кинетическая энергия такого тела T_0 равна сумме энергий в поступательном и вращательном движении:

$$T_0 = 0,5mv^2 + 0,5J\omega^2. \quad (8)$$

Плотность же энергии во вращающемся теле равна

$$e = 0,5 \frac{J}{m} \omega^2. \quad (9)$$

Обычно отношение $\frac{J}{m}$ для реальной формы маховика упрощается до одного коэффициента, о чем будет сказано в гл. IV.

Итак, зная, каким образом накапливается кинетическая энергия во вращающемся маховике, зададимся вопросом: до какого же предела можно «накачивать» в маховик энергию? Что мешает беспредельному повышению плотности его энергии? Ответ только один — прочность материала маховика. Повышая во сколько-нибудь раз плотность энергии маховика конкретной формы, мы должны расплачиваться таким же увеличением его прочности. В этом и заключается предел повышения плотности энергии маховика.

Изготовив, например, маховик — кольцо из стали при плотности ее $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$ и высчитав по формуле (5) напряжения в материале, получаем, что для плотности энергии 3850 Дж/кг (автомобиль) надо иметь кольцо прочностью не менее $0,6 \text{ кН/см}^2$, для плотности энергии 385 тыс. Дж/кг (самолет) — $0,06 \text{ МН/см}^2$ и 500 млн Дж/кг (космический корабль) — 78 МН/см^2 !

Так вот, современная техника может удовлетворить требованиям прочности материалов только для первых двух случаев. Материал же для создания гигантской плотности энергии 500 млн Дж/кг пока еще не создан. Но не стоит забывать, что только «пока». Весьма возможно, что пока пишутся эти строки, в лабораториях ученых испытывается мельчайший кристаллик материала, способного развить эту, на сегодняшний день кажущуюся огромной прочность. Но не только прочность влияет на плотность энергии маховика. Оказывается в маховиках, как и вообще во всем, самую тесную связь имеют...

ФОРМА И СОДЕРЖАНИЕ

Обычно говорят «содержание и форма», потому что в диалектике содержание определяет форму. В маховиках же наоборот (это, конечно, игра слов) форма определяет содержание: форма вращающегося маховика определяет, при прочих равных условиях, содержание в нем большего или меньшего запаса кинетической энергии. Одним словом, форма маховика и плотность энергии в нем зависят одно от другого. Если имеется конкретный материал, из которого надлежит изготовить маховики, то следует выбрать такую его форму, которая отвечала бы максимальной плотности энергии с учетом, конечно, ограничивающих условий, в основном, допустимой окружной скорости.

Рассмотрим основные формы маховиков (в поперечном сечении) в аспекте возрастания плотности энергии. Это же будет некоторым образом соответствовать и хронологическому аспекту, так как плотность энергии сама со временем только возрастает (рис. 14).

Как уже говорилось, первый из известных маховиков на Земле — гончарный круг из Урского могильника был выполнен в виде диска с центральным небольшим отверстием (рис. 14, а). Эта форма наиболее невыгодная среди дискообразных маховиков. Маховики такой формы накапливают наименьшую кинетическую энергию в килограмме массы, разумеется, при одной и той же прочности материала. В технике сегодняшнего дня еще встречаются маховики такой «архаической» формы там, где основным преимуществом маховика считается простота изготовления. Действительно, проще ничего не придумаешь: взял диск, просверлил отверстие, насадил на вал и — готов маховик. Однако материал (металл) здесь расходуется очень нерационально.

Сделав форму маховика более совершенной, можно из материала для одного маховика изготовить целых три с тем же запасом энергии каждый.

По мере развития техники конструкторы маховиков стали отодвигать всю массу на периферию, т. е. увеличивать отверстие в центре, приближая его диаметр к наружному диаметру маховика. Им, на первый взгляд, не откажешь в логике: относя почти всю массу на периферию, удаляя ее от центра, мы увеличиваем момент инерции маховика, делая его максимально возможным. А это, в свою очередь, при одной и той же угловой скорости, если вспомнить формулу (7), обеспечивает максимальную кинетическую энергию. Так была получена более рациональная форма маховика — тонкий обод со спицами (рис. 14, б). Долгое время, почти до начала нашего века такая форма маховика считалась пределом совершенства. Было только одно досадное обстоятельство — спицы маховика ослабляли конструкцию. Почему это происходило? При вращении обод, будучи упругим телом, расширялся под действием центробежных сил. Спицы же, располагаясь ближе к центру, удлинялись не настолько, чтобы «поспевать» за ободом, и в результате начинали неравномерно «стягивать» его (примерную картину деформации маховика со спицами см. на рис. 15, а). Спицы также подвергались растягивающему действию обода и могли лопнуть. Однако выход был найден: спицам придали изогнутый вид (см. рис. 15, б), жесткость их была во много раз снижена, и спицы стали «следовать» за расширяющимся ободом, не нагружаясь сами и не нагружая собою обода. Таким образом, обод «работал» почти как «чистое» кольцо, ничем не связанное с центром. Это понятие «чистого» кольца или обода, работающего независимо от центра, играет существенную роль для маховиков и еще пригодится нам в дальнейшем.

Итак, мы как-будто достигли совершенства — отодвинули всю массу маховика на периферию, максимально увеличили момент инерции, избавили обод от вредного действия спиц. А что, если это «вредное» действие не так уж вредно? Ведь спицы изгибают обод неравномерно только потому, что они прикрепляются к нему в нескольких точках. Если же спиц сделать очень много, то их изгибающее действие практически исчезнет, и они будут лишь «поддерживать» обод, частично разгружая его от напряжений, вызванных центробежными силами. В пределе увеличение числа спиц привело к замене их диском и возникновению маховика новой формы — обода с диском (см. рис. 14, в).

Поначалу, конечно, были споры — диск, хотя и «поддерживает» обод, но весит больше, чем спицы. Что выгоднее — увеличивать прочность обода, но и вес маховика, или иметь меньшую прочность, но и меньший вес.

Попробовали — отлили маховики из одного и того же материала, взвесили, раскрутили до разрыва в специальной бронированной камере и, измерив количество накопленной энергии в мо-

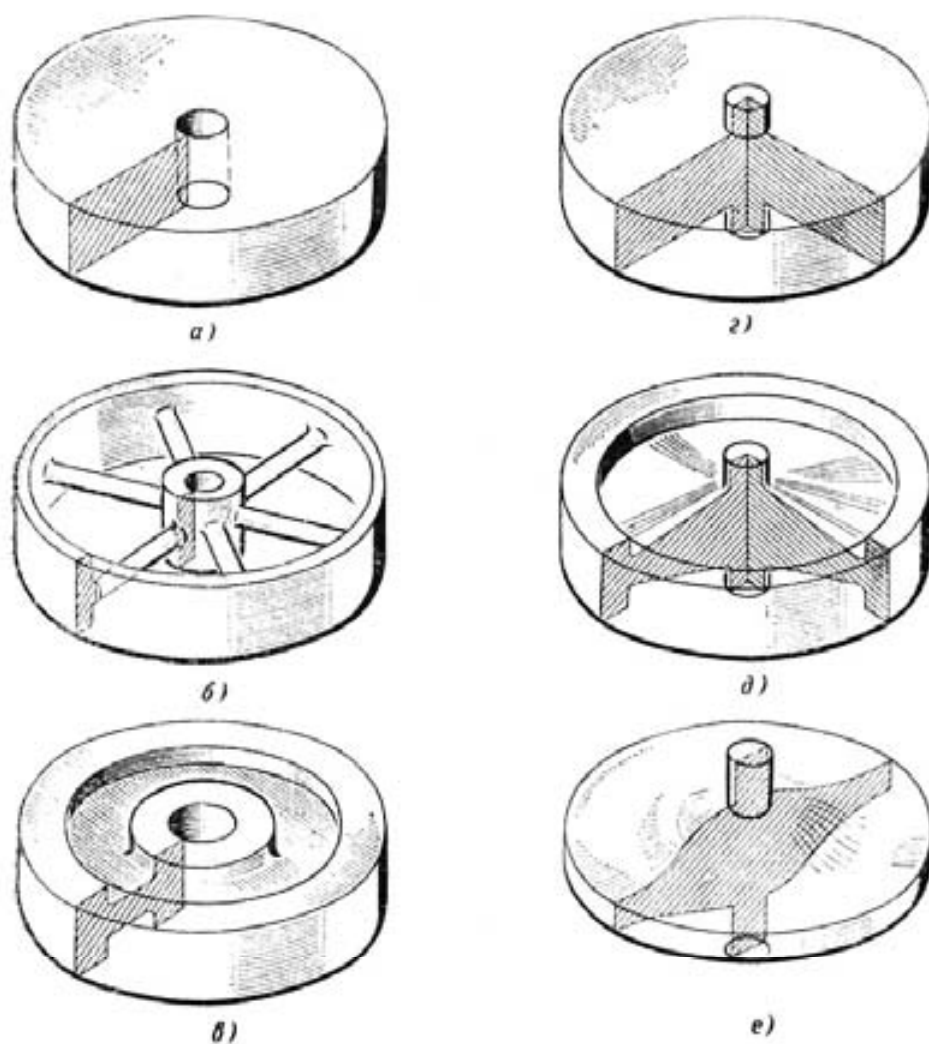


Рис. 14. Формы маховиков дискового типа:

а—диск с отверстием; *б*—обод со спицами; *в*—обод с диском; *г*—диск без отверстия; *д*—равнопрочный диск с ободом; *е*—равнопрочный диск без обода

мент разрыва, поделили его на массу маховика. Полученная величина плотности энергии однозначно подтвердила преимущества обода с диском. Маховики такого типа надолго завоевали первенство и применялись в конце прошлого — начале нашего века для накопления весьма больших энергий (например, в боевых торпедах).

Насколько же прочным должен быть диск, поддерживающий обод? Ведь если мы изготовим его равным по толщине самому ободу, то получим ту самую невыгодную форму гончарного круга, от которой мы не так давно отреклись. Где же истина? Для нахождения ее насадим маховик самой невыгодной формы в виде диска с небольшим отверстием на вал разгонной машины и с помощью скоростной кинокамеры попытаемся установить, как происходит его разрыв.

Мы замечаем, как маховик, раскручиваясь, увеличивается в диаметре (конечно, на очень малую величину). Особенно увели-

чивается внутреннее отверстие, оно стало даже больше диаметра вала, на который маховик был насажен, и вал стал проскальзывать в отверстии. Наступили, как говорят, «освобождающие» числа оборотов маховика, очень опасные тем, что маховик может сойти с запрессованного вала и, «освободившись», наделать много бед. Но мы вовремя заметили это и, остановив машину, приняли меры — посадили маховик на конический вал, более туго запрессовали вал в отверстие и снова начали разгон. О чем же говорит преимущественное расширение отверстия? О том, что напряжения на его внутренней поверхности максимальны. И действительно, мы замечаем, как с дальнейшим увеличением частоты вращения на внутренней поверхности отверстия начинают возникать трещинки и... пора прихватывать с собой кинокамеру и спасаться, если, конечно, мы успеем это сделать за считанные микросекунды. Сильнейший взрыв и тяжелые осколки, пробивающие даже стены и междуэтажные перекрытия вплоть до крыши, известили нас о том, что удалились мы вовремя. Итак, вывод — во всем виновато отверстие в центре!

Срочно изготавливаем маховик новой формы — уже без отверстия (см. рис. 14, г) и, испытав его на разрыв, убеждаемся, что мы не ошиблись. Новый маховик накопил энергии точно вдвое больше, чем такой же по размерам и массе диск из того же материала, но... с микроскопическим, не видимым даже глазу отверстием в центре!

Итак — парадокс. Тонкий обод, представляющий собой диск с очень большим отверстием, достаточно выгоден как маховик; на определенном этапе это был даже предел мечтаний. Умень-

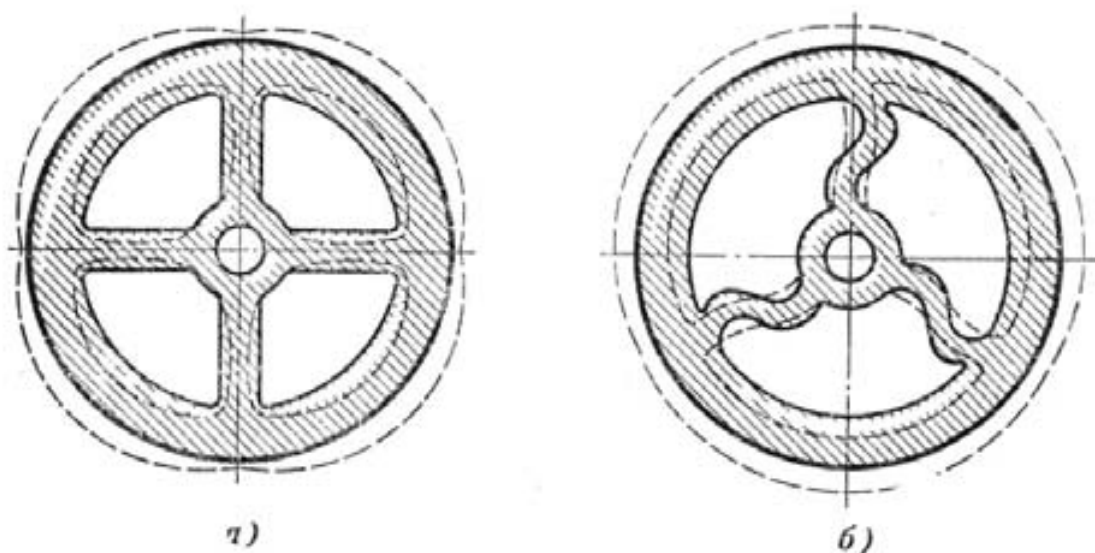


Рис. 15. Утрированная схема деформированного при вращении обода со спицами:

а — неравномерный изгиб обода при растяжении спиц; б — изогнутые спицы при растяжении обода слегка выпрямляются, не оказывая существенного влияния на изгиб обода



шая отверстие, мы ухудшаем показатели плотности энергии маховика тем сильнее, чем меньше отверстие. И вдруг, заделав его совсем, получаем скачкообразный рост плотности энергии и не чуть-чуть, а вдвое больше, чем у самого тонкого обода. Где же разгадка этого явления? Оказывается, все дело в том, что мы просто не можем иметь вращающийся диск с бесконечно малым отверстием в центре. Аналогия — резиновая пленка (рис. 16). Если она не напряжена, пожа-

луйста, можно проделать иглой, искрой или лазером сколь угодно малое отверстие. Но стоит натянуть эту пленку (например, надев ее с натягом на горлышко банки), то никакими ухищрениями мы не сможем проделать там очень малого отверстия — оно сразу же расширится и еще хорошо, если не разорвется вся пленка. Так и с вращающимся маховиком. Разница между маховиком — диском без отверстия и с самым малым отверстием такая же, как и между резиновой пленкой без отверстия и с ним. На внутренней поверхности отверстия возникает, как говорят, «концентрация напряжений», и прочность диска падает вдвое. А с нею во столько же раз и плотность энергии.

Получив опыт в том, что чем ближе к центру вращающегося диска, тем больше напряжен материал, конструкторы маховиков стали «убирать» лишний материал маховика без отверстия там,

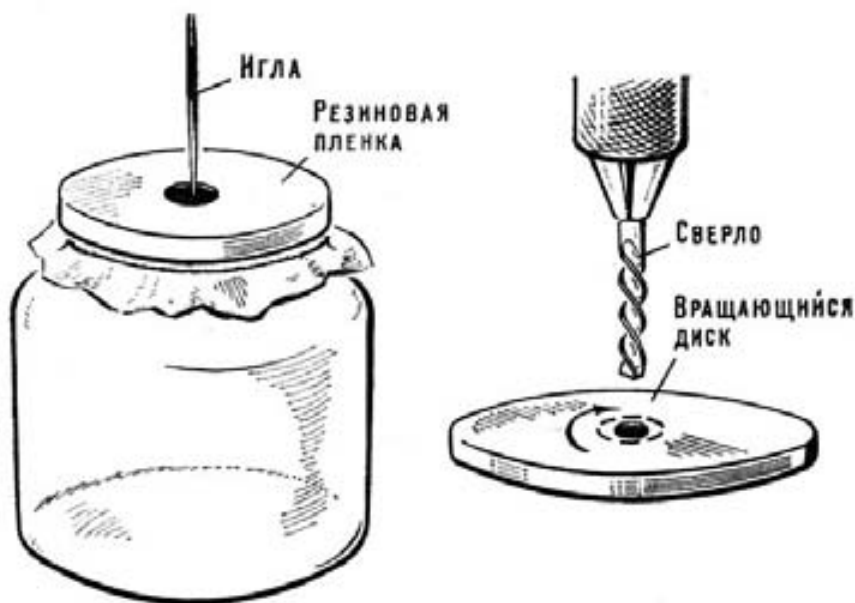


Рис. 16. В быстро вращающемся диске, как и в натянутой резиновой пленке, нельзя проделать очень малого отверстия — оно тотчас же расширяется и будет значительно больше, чем намечалось

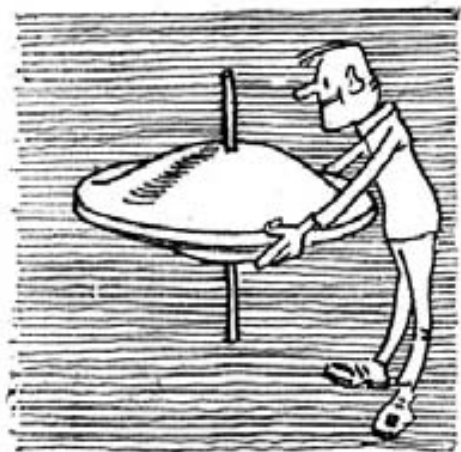
где он напряжен меньше. Получился диск, убывающий по толщине от центра к периферии, так называемый диск равной прочности. На первый взгляд явно нелепая форма маховика. Раньше старались отнести всю массу на периферию, а теперь вдруг всю к центру. Нелепо как-то. И поэтому снабдили диск равной прочности тяжелым ободом — как-то будет надежнее и на маховик похоже! (см. рис. 14, д).

И опять новый маховик оказался выгоднее предыдущего и завоевал первенство. Такой маховик даже был применен на известных швейцарских гиробусах (см. ниже) для накопления очень больших количеств энергии и считался совершенным.

Но... преодолели все-таки инертность взглядов и сняли тяжелый обод, оставив только диск равной прочности (см. рис. 14, е). Несмотря на «нелепую» для маховика форму, на малый момент инерции, диск равной прочности развил максимальную плотность энергии — втрое выше, чем диск с малым отверстием и вдвое — чем самый тонкий обод. И расчеты и эксперимент показали, что для изотропного (с одинаковыми механическими свойствами во всех направлениях) материала, каким являются металлы, выгоднее формы нет — диск равной прочности обеспечивает предельную плотность энергии. Если охарактеризовать форму маховика коэффициентом эффективности (как это и делается при расчетах) и присвоить диску равной прочности максимальный коэффициент 1, то диск с очень малым центральным отверстием получит 0,3; тонкий обод — 0,5; диск без отверстия — 0,6; диск равной прочности с ободом — между 0,6 и 1 в зависимости от величины обода.

Диск равной прочности, конечно, сложен в изготовлении (хотя его форму с успехом заменяют похожей, но более простой гиперболической), не терпит никаких отверстий, раковин, волосовин особенно в центре, эффективен только при весьма высокой окружной скорости, но зато обеспечивает минимальный вес при данном запасе энергии. А это немаловажно и часто играет решающую роль при выборе силового агрегата.

Одним из первых начал применять для маховиков диски равной прочности основоположник маховичных двигателей (аккумуляторов) у нас в стране известный изобретатель А. Г. Уфимцев. Это видно из его патента на инер-



ционный аккумулятор, датированного 1918 годом¹, о котором будет рассказано в гл. II этой книги.

Итак, роль формы маховика в накоплении энергии в нем выяснена. Но кроме выбора формы перед конструктором маховиков стоит вопрос о выборе материала. Действительно, что выгоднее...

МАХОВИК — СВИНЦОВЫЙ ИЛИ АЛЮМИНИЕВЫЙ?

Маховик можно изготовить как из тяжелых материалов с большим удельным весом, так и из легких: и из свинца, и из алюминия. С первого взгляда кажется, что чем тяжелее маховик, тем больше плотность энергии в нем. Но это предположение в большинстве случаев неверно.

Рассмотрим для простоты маховик в виде тонкого обода (кольца). Мы знаем, что напряжения в тонком кольце при вращении зависят от плотности материала и квадрата окружной скорости $\sigma = \rho v^2$, а плотность энергии — только от квадрата окружной скорости $e = 0,5 v^2$. Плотность энергии при этом прямо пропорциональна плотности этого материала

$$e = 0,5 \frac{\sigma}{\rho}. \quad (10)$$

Таким образом, мы убеждаемся, что плотность энергии при равной прочности материала тем выше, чем легче сам материал, т. е. меньше его плотность. Точнее, плотность энергии прямо пропорциональна величине $\frac{\sigma}{\rho}$ — удельной прочности материала ма-

ховика. Обозначив отношение $\frac{\sigma}{\rho}$, например, буквой χ , получим общую формулу, характеризующую плотность энергии вращающегося кольца:

$$e = 0,5 \chi. \quad (11)$$

Как будет показано в дальнейшем, это выражение справедливо и для маховиков любой формы, только коэффициент перед удельной прочностью, характеризующий форму маховика, будет другим. Для тонкого кольца этот коэффициент формы, в частности, равен 0,5. Обозначив коэффициент формы буквой k , запишем выражение, определяющее плотность энергии маховика любой формы:

$$e = k \chi. \quad (12)$$

А теперь проверим сказанное для реальных материалов, из которых можно изготовить маховики: стали, свинца, алюминия, титана, магниевых сплавов, пластмассы и даже дерева и древесных пластиков. Так, у чугуна, из которого даже сейчас иногда

¹ А. Г. Уфимцев. Патент СССР № 2290, 1918 г.

отливают маховики, временное сопротивление (т. е. то напряжение, при котором материал разрушается) равно примерно $5 \cdot 10^8$ ньютонов на квадратный метр (Н/м^2), а плотность — 7000 кг/м^3 . Удельная прочность выходит равной $7 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Для обыкновенных углеродистых сталей эта цифра примерно вдвое, а для высокопрочных легированных сталей даже втрое выше, чем у чугуна. Итак, максимум, что мы можем «выжать» из стали, даже самой совершенной — это $2 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Титановый маховик сможет накопить в полтора раза больше энергии в единице массы, потому что его удельная прочность во столько же раз выше, чем у лучшей стали и доходит до $3 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Примерно такие же показатели обеспечат маховики из дюралюминия с плотностью $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ и из совсем легких магниевых сплавов с плотностью 1800 кг/м^3 . А вот маховик из такого тяжелого материала, как медь, не накопит и десятой доли энергии стального маховика, а свинцовый и сотой доли титанового или алюминиевого. Удельная прочность этих материалов очень низка. Это объясняется малой их прочностью и в той же мере высокой плотностью. Как это ни кажется удивительным, тяжелые плотные материалы гораздо менее выгодны для изготовления маховиков, чем легкие, но прочные. Пластмассы также оказались хорошими заменителями стали: текстолитовый маховик, например, по удельной прочности, а стало быть и по плотности энергии, не уступает стальным маховикам.

Несколько неожиданным материалом для маховиков кажется дерево или бумага. Но, как показал, например, американский ученый Д. В. Рабенхорст (о котором еще будет идти речь в дальнейшем), маховики из дерева, фанеры, склеенной в несколько слоев бумаги, эффективнее стальных маховиков по плотности энергии, значительно дешевле их и применяются в американской технике. Так, например, плотность энергии маховиков, изготовленных из древесины различных пород, такова: маховик из бамбука — 300 тыс. Дж/кг, березовый и из филиппинского махона — 150, из сосны — 135, красного дерева — 130, ели — 156 тыс. Дж/кг. Чемпион — бамбуковый маховик почти в десять раз превзошел по плотности энергии стальной маховик швейцарского гиробуса! А стоимость древесины во много раз ниже, чем металла, например того же хромоникельванадиевого сплава, из которого изготовлен маховик гиробуса. Хорошие показатели имеют также маховики из древесных пластиков — древесины, пропитанной особыми смолами.

Правда, легкие материалы имеют и недостаток — объем маховика получается достаточно велик. Изменим формулу (5), подставив вместо плотности ее значение, выраженное отношением массы m к объему V , и определим объем маховика:

$$V = \frac{2me}{\sigma}. \quad (13)$$

Заметив, что произведение массы m на плотность энергии (удельную энергоемкость) e есть кинетическая энергия маховика E , получим

$$V = 2 \frac{E}{\sigma}, \quad (14)$$

т. е. объем маховика при равном запасе кинетической энергии в нем обратно пропорционален временному сопротивлению. Стало быть, материалы равной прочности независимо от их плотности обеспечат и равный объем маховика. Так, например, бамбук, алюминий и чугун имеют примерно равную прочность, и маховики равной энергоемкости из этих материалов будут одинаковыми по размерам. Но алюминиевый маховик будет иметь массу в 3 раза, а бамбуковый — в 10 раз меньше, чем чугунный.

Сейчас в технике уже имеются материалы с поистине фантастической удельной прочностью — это тонкие, толщиной в несколько микрометров, волокна из стекла, кварца, бора, графита и т. д. Помимо того что эти материалы легки — в 3 и более раз легче стали, прочность их поистине огромна — в десятки раз больше чем у стали. Но как изготовить маховик из тонкого волокна? И что за необычный «нитяной» маховик это будет? Ответ на эти вопросы будет дан ниже, так как оказалось, что этот маховик, обладая огромной плотностью энергии, ведет себя, как...

БОМБА, ВЗРЫВАЮЩАЯСЯ БЕЗОПАСНО

Прежде всего, почему бомба? Что общего у двигателя, пусть даже маховичного, и бомбы? Общего, как это ни печально, много. Случайно разорвавшись при вращении, маховик ведет себя во многом схоже с этим орудием разрушения. Если же подсчитать механическую энергию, выделяемую при взрыве бомбы и разрыве маховика с высокой плотностью энергии, то сравнение будет не в пользу бомбы. Хотя понятие «польза» тут весьма условно. Тяжелые осколки разорвавшегося маховика, несущиеся со сверхзвуковой скоростью, пробивают все на своем пути. Бывали случаи, когда разорвавшийся в подвале здания маховик, пробивал осколками все междуэтажные перекрытия, включая крышу. Эта «опасность» маховиков вынуждает принимать при их проектировании очень высокий запас прочности, используя всего третью или четвертую часть прочности материала маховика. Конечно, запас энергии при этом тоже будет составлять треть или четверть возможного предела накопленной энергии. И все-таки случайный разрыв маховика не исключен. Например, вовсе нежелательно, чтобы пустяковое столкновение транспортного средства, работающего от маховичного двигателя, сопровождалось взрывом фугасной бомбы — маховика, повредившегося при аварии. Конечно, развитие техники почти всегда сопровождается риском. И бензобак с горючим на автомобиле — далеко не без-

обидная штука. Перспективные электроаккумуляторы, которые ставят на электромобили, содержат в себе расплавленный натрий или литий при температуре около 600 градусов (один из ведущих работников фирмы «Дженерал Моторс» Дж. Роч говорил по этому поводу, что если с этим электромобилем случится авария, то он не хотел бы оказаться рядом). Не меньшую опасность таят в себе баллоны с водородом, радиоактивные электробатареи и другие источники энергии будущего. И все-таки хотелось бы, чтобы маховичный двигатель, будучи совершенно безвредным в смысле загрязнения окружающей среды, не представлял бы опасности, как это ни парадоксально, и в случае возможного разрыва. Но не является ли это требование утопией? Можно ли представить себе безопасный разрыв маховика? Оказывается, можно. И это ценнейшее свойство маховик приобретает вместе с огромной плотностью накопленной энергии!

Все началось с попытки изготовления маховика из материалов высокой прочности. Известно, что максимальную прочность металл развивает в виде лент или проволок. Лента или проволока, благодаря своей внутренней структуре, образованной холодной прокаткой или волочением, имеет прочность, в несколько раз превышающую прочность исходного материала. Но как изготовить маховик из ленты? Да это даже проще, чем отлить или отковать его. Берется легкий центр (например, катушка из дюралюминия или пластмассы) и на него навивается тонкая лента, предварительно смазанная клеем¹ (рис. 17). Клей должен быть достаточно эластичным, чтобы заполнять собой зазоры между витками ленты, образованные неодинаковым расширением витков разного диаметра при вращении. Почему витки разного диаметра расширяются неодинаково, можно понять из рассмотрения формулы (4) напряжений во вращающемся тонком кольце. Заменяв здесь окружную скорость v ее выражением через угловую скорость ω и радиус кольца R , $v = \omega R$, получим

$$\sigma = \rho \omega^2 R^2. \quad (15)$$

Стало быть при одинаковой угловой скорости и плотности ленты виток, имеющий больший диаметр, напряжен сильнее. А раз напряжен сильнее, то сильнее и деформируется, что и вызывает межвитковые зазоры. Так вот, основная функция клея и состоит в том, чтобы заполнять эти зазоры, не позволяя виткам «освободиться» один от другого. Последний виток также приклеивается к предпоследнему, причем предпочтительно срезать его по ширине, оставив тонкую полоску ленты и намотав ее на обод по спирали, а затем, смазав клеем, подсунуть под остальные витки². Тогда закрепление этого витка при вращении становится

¹ Н. В. Гулиа. Авторское свидетельство № 200359. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 16, 1967 г.

² Н. В. Гулиа, Л. Л. Гвелесиани. Авторское свидетельство № 353086. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 29, 1972 г.

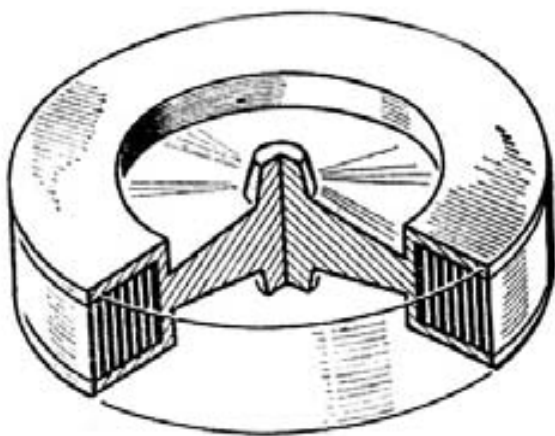


Рис. 17. Маховик, навитый из ленты

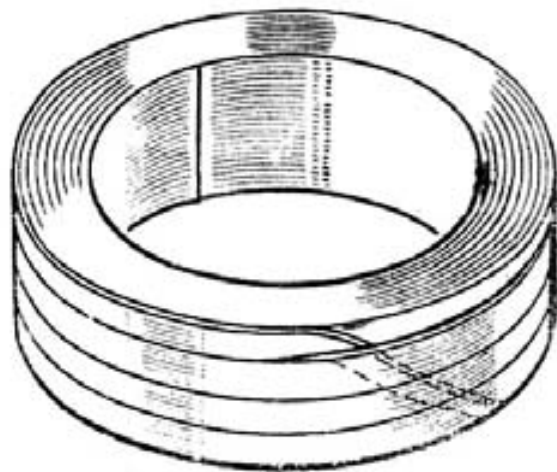


Рис. 18. Схема крепления последнего витка ленты на обод

еще прочнее. Схема такого закрепления последнего витка дана на рис. 18.

В последнее время показано, правда пока только теоретически, что можно обойтись и без клея, навивая ленту с предварительным натягом. Этот натяг создает, как говорят, «отрицательный зазор» между витками, который частично уменьшается (не доходя, конечно, до положительного, т. е. обычного зазора!) при вращении.

Первый такой «витой» ленточный маховик был изготовлен автором в домашней обстановке самым что ни на есть кустарным образом. И лента была не лучшего качества — обычная углеродистая сталь. Но испытания этого маховика на разрыв при вращении показали, что плотность энергии в нем почти в 6 раз выше, чем у маховика швейцарского гиробуса, изготовленного из высококачественной, но монолитной стали! Но самое главное, испытания показали, что витой маховик совершенно безопасен при разрыве!

Прежде чем говорить о причине «безопасности» ленточных маховиков, скажу несколько слов о том, как испытывают маховики на разрыв при вращении, и об испытательной машине — разгонном стенде.



Для того чтобы испытать маховик на разрыв при вращении, необходимо не только раскрутить его до очень большой скорости, но и обезопасить все находящееся рядом от разрушительного действия осколков разорвавшегося маховика. Для этого камеры, где вращается испытуемый маховик, обычно помещают глубоко под землю и окружают многослойной броней —

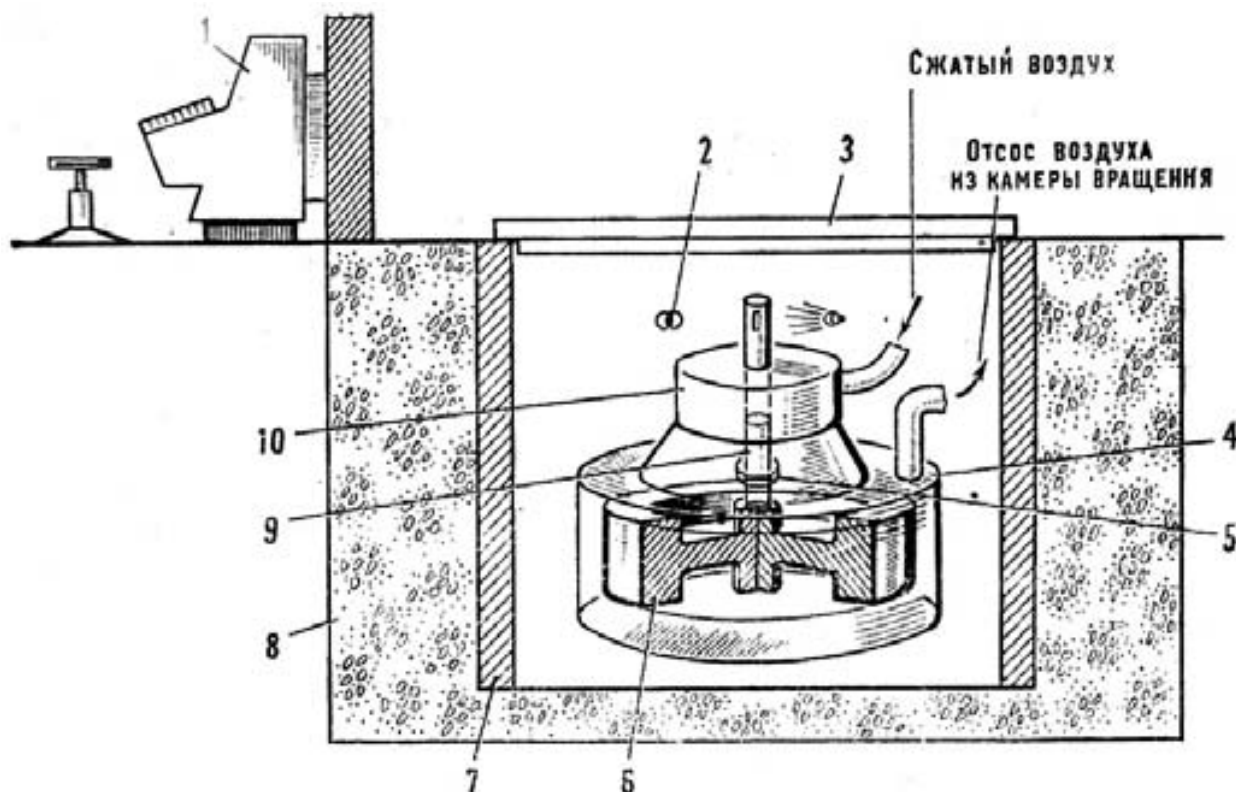


Рис. 19. Разгонный стенд:

1—пульт управления; 2—фотоэлемент; 3—люк; 4—камера вращения; 5—подшипник с уплотнением; 6—испытуемый маховик; 7—свинцовая броня; 8—бетонная броня; 9—гибкий валик; 10—турбина

свинцовыми брусками, стальными и бетонными кольцами (рис. 19). Свинец нужен для того, чтобы осколки маховика не очень деформировались бы при ударе о броню и по их форме можно было бы сделать выводы о характере разрыва. Естественно, что вся измерительная аппаратура и пульт управления разгонным стендом находятся наверху, далеко за пределами бронированной камеры, и связь с датчиками и разгонными двигателями осуществляется по проводам. Частоту вращения маховика можно измерять электрическими, механическими или стробоскопическими тахометрами — измерителями угловой скорости. Но наиболее точен такой метод, который фиксировал бы даже каждый оборот вала.

На рис. 19 показан фотоэлектрический измеритель угловой скорости, основанный на том, что вращающийся вал, выполненный с поперечной щелью при вращении, то пропускает свет лампы к датчику — фотоэлементу, то прерывает его, а сигналы фотоэлемента фиксируются на пульте управления частотомером, счетчиком импульсов или записываются на пленку осциллографа.

Разгон маховика может осуществляться двигателями разных типов, но наиболее удобна, пожалуй, воздушная турбина, развивающая очень высокую угловую скорость и простая в управлении. «Мягкая» рабочая характеристика турбины, заключающая-

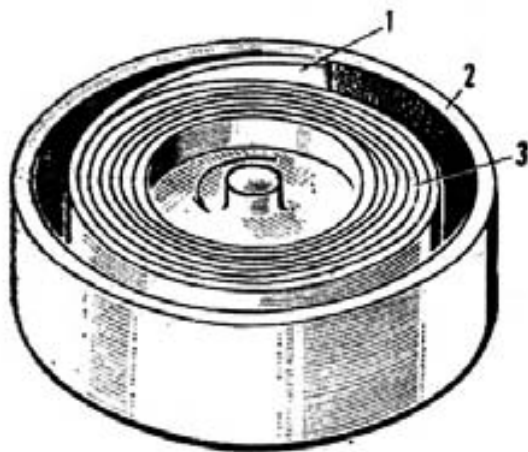


Рис. 20. Схема разрыва ленточного маховика:

1—трущийся конец ленты; 2—кожух; 3—маховик

яся в том, что она реализует почти постоянную мощность как при малой, так и при высокой угловой скорости, наиболее приемлема при трогании с места и разгоне. Воздух в турбину подается от компрессора, установленного отдельно.

Маховик подвешивается в камере вращения на гибком валу, имеющем возможность некоторого, пусть даже небольшого поперечного смещения. Делается это для того, чтобы разбалансированный маховик мог бы «установиться» при высоких частотах вращения и не создавал бы больших нагрузок на подшипник (подробнее об этом см. гл. IV).

Для уменьшения потерь мощности на трение о воздух при вращении маховика (а они, как будет показано ниже, могут достигать значительных величин) воздух из камеры вращения непрерывно удаляется небольшим вакуум-насосом, а на подшипнике в камере вращения ставится уплотнение.

Вот, пожалуй, и все про разгонный стенд, на котором проводят испытания маховиков на разрыв. Остается сказать, что перед началом разгона люк на входе в испытательную камеру задраивается, люди покидают даже верхнее помещение, в подвале которого находится стенд, и управление ведется с пульта, находящегося в другом месте.

Так проводились испытания первых ленточных маховиков на разгонном стенде Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ). Но оказывается, можно было и не задраивать люки, не переходить в другое помещение, короче, не соблюдать меры предосторожности, обязательные при испытании обычных механизмов. Ленточный маховик разрывался совершенно безопасно, не пробивая даже стенки камеры вращения толщиной 1—2 мм, несмотря на то что накопленной в нем энергии было в несколько раз больше, чем в монолитных маховиках того же веса. Почему же ленточный маховик разрывается безопасно? Обратимся к рис. 20.

Выше мы говорили, что чем дальше виток ленты расположен от центра, тем сильнее он напряжен. Стало быть, первым разорваться может только этот внешний виток. К тому же он ослаблен креплением к предпоследнему витку клейкой и т. д. А разрываясь, отслоившийся конец ленты тотчас же прижимается центробежными силами к внутренней поверхности кожуха и активно трется об нее, автоматически тормозя маховик. Этот последний

виток ленты играет ту же роль, что и предохранительная мембрана на паровом котле — разрываясь сам, предохраняет от разрыва весь маховик. Разумеется, все сказанное относится к случаю вращения маховика в направлении навивки ленты; при противоположном направлении вращения маховик может разорваться весь, хотя и без образования опасных осколков.

Оказалось, что безопасный разрыв характерен для всех маховиков, изготовленных из слоисто-волоконистых композитных материалов высокой прочности. Правда, такие маховики разрываются целиком (как и ленточный в случае вращения не в ту сторону), но опасных осколков, как при разрыве монолитного маховика, не образуется, и меры защиты тут гораздо проще. Маховики, изготовленные из таких композитных материалов, накапливая энергию с гораздо большей плотностью, чем обычные монолитные, и обладая безопасным разрывом, получили название «супермаховиков». И есть все основания утверждать, что...

«СУПЕР» — ЭТО ОТЛИЧНО!

Несмотря на то, что разновидностей супермаховиков существует достаточно много, их можно разбить на два основных типа: стержневые и ободковые. Схемы супермаховиков этих двух типов даны на рис. 21. Стержневой супермаховик (рис. 21, а) принципиально представляет собой стержень, вращающийся вокруг оси, перпендикулярной к его продольной оси¹. Ободковый же супермаховик (рис. 21, б), как и традиционный маховик, вращается в своей плоскости вокруг центральной оси. Крепление как стержня, так и обода к центру выполняется различными способами в зависимости от типа супермаховика. Основная разница между супермаховиками этих двух типов состоит в том, что стержневой находится при вращении в главном напряженном состоянии под действием радиальных напряжений (действующих по радиусу), а ободковые напряжения (действующие по касательной к траектории рассматриваемого вращающегося элемента), хотя и играют незначительную роль для аккумуляции энергии из-за их малости, зато приносят наибольший вред, расслаивая стержень. Противоположную картину наблюдаем для ободковых супермаховиков — наибольшие окружные напряжения играют основную роль в аккумуляции энергии, а радиальные, хоть и незначительно, но приносят конструкции вред, расслаивая обод (подробнее о напряжениях в маховиках см. в гл. IV). Идеальная картина была бы в случае бесконечно тонких стержня и обода — там не было бы «вредных» напряжений. Но выполнить их такими невозможно, да и невыгодно: слишком малый объем камеры вращения маховика будет полезно использо-

¹ Д. В. Рабенхорст. Патенты США № 3698262 и 3737694.

ваться. Однако и толстыми их делать нельзя — расслоятся. Ведь прочность одноосных композитных материалов вдоль и поперек волокон далеко не одинакова. Тут-то и начала изощряться конструкторская мысль, преодолевая противоречие — максимально заполнить объем камеры вращения материалом, но в то же время успешно преодолевать побочные «вредные» напряжения.

Логичнее всего, конечно, было бы просто «не воспринимать» этих побочных напряжений, давая супермаховику свободно расслаиваться. Так возникла «щеточная» конструкция стержневого

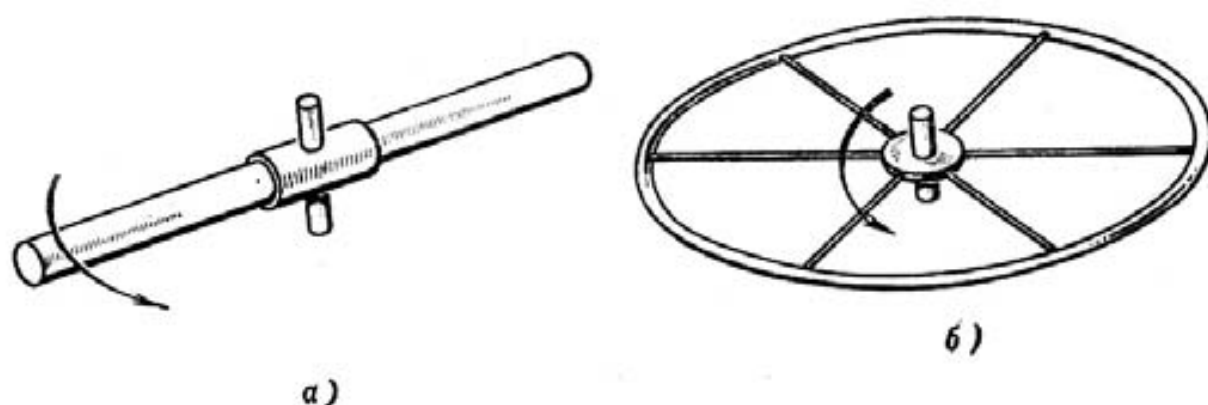


Рис. 21. Схема стержневого (а) и ободкового (б) супермаховиков

супермаховика; для ободкового такое решение неприемлемо (рис. 22). Отдельные волокна стягиваются в центре оправкой с осью на ней и приводятся во вращение. Волокна, растягиваемые центробежной (т. е. буквально действующей от центра) силой, расходятся сектором, образуя некое подобие щетки. Материалом для щеточного супермаховика может служить как высокопрочная проволока, так называемая «рояльная», или из бериллиевого сплава, так и различные высокопрочные волокна — нитевидный бор и графит, стеклянные и кварцевые волокна.

Компактность щеточного супермаховика, конечно, оставляет желать много лучшего, несмотря даже на то, что изготовив специальную круглую оправку, можно расположить волокна не отдельным сектором, а распределив по всей окружности.

Стремление повысить компактность стержневых супермаховиков привело к созданию конструкций «брускового» типа, где отдельные тонкие волокна-стержни склеивались на основе эпоксидной или иной связки, образуя достаточно толстый брусок, стягиваемый в центре оправкой, как и щеточный супермаховик (рис. 23, а). Вращение бруска, как и у отдельного стержня, — вокруг поперечной оси. Компактность супермаховика повысилась, но прочность из-за расслаивания несколько ниже, чем у щеточного. Приданием бруску формы, близкой к стержню равной прочности (насколько это можно сделать у такого анизотропного композитного материала), плотность энергии была несколько повышена, хотя и в ущерб компактности (см. рис. 22, б).

Ведущий специалист в США по супермаховикам д-р Д. В. Рабенхорст (Университет им. Дж. Гопкинса) предложил повысить компактность стержневых супермаховиков, склеивая из отдельных стержней или полосок, составленных из волокон, композитный диск, близкий по форме к диску равной прочности (рис. 24). Этот супермаховик, уже достаточно компактный, получил название дискового (правильнее «псевдодискового»).

И наконец, Д. В. Рабенхорстом предложена наиболее сложная и замысловатая, но, как считает ее создатель, наиболее эф-

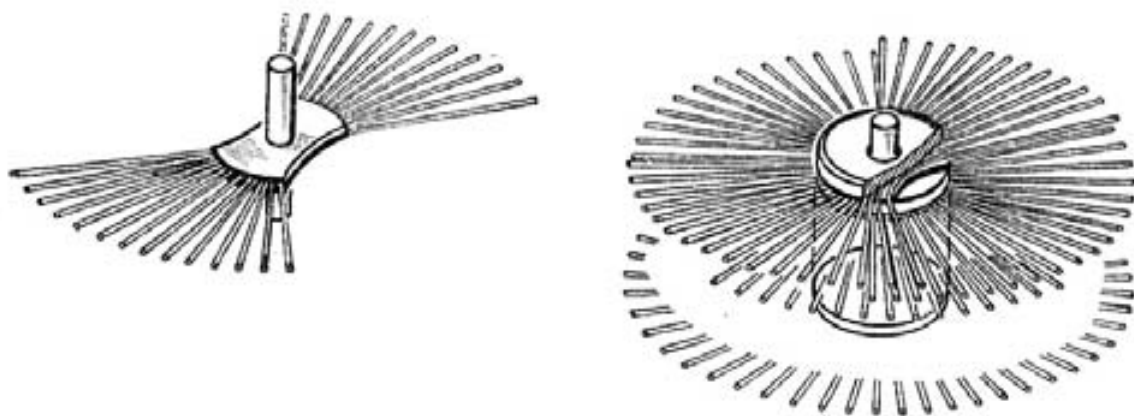


Рис. 22. Щеточный супермаховик (справа показан круглый щеточный супермаховик, полученный совмещением щеточных блоков)

фективная с точки зрения компактности и потерь энергии форма супермаховика — клиновая (рис. 25). Действительно, рассматривая такой супермаховик повнимательнее, можно заметить, что он состоит как бы из круговых клиньев, следующих один за другим. Д. В. Рабенхорст считает, что будущее за такими супермаховиками.

Следует заметить, что наряду с научным центром США — Университетом им. Дж. Гопкинса исследованиями стержневых супермаховиков (преимущественно брусковых) занимается фирма Локхид (США) с привлечением к работам и более мелких предприятий в основном для изготовления материала супермаховиков и испытаний.

Теперь об ободковых супермаховиках. Эти конструкции таят в себе большие возможности: они компактны, допускают размещение в центре вспомогательных систем и устройств (так как центр здесь практически свободен от нагрузок), имеют более низкую угловую и окружную скорость, чем стержневые супермаховики.

Примером ободкового супермаховика и является ленточный маховик, рассмотренный ниже. Обод может быть навит не только из ленты, но и из проволоки, высокопрочных волокон со связкой, как и стержневые конструкции. При этом ободковые конструкции более технологичны, легче балансируются и при разрыве

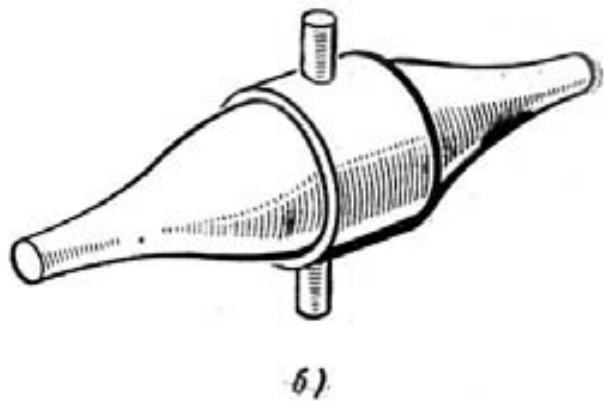
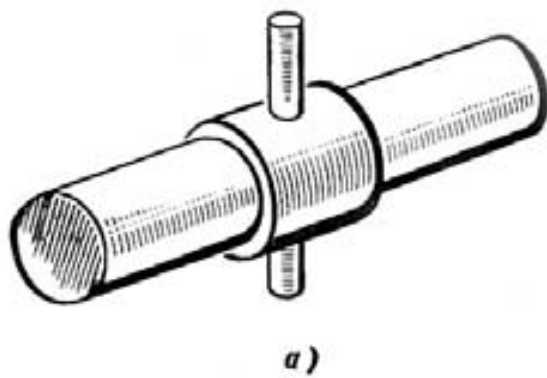


Рис. 23. Композиционный брусковый супермаховик с бруском постоянного сечения (а) и близкий к равнопрочному стержню (б)

безопаснее стержневых. Вероятность расслоения у них та же, что и у стержневых, если не выполнять обод слишком толстым, что невыгодно и с точки зрения накопления энергии.

По плотности энергии эти супермаховики соизмеримы со стержневыми: как у одних, так и у других достигнута величина 200—300 тыс. Дж/кг. Некоторое превышение плотности энергии у малых моделей супермаховиков (например, полученная Д. В. Рабенхорстом для нити из бора величина 400 тыс. Дж/кг) объясняется тем, что стержневые конструкции (фактически один стержень в экспериментальных моделях) предоставляют большее удобство для испытаний коротких и тонких нитей из сверхпрочных материалов, чем обод, который надо мотать из достаточно большого количества волокон, чтобы исключить влияние давления центра. Но для больших натуральных маховиков обод выгоднее стержня.

Ободковые супермаховики в 70-х годах были исследованы фирмой «Юнайтед Эркафт Корпорейшн» (США). У нас в стране исследуются ободковые супермаховики (во всяком случае пока), так как мы видим в них определенные преимущества над

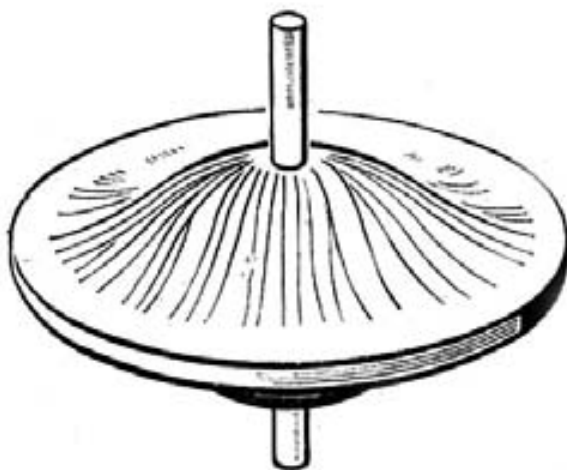


Рис. 24. Композитный дисковый супермаховик

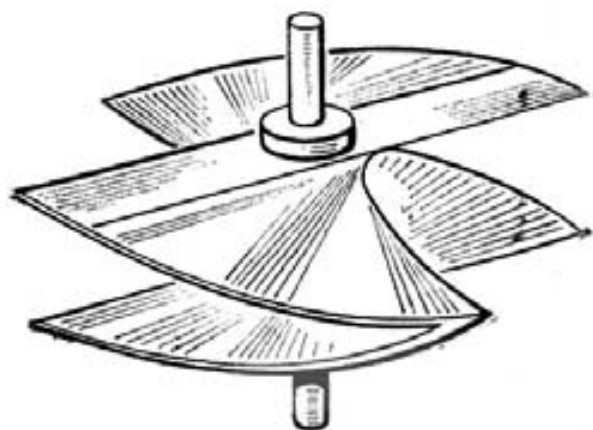


Рис. 25. Клиновой (алебардообразный) супермаховик

стержневыми, в первую очередь компактность и аэродинамические качества.

Однако не следует полагать, что ободковые супермаховики так уж легко поддаются исследованиям. Они прочны и технологичны, а попробуй — освой! А в первую очередь это происходит потому, что ...

МАХОВИК — ПОНЯТИЕ РАСТЯЖИМОЕ

Растяжимое в самом буквальном смысле слова. И если удлинения при вращении монолитных маховиков микроскопичны, то ободы, навитые из высокопрочных волокон, растягиваются при вращении почти как резиновые. Это объясняется тем, что у многих высокопрочных волокнистых материалов наряду с высокой прочностью довольно низок модуль упругости.

Из сопротивления материалов известно, что относительное удлинение ϵ материала под нагрузкой равно отношению напряжений σ к модулю упругости E :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}. \quad (16)$$

Чем больше прочность и меньше модуль упругости материала, тем больше удлинение. Так, например, для композитного материала на основе ориентировочного стеклопластика (один из лучших материалов для изготовления супермаховиков) с модулем упругости $E = 50\,000 \text{ Н/мм}^2$ и прочностью $\sigma = 2500 \text{ Н/мм}^2$ упругое удлинение может достигать 5%. Это очень много. Чтобы такое же упругое удлинение могла выдержать сталь при модуле упругости $E = 220\,000 \text{ Н/мм}^2$, ей нужно развить прочность $\sigma = \epsilon E = 0,05 \cdot 2,2 \cdot 10^5 = 11\,000 \text{ Н/мм}^2$. Это фантастическая прочность, недоступная даже для лучшей проволоки. Алюминий, имея модуль упругости втрое меньший, мог бы иметь и прочность втрое меньшую, но и такая недоступна для алюминия.

Что же делать? Ведь обод из «растягивающегося» материала надо на что-то одеть, его должен поддерживать какой-то центр, чтобы можно было фиксировать обод и снимать с него вращение. А ни один из металлов не выдерживает такого удлинения. Попробовали делать центр из пластмассы, выдерживающей большие удлинения. Получилось, но очень уж ненадежный центр из пластмассы, того и гляди потеряет устойчивость, и обод с его огромным запасом энергии может оказаться без «опоры». Центр должен быть, помимо прочего, и таким, чтобы выдерживать рабочую угловую скорость супермаховика самостоятельно не разрушаясь без поддерживающего действия обода.

На рис. 26 показан супермаховик, где «растягивающийся» обод из стеклопластика поддерживается центром, имеющим гибкий элемент на периферии в виде «лепестков», охватывающих

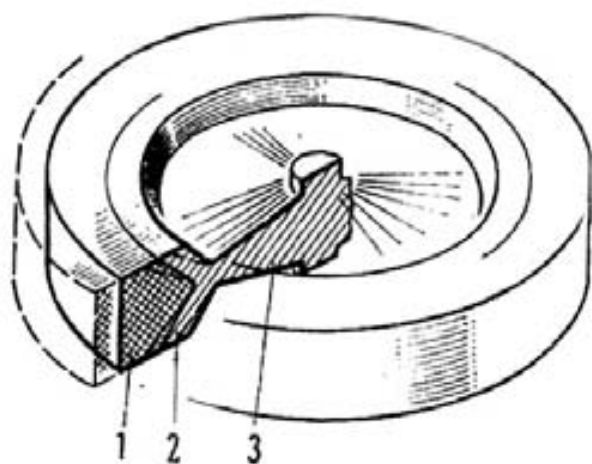


Рис. 26. Супермаховик с «растяжимым» ободом и упругим центром:

1—растяжимый обод; 2—упругая периферия диска; 3—диск (центр)

высокой угловой скорости и нагрузках подвижные механические соединения работают очень ненадежно.

Есть еще один путь преодоления вредного эффекта «высвобождения» обода — это применение высокопрочных материалов, имеющих к тому же и высокий модуль упругости. Таковы, например, нити из графита — отличный и очень перспективный материал для супермаховиков.¹ При весьма малой плотности — в 2 раза меньшей, чем у алюминия, и почти в 5 раз меньшей, чем у стали, нити из графита выдерживают напряжение свыше 3000 Н/мм², превосходят в этом лучшие стальные поковки и даже холоднокатаную ленту. Таким образом, супермаховик из графитовых нитей будет иметь плотность энергии почти в 10 раз (как говорят «на порядок») большую, чем ленточный супермаховик, в свою очередь, почти на порядок превышающий по этому показателю монолитные маховики. А модуль упругости графитовых нитей очень велик, он почти в 3 раза превышает модуль упругости стали. Значит, упругие деформации обода из графитовых нитей соизмеримы с деформациями центра из стали, титана или дюралюминия, что значительно упрощает крепление обода супермаховика к центру. До сего времени существенной помехой к широкому использованию графитовых нитей в технике была их высокая стоимость; например, в США свыше 700 долларов за килограмм. Теперь же их стоимость уже снижена примерно в 7 раз, а в ближайшие годы ожидается еще четырехкратное снижение стоимости графитовых нитей, что сделает их вполне приемлемым материалом для супермаховиков. В США эти прочные и легкие нити уже применяются даже для нужд спорта.

Но всегда ли плохо, когда обод растяжим? Нет ли в этом явлении и положительной стороны? Оказывается, есть и немалая. Дело в том, что обод, растягиваясь, накапливает помимо кинетической еще и потенциальную механическую энергию, как растянутая пружина. И доля ее существенна. Так, например, обод из кварцевой нити при напряжении 6000 Н/мм² дополни-

¹ Н. В. Гулиа, А. М. Куперман. Авторское свидетельство № 440514. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 31, 1974 г.

тельно накапливает в виде потенциальной энергии почти треть общего запаса. Прибавка немалая! И эта доля потенциальной энергии растет с повышением прочности и снижением модуля упругости.

А что, если применить для изготовления маховиков материал, выдерживающий напряжения большие, чем даже его модуль упругости? К таким материалам относится, например, резина. Тогда маховик накопит преимущественную часть своей энергии в виде потенциальной. И эта энергия будет накапливаться без применения каких-либо вспомогательных устройств и выделяться непосредственно при вращении вала. Такой маховик¹ выделяет значительную часть накопленной энергии при небольшом перепаде угловых скоростей, что иногда очень удобно. Угловые скорости вращения резинового маховика невелики, и потери энергии на трение о воздух и в подшипниках незначительны. При этом запасенная в таком маховике энергия соизмерима по плотности с энергией стальных монолитных маховиков. Нужно, конечно, учитывать то, что резиновый маховик при вращении увеличивает свой диаметр в 2 и более раза.

Однако, несмотря на схожесть «растяжимых» маховиков с пружинами, вообще аккумуляторами потенциальной «упругой» энергии, у последних есть одно важное преимущество — удобная характеристика выделения энергии. Заводная пружина, например, может «мягко» подталкивать стрелки часов, ножи электробритвы или любой другой исполнительный механизм. И если этот исполнительный механизм принудительно остановить, ничего ужасного не произойдет — просто пружина прекратит выделять энергию. Маховик же при этом сломал бы привод, но не прекратил вращаться. Скорость движения исполнительного механизма может меняться произвольно, а пружина будет все так же «мягко» подталкивать его. Маховик же при выделении энергии обязательно замедляется. Правда, несмотря на неудобную «жесткую» характеристику, энергия, запасенная в маховике, в десятки тысяч раз превышает по плотности энергию, накопленную в пружинах при одинаковой прочности материала, из которого изготовлены пружина и маховик. Заманчиво, конечно, было бы иметь аккумулятор механической энергии, по плотности энергии равный маховику, а по удобству рабочей характеристики — похожий на пружину. И, оказывается, это обеспечивают маховичные ...

АККУМУЛЯТОРЫ «УПРУГОЙ» ЭНЕРГИИ

С первого взгляда они похожи на заводную пружину (см. рис. 27). Та же ленточная пружина, навитая на внешний бара-

¹ Н. В. Гулиа. Авторское свидетельство № 431343. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 21, 1974 г.

бан и переходящая на вал. Но упругость ленты в обычном смысле, т. е. ее изгибная жесткость, благодаря которой накапливается энергия в заводных пружинах, здесь не при чем. Интересна и поучительна задача артиллерийского взрывателя, которая была рассмотрена в самом начале Великой Отечественной войны в 1941 г.

Дело в том, что пружина артиллерийского взрывателя, обычная заводная пружина, как, например, в часах, обнаружила необычайную «прыть» при полете снаряда. Она развивала вращающий момент, почти вдвое больший, чем в спокойном состоянии, нарушая все расчетные показатели. Оказывается, здесь играло роль не поступательное движение снаряда, а его вращение, полученное благодаря нарезке в стволе пушки и служащее целям стабилизации в полете. Пружина, на которую помимо упругих подействовали и центробежные силы, развила вдвое больший момент и, следовательно, накопила вдвое большую энергию. И это все получилось совершенно случайно, вернее по недосмотру расчетчиков.

А если вращать заводную пружину специально и при этом рассчитать ее так, чтобы основная часть энергии накапливалась благодаря действию центробежных сил, то мы получим как раз тот заманчивый случай, о котором говорили выше¹. Эта пружина (уже не пружина, а так называемый «центробежный аккумулятор») накопит энергии столько же, сколько и ленточный супермаховик, а выделять ее будет с «мягкостью» заводной пружины. Рассмотрим подробнее рис. 27.

Аккумулятор состоит из вращающегося корпуса 1, в котором заключены два мотка ленты — внешний моток 2, прилегающий к цилиндрической части корпуса 1, и внутренний моток 3, навитый на барабан 4 с фиксирующими кассетами 5. Моток 2 соединен с мотком 3 посредством одной или нескольких ветвей ленты, причем количество их зависит от требуемого крутящего момента на валу 4 и от угловой скорости вращения корпуса 1. Лента 6 может быть металлической или неметаллической, постоянной или переменной толщины и массы по длине. Последнее обеспечивает необходимый закон изменения величины крутящего момента на валу 4. Вал 4 соединяется с корпусом 1 посредством дифференциального механизма с тремя степенями подвижности (на чертеже показан механизм с коническими шестернями).

Дифференциальный механизм состоит из шестерни 7, соединяемой с валом 4 посредством муфты включения 9 жесткой или фрикционной; сдвоенной шестерни 10 и сателлитов 11 и 12, связывающих сдвоенную шестерню 10 с шестернями 7 и 8. Водила сателлитов 11 и 12 при необходимости затормаживаются ссот-

¹ Н. В. Гулиа. Авторские свидетельства № 229152 и № 239720. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 32, 1968 г. и № 11, 1969 г.

ветственно тормозами 13 и 14. Вал 4 может блокироваться с корпусом 1 блокировочной муфтой 15.

Энергия аккумулируется следующим образом. При заторможенном водиле одного из сателлитов, например 11, водило другого, например 12, приводится во вращение (в плоскости вращения корпуса 1) от источника энергии с любой степенью неравномерности вращения вала. Количество накопленной энергии будет зависеть только от суммарного угла поворота водила сателлитов. Энергия выделяется при вращении водила сателлитов в противоположном направлении. Водило сателлита 12 в этом случае соединяется с приемником энергии.

Описанные процессы можно осуществить аналогичным образом при заторможенном водиле сателлита 12 вращением водила сателлита 11, при этом направления вращений при аккумулировании и выделении энергии противоположны тем, которые имеют место в первом случае. Это свойство предоставляет возможность как аккумулировать, так и выделять энергию при любом направлении вращения вала источника или приемника энергии при поочередном вращении водил обоих сателлитов в требуемых направлениях. Кроме того, вращая принудительно водило одного сателлита с помощью постороннего источника энергии, можно изменить интенсивность процессов накопления и выделения энергии.

Ниже описано, как накапливается и выделяется энергия в аккумуляторе. При заторможенных водилах обоих сателлитов 11 и 12 корпус 1 вращается вместе с помещенными в него мотками ленты 2 и 3 и валом 4. Для устранения потерь энергии при холостом прокручивании дифференциального механизма вал 4 заблокирован с корпусом 1 с помощью блокировочной муфты 15.

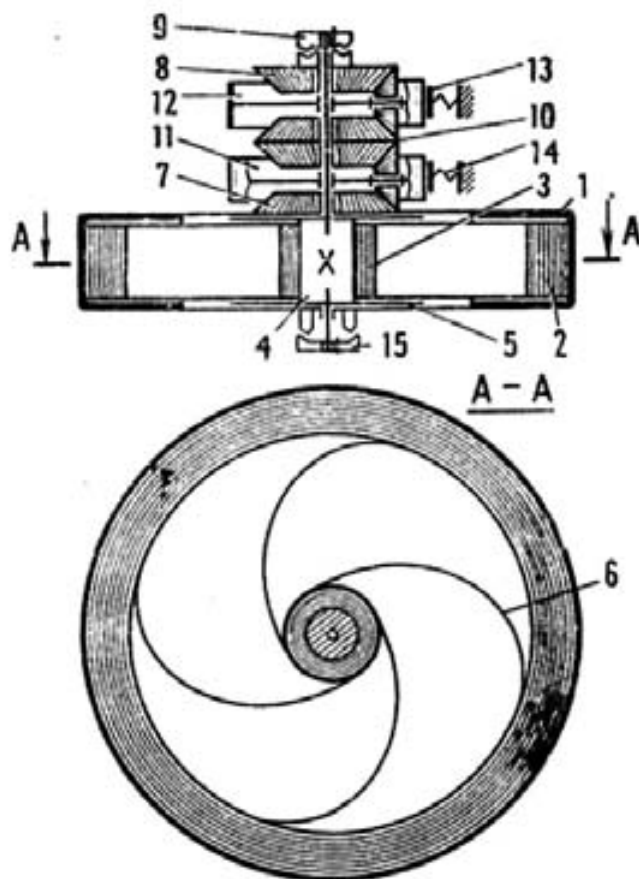


Рис. 27. Принципиальная схема центробежного аккумулятора:

1—корпус-маховик; 2—внешний моток; 3—внутренний моток; 4—барабан; 5—кассета; 6—переходный участок (ветвь) ленты; 7 и 8—конические шестерни; 9—муфта включения; 10—сдвоенная коническая шестерня; 11 и 12—водила сателлитов; 13 и 14—тормоза водил; 15—муфта-фиксатор

а муфта включения 9, соединяющая механизм с кожухом 1 и валом 4, выключена.

Для аккумулярования блокировочная муфта 15 выключается и включается муфта 9. Затем водило одного из сателлитов растормаживается и приводится в принудительное вращение от источника энергии. Лента 6 при этом перематывается с внешнего мотка 2 на внутренний моток 3, преодолевая центробежные силы, стремящиеся перемотать ее в противоположном направлении. Центробежные силы, создаваемые витками ленты, зависят от ее ширины и толщины, длины витка и плотности материала ленты, и также от угловой скорости витков. Так, например, при четырех витках ленты с массой каждого около 50 г, угловой скорости 628 с^{-1} (6000 об/мин) и расстоянии центра вращения 25 см суммарная центробежная сила достигает 20 кН, а крутящий момент на валу 4 при радиусе мотка 3, равном 10 см, — 2 кНм.

Накопленная при этом центробежная потенциальная энергия с перемоткой каждого метра ленты при неизменной центробежной силе равна 20 000 Дж. Если принять ленту 6 изготовленной из стали шириной 10 см и толщиной 0,25 мм, то при тех же остальных параметрах для накопления этой энергии с внешнего мотка 2 на внутренний 3 должно быть перемотано около 0,8 кг ленты. Напряжения в ленте при этом не превышают $20\,000 \text{ Н/см}^2$, что почти в 10 раз меньше предела прочности ленты. Такой запас прочности дает возможность еще большего повышения энергоемкости аккумулятора.

Процесс выделения энергии происходит аналогично. Лента 6 при этом переходит с внутреннего мотка 3 на внешний 2.

К.п.д. аккумулятора зависит в основном от потерь энергии на перематывание ленты, потерь в дифференциале и потерь от вращения корпуса 1 как маховика. К. п. д. описанного дифференциального механизма, определяемый известными методами, примерно 0,94—0,96 для цилиндрических пар и 0,9—0,94 — для конических. К.п.д. силовых ленточных механизмов, основанных на перемотке ленты, примерно 0,97. К.п.д., зависящий от потерь на вращение корпуса 1 как маховика, достаточно велик и для непродолжительных процессов аккумулярования и выделения энергии его можно считать равным примерно единице (см. гл. IX). Следовательно, ориентировочный к.п.д. описываемого аккумулятора при работе на кратковременных режимах находится в пределах 0,88—0,94. Для сравнения можно отметить, что пределы к.п.д. спирально-пружинных аккумуляторов 0,6—0,85.

На основе центробежного аккумулятора можно сконструировать маховичные двигатели с различными свойствами, необходимыми для той или иной машины. Центробежным аккумулятором можно плавно разгонять машину и, наоборот, тормозить, аккумулируя ее кинетическую энергию. Можно построить даже такой маховик, который, расходуя энергию, например на вращение генератора, будет почти до полного выделения всей энер-

гии сохранять постоянную частоту вращения. Для этого надо соответствующим образом перематывать ленту с наружного на внутренний моток. Свойство сохранять постоянную частоту вращения очень ценно для привода генераторов — ведь тогда они будут вырабатывать ток постоянного напряжения и частоты. Можно даже создать маховик, разгоняющийся при совершении работы. Конечно, разгон будет только до какого-то предела, после чего неминуемо должна последовать остановка. А то мы рискуем выдумать вечный двигатель.

Вот какие широкие и разнообразные возможности сулит нам аккумулирование «упругой» энергии маховиками.

А теперь рассмотрим старый как жизнь и очень важный для любой машины, а тем более работающей на аккумулированной энергии ...

ИЗВЕЧНЫЙ ВОПРОС — К. П. Д.

К.п.д. — коэффициент полезного действия маховичных двигателей, как и других машин, представляет собой отношение полезно затраченной энергии ко всей энергии, накопленной в маховике и выделенной за время работы маховичного двигателя.

Полезно затраченная энергия — это энергия, которая пошла на совершение необходимой нам работы — перекачивание колес машины, преодоление сопротивления воздуха, вращение трансмиссии и другие «полезные» сопротивления. А вся выделенная энергия складывается из той, что пошла на полезную работу, и внутренних потерь в маховичном двигателе. От этих потерь и зависит к.п.д. маховичного двигателя. Посмотрим, где же теряется энергия при вращении маховика.

Вращаясь, маховик приводит в движение и окружающие слои воздуха. Вокруг быстровращающегося маховика чувствуется движение воздуха, ветерок, как от включенного вентилятора. На это, естественно, уходит энергия, а потери или сопротивления на создание «ветерка» названы аэродинамическими, или вентиляционными.

Кроме вентиляционных потерь есть потери энергии и в опорах — подшипниках, зависящие от типа этих опор. Если это подшипники качения, то энергия уходит на перекачивание шариков или роликов, если подшипники скольжения — на сухое или жидкостное трение, если магнитные — то на вихревые токи и гистерезис и т. д.

Есть еще ряд «статей» потерь энергии: на вихревые токи при вращении в поле земного магнетизма, потери на демпфирование при вибрациях, потери на звук, который обычно сопровождает вращение маховика. Эти потери, как и перечисленные выше, пренебрежимо малы по сравнению с двумя основными — вентиляционными и в опорах.

Первые опыты по определению мощности вентиляционных потерь провел еще знаменитый Стодола. Вращая гладкий диск диаметром в полметра при окружных скоростях до 100 м/с, Стодола установил, что эта мощность N пропорциональна оборотам диска в минуту n в степени 2,9:

$$N = An^{2,9}, \quad (17)$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Кроме того, Стодола отметил, что мощность потерь изменяется пропорционально плотности окружающей среды.

В дальнейшем эти данные многократно уточнялись многими исследователями и для различных газов, в которых может вращаться маховик, и для различных форм маховиков и разных величин зазора между маховиком и кожухом. В частности, было установлено, что мощность или момент потерь пропорциональны плотности среды в степени 0,7 для воздуха и в степени 0,5 для водорода или гелия. Зазор между маховиком и кожухом для обеспечения минимальных потерь должен составлять от 1 до 3% диаметра маховика. При большем зазоре вовлекается в движение много газа и растут потери, а при очень малых зазорах пограничные слои газа начинают влиять один на другой. Наличие кожуха уменьшает потери мощности на 20%.

Установлено, что помещением маховика в водородную среду можно снизить потери почти в 10 раз, а в гелиевую — в 7 раз по сравнению с воздушной. Оказалось, что даже температура окружающей среды влияет на потери энергии. Так, например, при температуре минус 60°С потери по сравнению с обычной комнатной температурой 20°С увеличиваются на 17%, а при температуре кипения воды 100°С — уменьшаются на 11%.

Приведу наиболее простые формулы, которые могут оказаться полезными при подсчете потерь энергии на вентиляцию. Для воздушной среды момент вентиляционных потерь

$$M_{п,возд} = 1,61 \cdot 10^{-12} n^{1,7} p^{0,7} \left(1 + 4,4 \frac{L}{D}\right) D^{4,4} \text{ Н} \cdot \text{см}, \quad (18)$$

для водородной среды

$$M_{п,вод} = 3,64 \cdot 10^{-12} n^{1,5} p^{0,5} \left(1 + 4 \frac{L}{D}\right) D^4 \text{ Н} \cdot \text{см}, \quad (19)$$

для гелиевой

$$M_{п,гел} = 7,6 \cdot 10^{-12} n^{1,5} p^{0,5} \left(1 + 4 \frac{L}{D}\right) D^4 \text{ Н} \cdot \text{см}. \quad (20)$$

Здесь: n — частота вращения маховика, об/мин; p — давление среды в долях от атмосферного; L — ширина маховика, см; D — диаметр маховика, см.

При наличии кожуха момент потерь надо уменьшать процентов на двадцать.

Потери энергии ϵ_n можно получить, если умножить момент потерь M_n на суммарный угол поворота φ маховика (в радианах):

$$\epsilon_n = M_n \varphi, \text{ Н} \cdot \text{см}, \quad (12)$$

а мощность потерь N_n , если умножить момент потерь на угловую скорость ω (рад/с):

$$N_n = 0,01 M_n \omega \text{ Вт}. \quad (22)$$

Есть и готовая простая эмпирическая (полученная опытным путем) формула для определения мощности потерь на вентиляцию

$$N_n = (0,057 D^5 + 0,29 D^4 L) n^3 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}. \quad (23)$$

Опять-таки, если есть кожух, мощность потерь нужно уменьшить на 20%.

Для маховиков, вращающихся в газовой среде нормального давления, вентиляционные потери составляют до 85% общих механических потерь. Это очень много.

Как же уменьшить эти потери? Прежде всего, конечно, рациональным выбором зазора, обеспечением максимальной гладкости поверхностей маховика и кожуха. Следует избегать всякого рода изменений сечения зазора между маховиком и кожухом, выточек, шлицев, отверстий в маховике, особенно близ периферии, где окружная скорость высока. Но этими мерами много, конечно, не выиграть.

Если приглядеться к формулам, определяющим вентиляционные потери, повнимательнее, можно заметить, что эти потери сильно возрастают с увеличением относительной окружной скорости между маховиком и кожухом. Есть даже формула, непосредственно связывающая мощность потерь и относительную окружную скорости u между маховиком и кожухом

$$N_n = B u^3 D^2, \quad (24)$$

где B — коэффициент пропорциональности.

Стало быть, если уменьшить окружную скорость вдвое, потери упадут сразу в 2^3 , т. е. в 8 раз! А что, если между маховиком и кожухом поставить дополнительный легкий кожух, вращающийся с половинной скоростью маховика? Тогда относительная скорость упадет вдвое, а потери с учетом того, что трущихся о воздух поверхностей будет уже две, теоретически должны уменьшиться в 4 раза. Это уже немало. Правда, наличие вращающегося кожуха несколько увеличивает потери в подшипниках и создает ряд других потерь, но в общем потери уменьшаются более чем в 2 раза. И при этом не нужно никакого привода для вращения этого кожуха — он вращается сам, увлекаемый потоком воздуха, и именно со скоростью, равной половине скорости

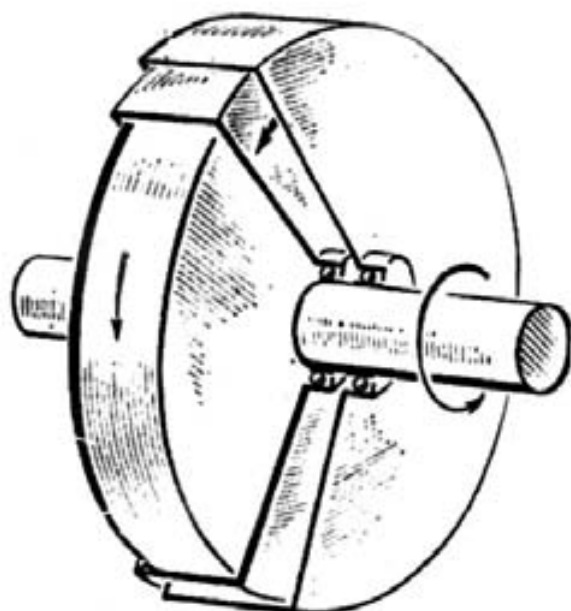


Рис. 28. Маховик с промежуточным вращающимся кожухом

маховика. На рис. 28 показан маховик в таком вращающемся кожухе

Но снижение потерь в 2 раза и даже в 4 раза — это не разрешение проблемы. Для чего нам нужно бесцельно взбаламучивать воздух и тратить на это с таким трудом накопленную энергию? Стало быть, в ко-

жухе (камере вращения) вообще не должно быть воздуха. Вакуумирование или значительное снижение давления в камере вращения представляется наиболее радикальным и перспективным разрешением вопроса снижения вентиляционных потерь.

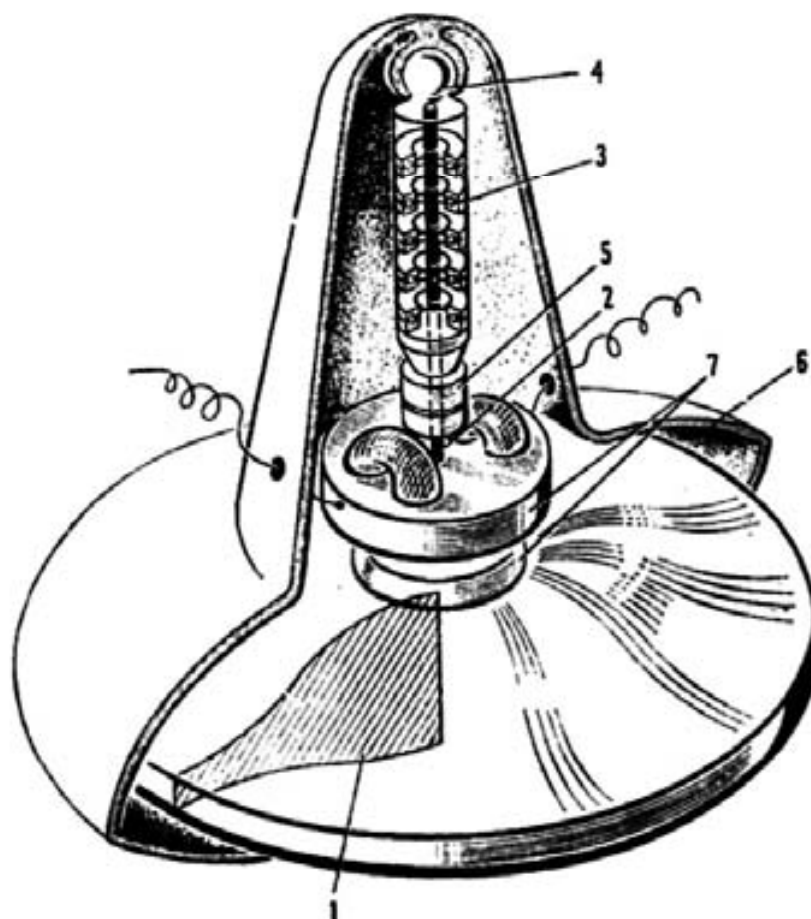


Рис. 29. Инерционный аккумулятор А. Г. Уфимцева с электроприводом:

1—маховик; 2—вал; 3—упругий подвес; 4—шаровой шарнир; 5—подшипник; 6—кожух; 7—мотор-генератор

Но ведь для этого камера должна быть герметичной, а из нее как-то надо вывести вращение! Вот тут-то и заключена основная трудность, преодоление которой привело к созданию ряда методов вывода мощности из герметичной камеры:

- 1) вывод мощности электрическим, гидравлическим или иным немеханическим методом;
- 2) вывод мощности механическим способом через негерметичные уплотнения с постоянной откачкой воздуха;
- 3) вывод вращения из герметичной камеры.

Рассмотрим некоторые основные конструктивные выполнения камер вращения по этим трем методам.

Метод первый. Маховик вместе с электрогенератором помещается в герметичный корпус, а энергия отводится по проводам в виде электрического тока. На такую схему инерционного аккумулятора получил патент № 2290 известный изобретатель А. Г. Уфимцев еще в 1918 г. (рис. 29). На этом принципе основаны системы, примененные в дальнейшем на маховичных автомобилях и гиروبусах. В некоторых из них, например в агрегате Электрогирос для швейцарского гиробуса, камера вращения заполнена разряженным водородом для лучшего охлаждения электромашины.

Однако, несмотря на большую популярность такой схемы для маховичных двигателей, она не лишена недостатков: к.п.д. электрической передачи невысок, схема тяжела и лишает маховичный привод большого преимущества — высокой удельной мощности.

Несколько лучше в этом отношении гидростатический привод конструкции М. И. Щербакова с соавторами (см. гл. III, раздел «Транспорт пороховых складов») по обратимой схеме, но он очень сложен и может нарушить вакуум. Однако он перспективен для машин с основной гидростатической трансмиссией.

Оба привода, однако, не позволяют развивать больших мощностей, которые необходимы, например, для экстренной подзарядки (раскрутки) маховика. Да и к.п.д. этих приводов оставляет желать лучшего. Они не сравнимы даже с обыкновенным валом, который и мощность передает огромную и к.п.д. его чуть ли не 100%. Но как вывести вращающийся вал из герметичной камеры? На это есть ...

Метод второй. Вал выводится из камеры вращения через обычные уплотнения, например манжетные, а воздух, который постоянно подсасывается в вакуумную камеру, непрерывно удаляется насосом. На этом принципе основана, например, герметизация камеры вращения маховика привода Гиректа и Гидректа, созданных Р. С. Кларком¹, английским конструктором маховичных двигателей (см. гл. III, раздел «Рекуперация — это экономичность!»). В его системе воздух из камеры вращения

¹ Р. С. Кларк. Британский патент № 728122.

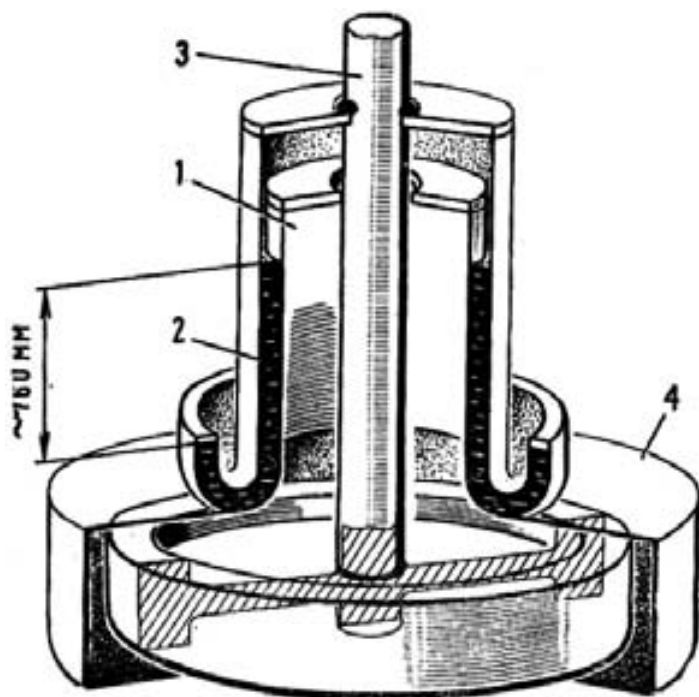


Рис. 30. Жидкостный вакуумный затвор:

1—вакуумная полость; 2—ртуть; 3—вал; 4—камера вращения

удаляется маленьким центробежным насосом, питающимся от самого маховика. Выбег (холостой ход после разгона) такого маховика достигал недели. Это больше, чем маховика системы Электрогиро (12 ч) или А. Г. Уфимцева (14 ч). Но опять неудобство —

нужно постоянно откачивать воздух, необходим вакуум-насос, требуется уход за ним. Вот если бы не нужно было откачивать воздух. Что ж, для этого есть...

Метод третий. Вал выводится из герметичной камеры вращения через какую-либо герметизирующую систему. Их есть несколько типов: статические и динамические жидкостные системы и ситемы с гибким элементом.

К статическим жидкостным системам, применимым к маховикам, относятся системы с жидкостным затвором и магнитные уплотнения. Принцип жидкостного затвора понятен из его схемы на рис. 30. Как видно, габариты этого затвора не малы. Да и высокие скорости вращения вызовут немалые потери энергии в ртути. К тому же ртуть небезопасна.

Более перспективны магнитные уплотнения, состоящие из магнитной жидкости, находящейся в магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами вокруг вала (рис. 31). Магнитная жидкость — это коллоидный раствор феррита в жидкости, например в керосине. Размеры частиц феррита должны быть очень малы — не более 100 ангстрем, иначе жидкость будет нестойкой. Магнитные уплотнения перспективны для уплотнения камеры вращения маховика, им придает важную роль один из ведущих исследователей маховиков д-р Д. В. Рабенхорст. Но и они не лишены недостатков: максимальное давление невелико, особенно при высоких угловых скоростях; керосин испаряется в вакууме, отчего жидкость может загустеть; при высоких угловых скоростях и большом диаметре вала (что необходимо, например для передачи больших мощностей) велики потери в уплотнении, что может вызвать нагрев и выход из строя уплотнения.

Динамические уплотнения — центробежные и винтоканавочные, могут выдержать большой перепад давлений, но работо-

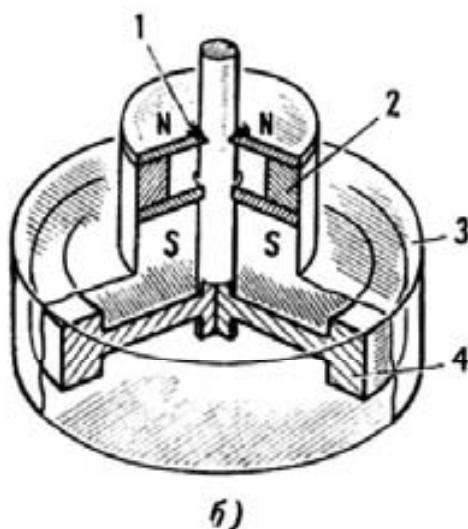
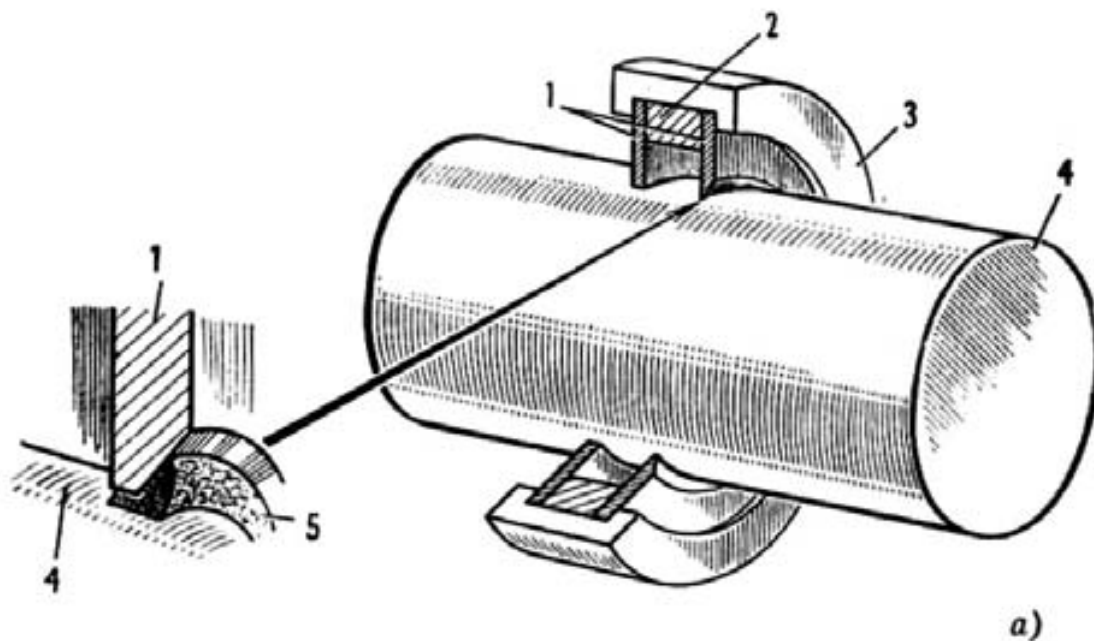


Рис. 31. Магнитное уплотнение:

а—уплотнение вала с помощью магнитной жидкости (1—полюсные наконечники; 2—кольцевой магнит; 3—немагнитный корпус; 4—вал; 5—магнитная жидкость); б—камера вращения маховика, уплотненная магнитной жидкостью (1—магнитная жидкость; 2—кольцевой постоянный магнит; 3—камера вращения; 4—маховик)

способны только при высокой угловой скорости маховика. При малых скоростях уплотнение ненадежно, а при остановке маховика оно и вовсе не уплотняется. Принцип действия центробежного динамического уплотнения ясен из схемы на рис. 32. Масло, находящееся в резервуаре центробежного уплотнения, под действием центробежной силы становится намного «тяжелее» ртути и достаточно 2—3 мм перепада его уровня в одной полости над другой, чтобы обеспечить уплотнение вакуумной камеры. Но, как было отмечено, это уплотнение работоспособно только в динамике, т. е. при вращении, а как раз при вращении в нем теряется много энергии. Несколько меньше потери в винтоканавочном уплотнении, описанном в специальной литературе по уплотнениям. но и они работоспособны только в движении.

И, наконец, уплотняющие системы с гибкими звеньями. Эти системы позволяют держать наиболее высокий вакуум. Их можно разбить на два основных типа — сильфонные и волновые.

Сильфон — это гофрированная упругая пластинка или трубка. Сильфоны известны автомобилистам по термостату системы

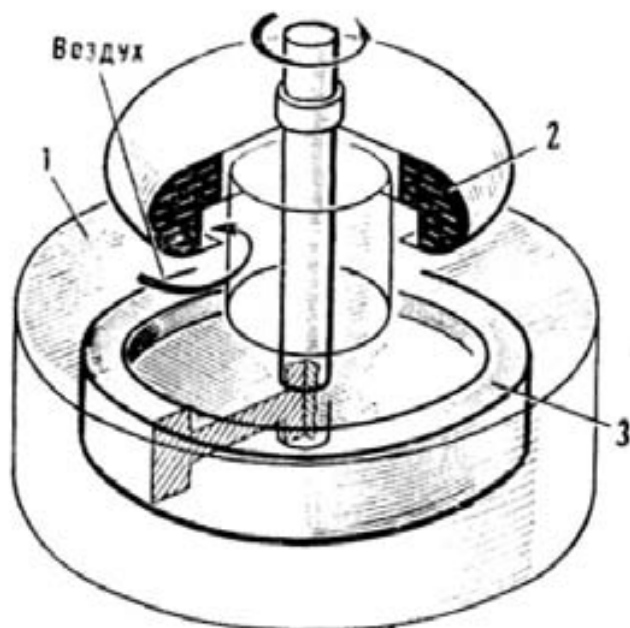


Рис. 32. Центробежное динамическое уплотнение:

1—вакуумная камера вращения; 2—жидкость (масло); 3—маховик.

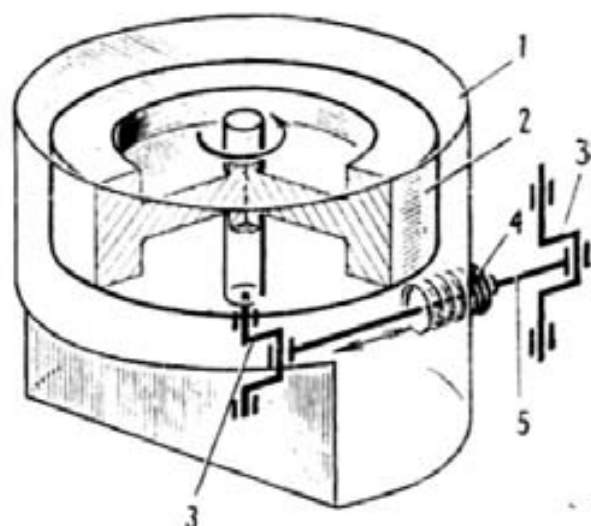


Рис. 33. Схема передачи вращательного движения через стенку с помощью промежуточного преобразования его в возвратно-поступательное и герметизации сифоном:

1—вакуумная камера вращения; 2—маховик; 3—кривошип; 4—сифон; 5—шатун.

охлаждения. Сифон легко деформируется, сохраняя упругость, и это его свойство используется для герметизации при передаче вращения в вакуум.

Проще всего передать из вакуума при помощи сифона возвратно-поступательное движение. Для этого вращательное движение надо преобразовать в возвратно-поступательное, например кривошипно-шатунным механизмом, а затем уже передать с

помощью сифона из вакуума (рис. 33). Затем можно снова преобразовать его во вращательное или использовать так.

Вращательное движение можно передать через герметичную стенку и с помощью поводковой муфты (рис. 34).

На основе поводковых муфт создано много разнообраз-

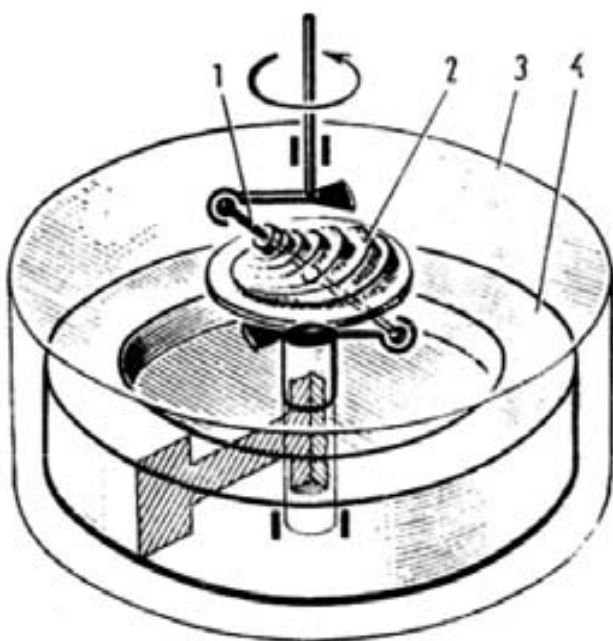
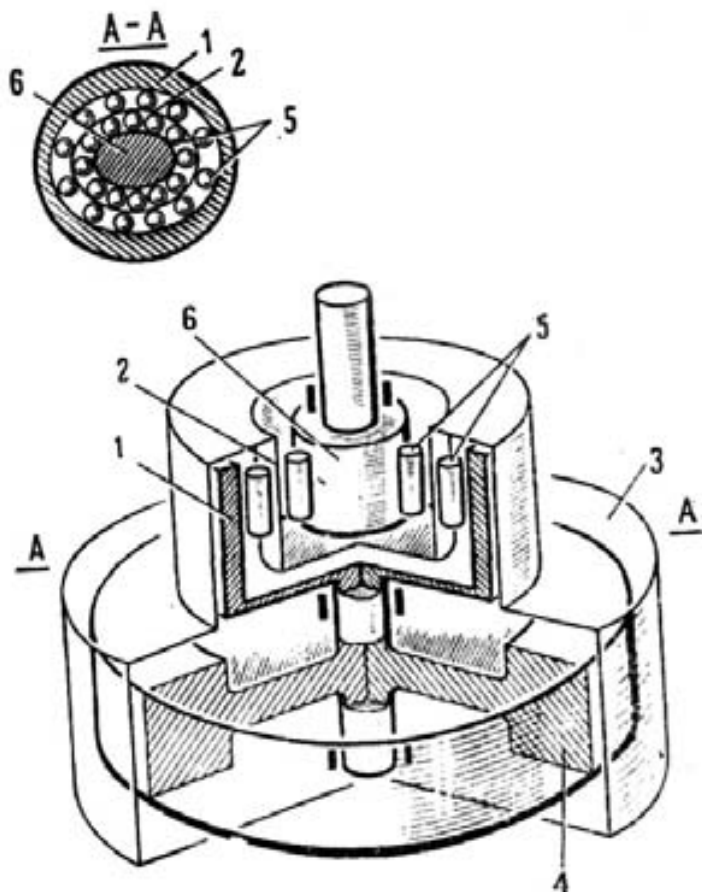


Рис. 34. Схема передачи вращения через герметичную стенку с помощью поводковой муфты:

1—поводок; 2—сифон; 3—вакуумная камера вращения; 4—маховик.

Рис. 35. Схема передачи вращения через герметичную стенку с помощью волновой муфты:

1—внешняя обойма; 2—гибкий стакан; 3—камера вращения; 4—маховик; 5—ролики (шарики); 6—генератор волн



разных систем передачи вращения через герметичную стенку. Достоинством этих систем является возможность поддержания в камере вращения высокого вакуума и надежность его сохранения. Недостаток же — невысокий передаваемый вращающий момент и угловая скорость, т. е. малая мощность передачи.

Пожалуй, перспективнее всех (это только на наш взгляд и пока, так как грозным соперником всех систем передачи вращения через герметичную стенку является магнитное уплотнение для передачи высоких мощностей из вакуума) системы с волновыми муфтами. Устройство волновой муфты одного из типов ясно из схемы на рис. 35. Генератор волн — кулачок эллипсной формы, вращаясь, изгибает гибкий стакан, придавая ему в сечении форму кулачка-эллипса. Внешняя обойма, имея внутреннее отверстие такой же эллипсной формы, «следит» за волной, возникающей на стакане, и вращается синхронно генератору. Для уменьшения трения между генератором, стаканом и обоймой находятся ролики. Это как бы волновая передача с передаточным числом, равным единице. К слову, волновая передача, как известно, также пригодна для передачи вращения через герметичную стенку, но увы, только в одну сторону, так как она обладает свойством самоторможения при использовании ее как ускоряющей передачи.

Волновая муфта передает большие вращающие моменты при достаточных угловых скоростях, т. е. большие мощности. Слабое звено волновой муфты, как и всех волновых передач, — невысокая долговечность гибкого звена.

Известен и способ передачи вращения через герметичную стенку с помощью магнитных муфт (рис. 36). Стенка, через которую передается вращение магнитной муфтой, должна быть немагнитной, чтобы через нее проникало магнитное поле, и не должна проводить ток, иначе будут большие потери энергии на

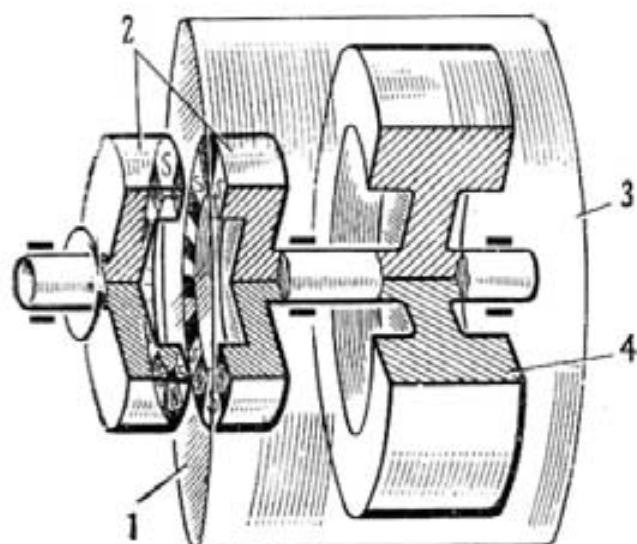


Рис. 36. Схема передачи вращения через герметичную (немагнитную и непроводящую) стенку с помощью магнитной муфты:

1—немагнитная и непроводящая перегородка; 2—магниты; 3—камера вращения; 4—маховик

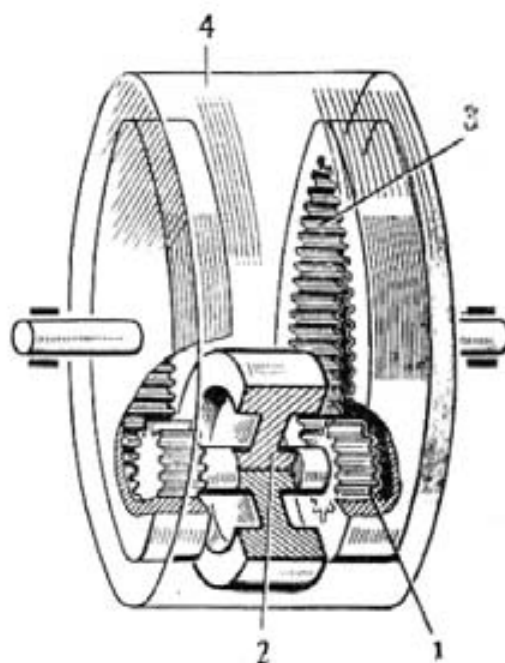


Рис. 37. Схема передачи вращения маховика из герметической камеры через замедленное вращение самой камеры:

1—шестерня; 2—маховик; 3—венец; 4—камера вращения

вихревые токи (токи Фуко) и стенка эта будет нагреваться. Магнитные муфты довольно громоздки и не позволяют передачу больших крутящих моментов. Магнитную муфту нельзя использовать как муфту включения на ходу — она не «поведет» и будет лишь дрожать. Для включения магнитной муфты надо обязательно выравнивать угловые скорости обеих полумуфт. Зато магнитные муфты хорошо передают большие угловые скорости.

И, наконец, последний способ (хотя их еще очень много) передачи вращения из герметичной камеры — через вращение самой камеры¹ (рис. 37). Этот способ позволяет одновременно и передавать вращение из камеры, и существенно уменьшить угловую скорость вращения на выходном звене. Камера выполняется по диаметру большей, чем маховик, и в ней на торцах укрепляются два венца (зубчатых или гладких). На этих венцах своей осью (тоже зубчатой или гладкой) сидит маховик. Если начать вращать камеру на своей оси, то маховик, отклоняясь в сторону и вверх, будет стремиться скатиться вниз и, обкатываясь своей осью по венцу, будет раскручиваться. Особенно велик момент раскручивания, если венец и ось зубчатые. Раскрутив маховик, т. е. накопив в нем энергию, можно отбирать мощность от вращающейся камеры. Маховик будет отклоняться в другую сторо-

¹ Н. В. Гулиа. Авторское свидетельство № 353095. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 29, 1972 г.

ну, но тоже вверх и «вести» камеру. Разумеется, момент, передаваемый таким устройством, невелик, и вся конструкция громоздка. Кроме того, маховик и камера обязательно должны вращаться в вертикальной плоскости, что не всегда приемлемо. Но каждой системе свойственны свои специфические достоинства и недостатки и трудно пока указать среди них наилучшую, пригодную для всех случаев. Возможно, конечно, что такая система и будет создана в дальнейшем. Иногда целесообразно применять и разные системы ввода и вывода вращения в камере. Например, зарядку-раскрутку маховика, когда передаваемая мощность максимальна, можно вести и через негерметичное уплотнение и вал большого диаметра с откачкой воздуха насосом и питанием его от той же зарядной станции. А рабочий ход, когда мощность сравнительно невелика, можно осуществлять с передачей вращения через стенку хотя бы той же магнитной или волновой муфтой. Отверстие для вывода зарядного вала при этом заглушается. При холостом же ходе для возможного уменьшения всех видов потерь маховик целесообразно отключить от системы передачи вращения (предоставить выбегу).

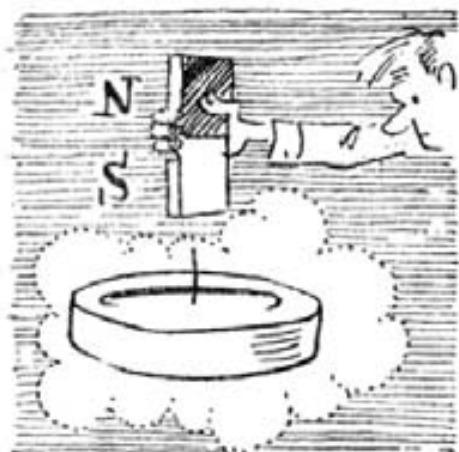
Потери энергии в опорах, хоть и относительно невелики при вращении маховика в воздушной атмосфере, но с уменьшением вентиляционных потерь становятся основными, а при достаточно высоком вакууме в камере вращения являются практически единственным источником потерь энергии. К тому же с повышением вакуума в камере вращения подшипники оказываются во все более невыгодных эксплуатационных условиях и при достаточно высоком вакууме имеют весьма ограниченные несущую способность и долговечность. В вакууме, как известно, плохо держится смазка, шарики подшипников, «приликая» к дорожкам качения, быстро выкрашиваются. Для смазки подшипников в вакууме применяют даже покрытие золотом и то без большого успеха.

Момент трения в подшипниках качения, обычно применяемых в качестве опор оси маховика, определяется по выражению

$$M_{\text{н}} = 0,5Gfd \text{ Н} \cdot \text{см}, \quad (25)$$

где G — вес маховика, Н; f — приведенный коэффициент трения в подшипниках качения, меняющийся примерно от 0,001 до 0,004 в зависимости от качества подшипника; d — диаметр вала под подшипником, см.

Кроме потерь на перекатывание шариков или роликов под действием веса маховика, иногда следует учитывать еще и потери, вызванные качением шариков под действием собственной центробежной силы. Эти потери играют заметную роль только при весьма высокой угловой скорости маховика и разгрузке опор от его веса, например, с помощью магнитной подвески, о которой речь пойдет ниже. Помимо этого потери в подшипниковых узлах включают еще и потери в уплотнениях, гидродинамические поте-



ри в смазке, потери от биений при неуравновешенности маховика и прочие менее существенные потери.

Потери энергии в опорах могут быть значительно уменьшены применением специальных подвесов маховиков. Для валов с вертикальной осью вращения наиболее удобным и эффективным методом снижения потерь в подшипниках является магнитное подвешивание. В настоящее время магнитное подвешивание используется большей частью в точных приборах.

Первые исследования магнитного подвешивания тел проводились еще Эрншоу и Максвеллом в середине прошлого века, однако ряд вопросов, связанных с магнитным подвешиванием, остался неисследованным.

Схема разгрузки опор маховика путем магнитного подвешивания показана на рис. 38. Маховик 1 поддерживается в подвешенном состоянии с помощью кольцеобразных постоянных оксидобариевых магнитов 2. Полюса магнитов и зазоры между ними выбраны таким образом, чтобы диск находился в устойчивом равновесии по вертикальной оси. Для устранения боковых перемещений предусмотрены шарикоподшипники 3, в которых ось 4 маховика помещена на скользящей посадке. В процессе испытаний, чтобы избежать заметного влияния вентиляционных потерь, маховик разгонялся до частоты вращения, не превышающей 240 об/мин.

Экспериментальные исследования магнитной подвески показали значительное снижение потерь энергии в подшипниках при вывешивании массивного диска с помощью магнитов. Так, например, момент трения в подшипниках без применения магнитной подвески составил 0,17 Н см. При вывешивании же диска с помощью магнитов были получены средние значения момента трения 0,007 Н см или около 0,0012 Нсм/кг. Это обуславливает очень малые внутренние потери энергии в аккумуляторе. Подвешивание же маховика в вакуумной магнитной подвеске без непосредственного контакта с опорами (рис. 39) практически устраняет потери энергии при вращении.

На наш взгляд, наиболее приемлемым способом снижения потерь энергии в подшипниках инерционного аккумулятора является магнитное комбинированное подвешивание маховика¹,

¹ Н. В. Гулиа. Авторское свидетельство № 174909. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 11, 1965 г.

Н. В. Гулиа, М. П. Башкова. Авторское свидетельство № 304506. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 17, 1971 г.

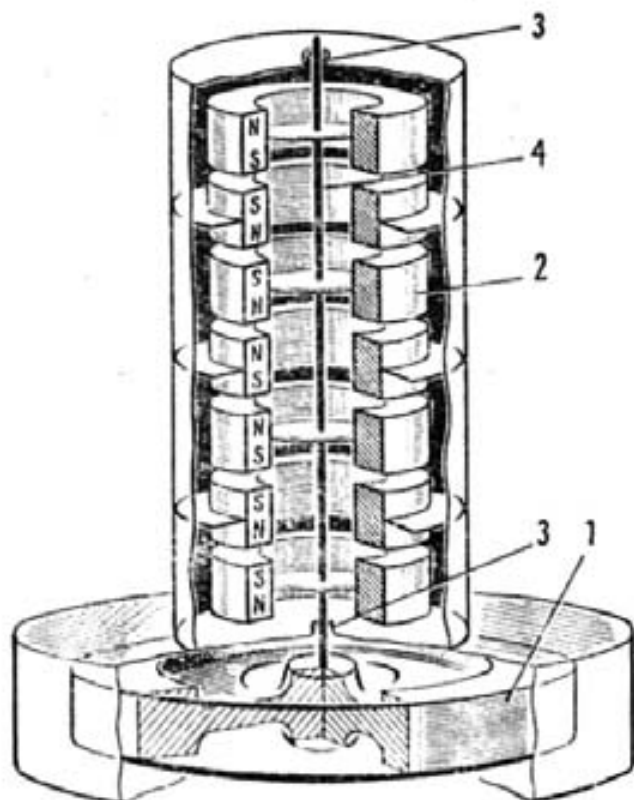


Рис. 38. Схема стенда магнитной подвески маховика:

1—маховик; 2—магниты; 3—подшипники; 4—ось

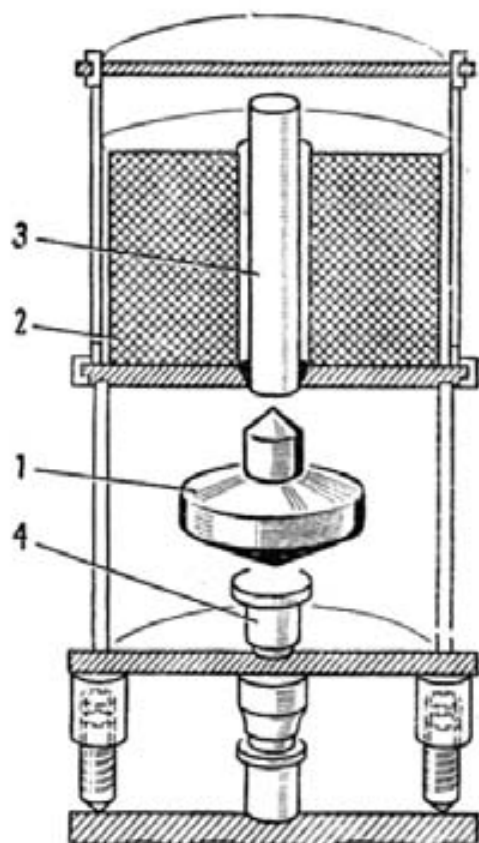


Рис. 39. Схема подвески маховика в вакууме без непосредственного контакта с опорами:

1—маховик; 2—электромагнит; 3—сердечник; 4—следящая система для поддержания маховика на определенной высоте

т. е. применение магнитной подвески с постоянными магнитами совместно с подшипниками. Эксперименты, проведенные на стендах с магнитным подвешиванием маховика, показали значительное снижение сопротивлений в подшипниках — до 20—25 раз. Ввиду того что эксперименты проводились как на металлическом, так и на неметаллическом стендах, удалось определить величину магнитных потерь в подвеске.

С ростом угловой скорости потери в магнитной подвеске возрастают в зависимости от анизотропности магнитного поля. Для конструкций с оксидно-бариевыми постоянными магнитами в металлической обойме потери на магнитные сопротивления могут быть вычислены по эмпирической формуле

$$P = Kn^2 \text{ Вт/кг}, \quad (26)$$

где P — мощность магнитных потерь; K — эмпирический коэффициент (для описанной конструкции, например $K = 0,66 \cdot 10^{-10}$ Вт/кг); n — частота вращения подвешенной детали, об/мин.

Однако наибольшую перспективу для опор маховиков, работающих в вакууме, особенно глубоком, таит явление сверхнизкого трения, недавно открытое группой советских ученых. Оказывается, ряд известных материалов, применявшихся и ранее для подшипников с твердой смазкой в вакууме, при соответствующем их облучении, например ядрами гелия, или просто потоком электронов, снижают коэффициент трения практически до нуля. Стало быть, вакуум не только не является помехой, но и непременным условием достижения сверхнизкого трения. Консультации, полученные мной у авторов открытия, в частности у д-ра техн. наук А. А. Силина и Е. А. Духовского, подтвердили техническую осуществимость создания подшипников сверхнизкого трения для маховиков с вакуумной камерой вращения. И тогда маховичные двигатели практически лишатся внутренних потерь энергии, что обеспечит им почти 100%-ный к. п. д. Есть отчего прийти в восторг конструктору маховичных двигателей! Итак, поговорим вкратце...

О БУДУЩЕМ, О ПЕРСПЕКТИВАХ

Поистине, создав сверхпрочные волокна, сверхсильные магниты, сверхнизкое трение и сверхвысокий вакуум, техника сегодняшнего дня словно позаботилась о маховичных двигателях, обеспечив им блестящие перспективы.

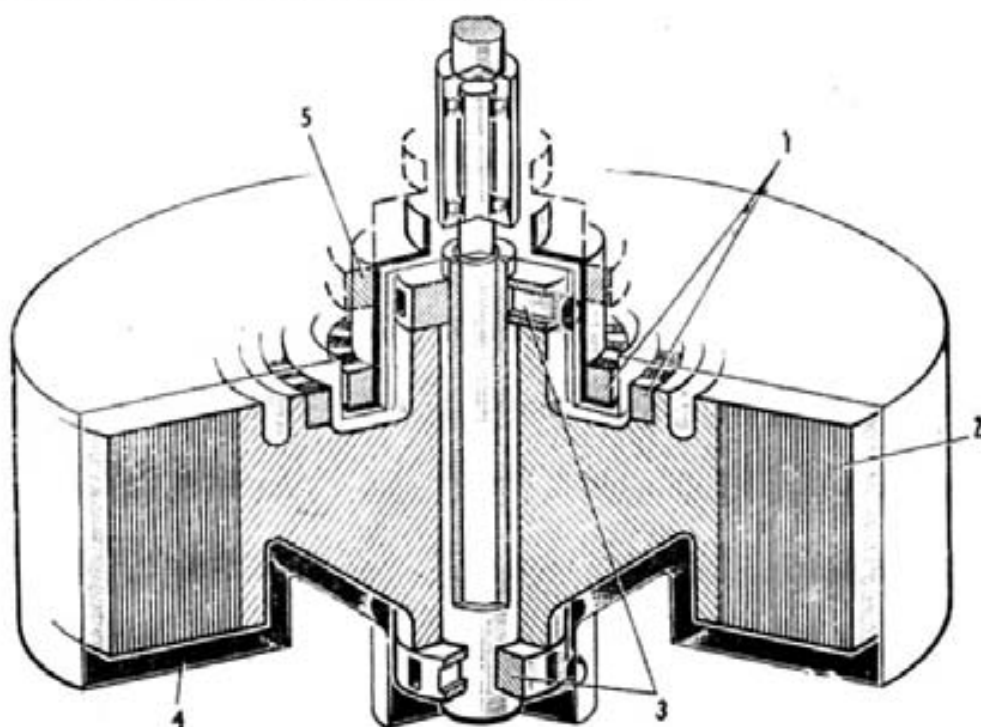


Рис. 40. Перспективный маховичный двигатель:

1—магнитная муфта; 2—витой обод из сверхпрочных ните- и лентовидных материалов; 3—подшипники сверхнизкого трения; 4—вакуумная камера вращения; 5—ведомая магнитная полумуфта (отключена)

Попытаемся представить маховичный двигатель будущего каким бы фантастическим он ни выглядел, ориентируясь на реальные достижения науки и техники сегодняшнего дня. Мы не будем касаться таких узких конкретных вопросов, как трансмиссии от маховика до рабочего органа машины, использование гироскопического эффекта или борьба с ним, способ разгона маховика и пр. Попытаемся представить лишь сердце маховичного двигателя — его энергетический блок, аккумулятор — двигатель. При этом не исключено, что отдельные узлы нашего двигателя, существующего пока лишь в воображении, будут в жизни выглядеть несколько иначе.



Обратимся к рис. 40. Прежде всего массивный обод, навитый из сверхпрочных волокон, обеспечивает высокую плотность накопленной энергии. Будучи навит из стальной проволоки с прочностью в 5000 Н/мм^2 такой обод накопит энергию в $3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$. Навитый из графитового волокна при прочности 3150 Н/мм^2 , но в пять раз меньшей плотности, обод накопит уже около 10^6 Дж энергии в килограмме массы. Полученные уже несколько лет назад кварцевые волокна при фантастической прочности в $37\,000 \text{ Н/мм}^2$ и плотности, вдвое большей, чем у графита, обеспечат плотность энергии свыше $5 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ или 1400 Вт-ч на килограмм массы обода. Это огромная плотность энергии, намного превышает плотность энергии любых электрических аккумуляторов. А ведь прочность новых получаемых в лабораториях мира материалов растет буквально с каждым днем! Разрыв такого маховика, как показал эксперимент, безопасен.

Камера вращения маховика вакуумная, давление в ней не более $10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$ Такое разряжение практически устраняет вентиляционные потери, а отсутствие паров воды благотворно действует на прочность витого обода.



В последнее время появились новые, еще более перспективные материалы для маховиков — это монолитные, специально термообработанные сверхпрочные стекло и кварц. Благодаря термообработке и специальной подготовке поверхности эти материалы выдерживают колоссальные напряжения: стекло до $3,5$, а кварц до $10\,000 \text{ Н/мм}^2$. Из этих материалов можно делать маховики в виде дисков равной прочности,

придавая их сечению наиболее выгодную форму. По энергетическим показателям эти маховики близки к наиболее перспективным витым супермаховикам. Характерно, что разрыв этих маховиков тоже безопасен — при разрушении маховик мгновенно разлетается в пыль. Это происходит настолько быстро, что если бы от него оторвался кусочек, то он превратился бы в пыль быстрее, чем достиг бы стенки кожуха! Правда, это явление еще недостаточно изучено.

Опоры, выполненные из материала, проявляющего при облучении сверхнизкое трение, например из дисульфида молибдена, обеспечивают уменьшение потерь в сотни раз по сравнению с подшипниками качения при более высокой несущей способности. Мощность, затрачиваемая на облучение подшипников сверхнизкого трения, весьма мала, она меньше, чем потребляемая лампочкой карманного фонаря. Не исключается применение здесь и магнитной разгрузки опор от силы тяжести маховика. Внутренние потери в такой системе подвески настолько малы, что маховик будет вращаться с одной раскрутки многие месяцы.

Отбор мощности может производиться магнитной муфтой на основе перспективных сверхсильных постоянных магнитов, уже имеющихся в технике, но пока еще дорогих. При холостом ходе маховика наружная полумуфта может выводиться из магнитного взаимодействия с находящейся в камере и останавливаться. При необходимости включения муфты наружная полумуфта доводится до синхронной скорости, например, гистерезисным способом (с помощью хотя бы медного кольца на полумуфте), а затем включается трансмиссия. Трансмиссия может быть любой — электрической, гидравлической, механической. Между исполнительным механизмом и выходным валом маховичного двигателя может быть установлен и центробежный аккумулятор для обеспечения желаемой рабочей характеристики.

Такой маховичный двигатель может служить универсальным двигателем для любой машины, не говоря уже о транспортных, особенно эксплуатируемых в городе. Этот двигатель приведет и к созданию не известных сегодня машин, неосуществимых с двигателями сегодняшнего дня.

Но не пора ли опуститься на землю? Говорят, что синица в руках лучше, чем журавль в небе. Так, отвлечемся же пока от нашего маховичного «журавля» и посмотрим, какую маховичную «синицу» мы держим в руках сегодня.

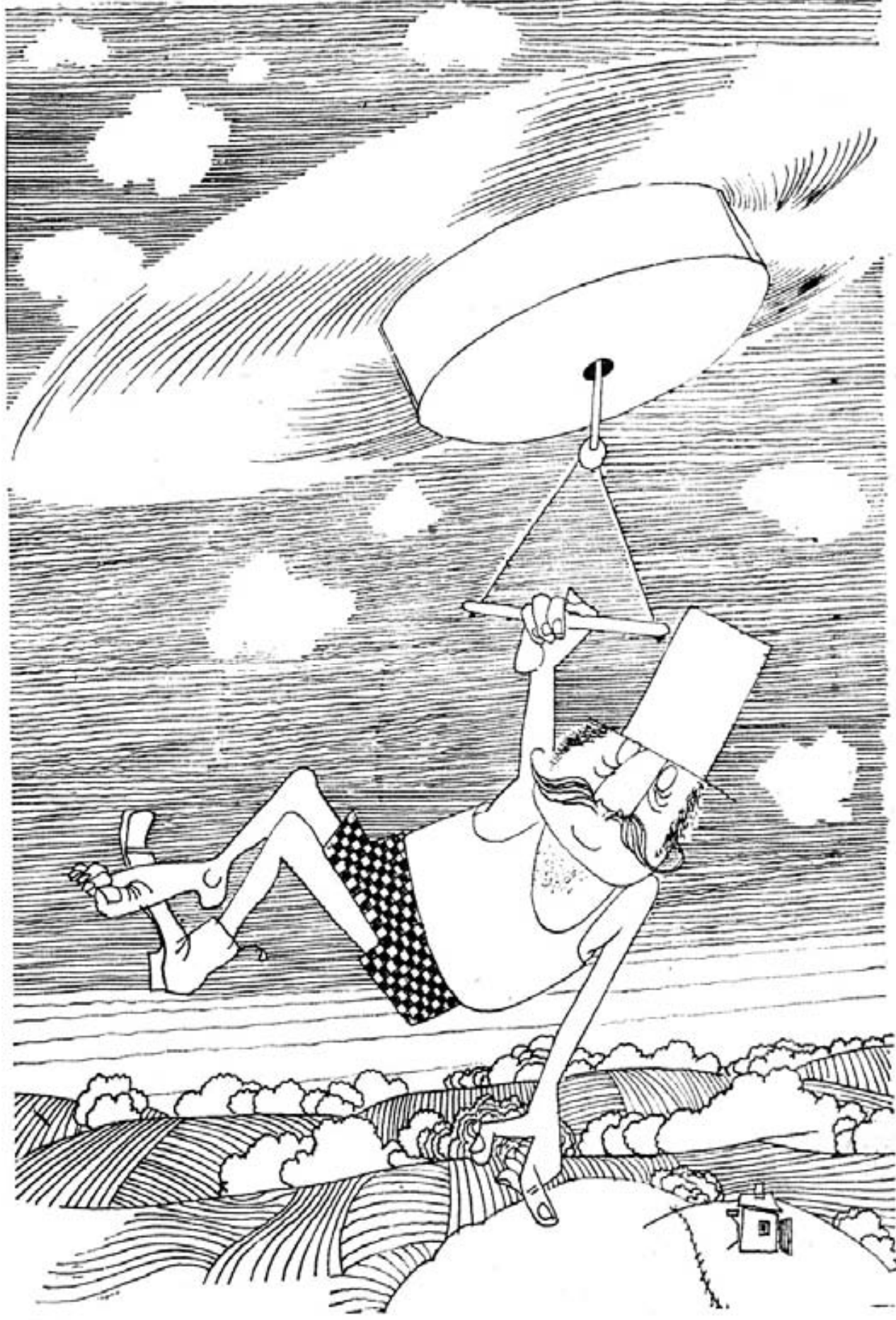
Более ста лет назад инж. В. И. Шуберский предложил использовать для движения экипажа инерционный аккумулятор-маховик, имеющий огромные потенциальные возможности в качестве двигателя автомобиля. Маховик способен выделять огромную, практически неограниченную удельную мощность, а срок зарядки (раскрутки) маховика может быть как угодно мал. Маховик накапливает и выделяет энергию в виде механической, именно такой, какая и нужна автомобилю (да и не только авто-

мобилью) для движения, срок консервации этой энергии в современных маховиках достаточно велик — более недели. Способность к эффективной рекуперации энергии при спусках и торможении позволяет экономично использовать накопленную в маховике энергию. Маховик чрезвычайно долговечен, совершенно не выделяет никаких побочных продуктов, может стабилизировать кузов автомобиля благодаря гироскопическому эффекту. Маховичный двигатель может прекрасно дополнять двигатели внутреннего сгорания и электроаккумуляторные двигатели в так называемых «гибридных» схемах, значительно повышая эффективность силового агрегата автомобиля.

Следует отметить, что маховичные двигатели как самостоятельные, так и в «гибридных» схемах значительно повышают экономичность автомобиля. Стоимость километра пробега автомобиля с маховичным двигателем значительно меньше, чем с автономным силовым агрегатом любого другого типа, в том числе и электроаккумуляторным.

Маховичный двигатель в гибридной схеме с двигателем внутреннего сгорания позволяет более чем вдвое снизить расход топлива, повышая в то же время динамические качества автомобиля. Таким образом, сохраняя чистоту атмосферы, маховичный двигатель сохраняет нам и дефицитное топливо, запасы которого на Земле не неисчерпаемы.

Долгое время существенные недостатки маховика (в основном низкая удельная энергоемкость и громадная опасность разрыва) тормозили применение инерционных двигателей для автомобилей. Современное развитие науки и техники подготовило хорошую почву для радикального увеличения полезных свойств маховика, ставшего в самые последние годы вполне конкурентоспособным с электроаккумуляторами. По ряду показателей маховик уже сегодня существенно превышает электроаккумуляторы. Все это позволяет полагать, что в перспективе маховик будет применяться в качестве основного двигателя аккумуляторного автомобиля, а также широкой гаммы других машин и агрегатов, использующих сейчас тепловые двигатели.



«... диалектике нередко приходится довольно долго дожидаться истории. Вероятно, прошли многие тысячелетия со времени открытия добывания огня трением до того, как Герон Александрийский (около 120 г. до н. э.) изобрел машину, которая приводилась во вращательное движение вытекающим из нее водяным паром. И прошло еще снова почти две тысячи лет, пока не была построена первая паровая машина...»

ЭНГЕЛЬС

ГЛАВА II

МАХОВИКИ В МАШИНАХ

Все сказанное Энгельсом по поводу паровой машины в еще большей мере относится и к маховикам. История в этом случае заставила ждать диалектику очень долго. Действительно, явление движения по инерции, за счет накопленной кинетической энергии, было известно человеку, по-видимому, еще до открытия добывания огня. Бегущий дикарь не мог не заметить, что он, уже перестав тратить свою силу на бег, продолжал некоторое время двигаться под действием какой-то неведомой силы. Запущенный в зверя камень, бревно, сброшенное с берега в воду, продолжают двигаться еще долго после того, как их оставила рука человека. И древний мудрец не мог не заметить этого. Однако же понадобились многие тысячелетия, пока гончар из города Ур не совершил революцию в механизации ручного труда, создав первый «маховичный» гончарный круг. И все же нужно было еще пять с половиной тысячелетий, чтобы перейти от «маховичного» гончарного круга к первым реальным машинам на основе маховика. И, как уже часто случалось в истории техники, этими первыми машинами были машины военного назначения. И в самой первой из них, использующей для движения только накопленную кинетическую энергию, можно было увидеть...

МАХОВИК В РОЛИ КАМИКАДЗЕ

Машиной этой была боевая торпеда. Как и мрачные японские смертники — камикадзе, маховик хладнокровно доставлял смертоносный груз к вражескому кораблю и, погибая сам, отправлял его на дно.

Маховичная торпеда была не первой в своем роде: еще в 1864 г. англичанином Робертом Уайтхэдом была изобретена самодвижущаяся торпеда, приводимая в действие сжатым воздухом и пневматическим мотором. Однако эта торпеда имела два

больших недостатка: она плохо выдерживала заданное направление движения и ее легко можно было обнаружить по пузырям на поверхности воды. Скорость торпеды была невелика — всего 33 км/ч на расстоянии около 0,5 км, и атакуемому кораблю легко можно было увернуться от ее удара. Поэтому США и не купили торпеду Уайтхэда, хотя англичане и продавали ее за мизерную цену в 2000 фунтов. США в это время уже имели свою торпеду, превосходящую по боевым качествам торпеду Уайтхэда, — торпеду с маховичным двигателем.

В 1870 г. американец лейтенант (позднее адмирал) Джон Адамс Хауэлл приступил к выполнению проекта, заключавшегося в усовершенствовании имеющейся уже в течение 10 лет во флоте США торпеды с маховичным двигателем. Проект этот был рассчитан на 19 (!) лет, а уже в 1883—84 гг. Хауэлл создал первую торпеду, в которой маховик играл роль не только двигателя и аккумулятора механической энергии, но и гироскопического стабилизатора заданного направления движения.

В первом варианте торпеда Хауэлла имела диаметр 35 см и массу 120 кг. Взрывчатка помещалась в носовой части торпеды и имела массу 20 кг. Масса маховика составляла 45 кг. Маховик разгонялся до скорости 10 000 об/мин, накапливая при этом около 400 000 Дж энергии. Торпеда покрывала расстояние около 500 м со скоростью до 30 км/ч.

В следующем, более усовершенствованном варианте торпеда могла развивать скорость 45 км/ч, проходя путь до 1 км. Разгон производился внешним (паровым) двигателем за 30 с. Эта торпеда (рис. 41) имела сигарообразную форму длиной 2,4 м и была обшита медным листом. Примерно в середине торпеды был помещен стальной маховик в виде обода с диском, диаметром около 31 см и толщиной 15 см. Передаточное число привода маховика к гребным винтам составляло 1,2 : 1. Гребные винты имели регулируемый угол наклона лопастей, зависящий от частоты вращения маховика. Направление движения торпеды корректировалось рулем, связанным с особым маятниковым стабилизи-



рующим устройством; действие этого устройства зависело от поворота торпеды, вызываемого прецессией маховика. В результате торпеда приобретала спиралеобразную траекторию с постепенно уменьшающимся радиусом, что и вело к ее столкновению с атакуемым судном.

В 1888 г. по проекту Хауэлла в Лондоне стали производить торпеды двух модификаций: диаметром 36 и 46 см. Меньшая имела массу 208 кг, включая 40 кг взрывчатки и маховик массой 52 кг и диаметром

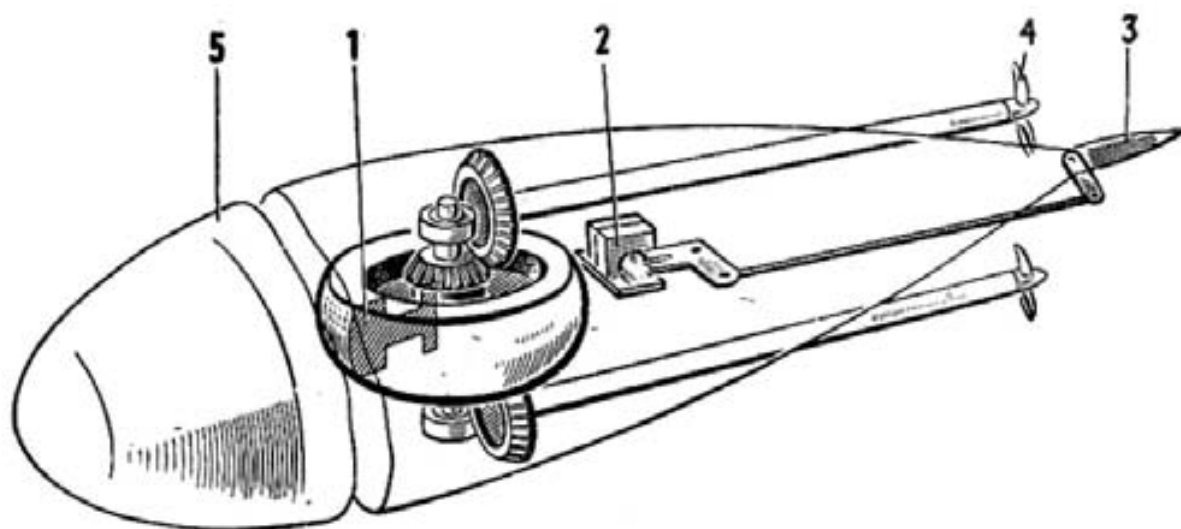


Рис. 41. Торпеда Хауэлла с приводом от вращающегося маховика:
1—маховик; 2—регулятор; 3—руль; 4—винт; 5—взрывчатка

35 см. Торпеда развивала скорость 47 км/ч на расстоянии около 1 км. Большая торпеда при общей массе 460 кг содержала маховик диаметром около 45 см и массой 132 кг. Маховик разгонялся паровой турбиной Доу до 12 000 об/мин. Эта торпеда развивала скорость 60 км/ч на расстоянии около 800 м и 52 км/ч на расстоянии свыше 1 км.

И, наконец, новый вариант торпеды Хауэлла содержит маховик диаметром 45 см и массой 160 кг. При 21 000 об/мин он накапливает энергию до 10^7 Дж. Этого хватает, чтобы пройти около 1,5 км при скорости 55 км/ч.

Общим недостатком всех маховичных торпед является то, что при подготовке их к запуску на раскрутку маховика тратится дополнительно около 1 мин — для боевой обстановки это много. Кроме того, гребные винты с меняющимся шагом были весьма сложны для техники тех лет.

Как бы то ни было торпеда Хауэлла имела неоспоримые преимущества перед торпедой Уайтхеда, и специалисты по артиллерии и торпедам единодушно одобрили ее. Однако, как это часто случалось и с другими выдающимися изобретениями, торпеда Хауэлла стала жертвой политической игры. Но, несмотря на незаслуженное поражение от заведомо слабого противника, маховик не ушел из военного дела. Вскоре мы видим маховичный двигатель уже на авианосцах, где он помогает «выстреливать»...

ИЗ КАТАПУЛЬТЫ — САМОЛЕТОМ!

Одним из основных условий успешного запуска самолетов с авианосцев являются большие ускорения и малый путь разбега. Для этой цели за рубежом применяются специальные ката-

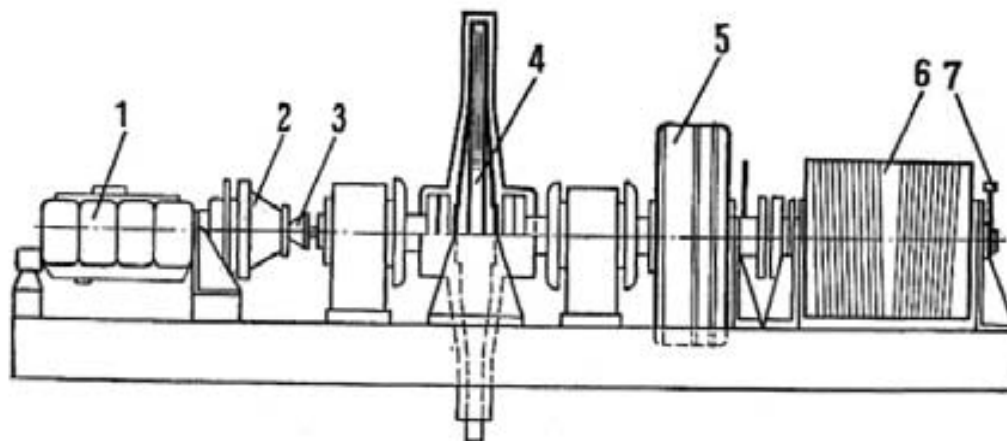


Рис. 42. Катапульта для запуска самолетов с авианосцев:
1—двигатель; 2—гидромуфта; 3—автолог; 4—маховик; 5—гидромуфта высокой мощности; 6—лебедка; 7—рычаг пуска

пульты, разгоняющие самолет. Инерционный привод такой катапульты оказался наиболее легким, экономичным и дешевым по сравнению с приводами других типов. Одна из таких катапульт представлена на рис. 42. Бензиновый двигатель в 115 кВт разгоняет маховик диаметром 2,1 м и связан с ним обгонной храповой муфтой. Маховик установлен в массивных опорах, необходимых для восприятия гироскопических усилий от качки корабля. Тяговый барабан лебедки катапульты связан с маховиком через планетарную передачу, встроенную в барабан и 32-дюймовую гидромуфту с регулируемым наполнением. Муфта позволяет развивать крутящий момент 36 000 Н·м при частоте вращения барабана от 0 до 2100 в 1 мин. Возрастание крутящего момента до полной величины происходит примерно за 0,5 с.

Маховик имеет форму, близкую к форме диска равной прочности с толщиной на периферии 9 см, а близ центра 15 см и имеет массу 3 т. Момент инерции маховика 1350 кг·м² позволяет накопить около 32 млн Дж энергии при 2100 об/мин. Энергия, сообщаемая самолету, не превышает 0,9 млн Дж, что объясняется буксованием гидромуфты и снижением частоты вращения маховика не более чем до 1630 об/мин. Разгонный двигатель восстанавливает эту энергию за 2,5 мин, причем за это время трос наматывается на барабан и новый самолет готовится к запуску. Эта катапульта позволяет производить разгон самолета до 120 км/ч при ускорении 3,25 g.

Другой, более мощный тип катапульты содержит маховик массой 12 т, разгоняемый электродвигателем мощностью 900 кВт. Эта катапульта позво-



ляет производить разгон самолета «Локхид F-80» до 300 км/ч за 4,1 с при пути пробега всего около 100 м или до 400 км/ч при длине пробега 150 м. Катапульта снабжена мощной гидромуфтой и электроприводом.

Маховичный двигатель помогает не только запускать самолеты. Необыкновенно высокая надежность этих двигателей (маховик не только не может «заглохнуть», но его и просто остановить невозможно, пока он не выделит всю накопленную в нем энергию) способствовала применению их на летательных аппаратах; быстрый взлет и безопасная посадка гарантировались даже при отказе всех других двигателей. И начало этому положил маховичный вертолет, так называемый...

«ПРЫГАЮЩИЙ ГИРО»

Маховик, установленный на вертолете в Шотландии еще в 30-х годах, приводил во вращение воздушный винт с регулируемым наклоном лопастей. Во время разгона маховика постоянным источником энергии — мотором, лопасти воздушного винта установлены так, что его подъемная сила равна нулю. Маховик при этом легко и без излишних потерь энергии разгоняется мотором. После отключения разгоняющего мотора лопастям задается необходимый угол атаки, и вертолет совершает вертикальный взлет. По мере сбавления оборотов маховика увеличивается угол атаки винта с сохранением тяги. Когда энергия маховика иссякает, вертолет медленно опускается.

В описанной конструкции маховик применяется для развития кратковременной высокой мощности, необходимой для вертикального старта. Маховичный двигатель оказался легче любого другого двигателя, что важно для работы в таком режиме. «Прыгающий Гиро» — так был назван этот вертолет. Он представлял интерес как устройство, обеспечивающее вертикальный старт и безопасную посадку аппарата (рис. 43).

В настоящее время фирма «Локхид» (США), специализирующаяся на авиации и космических системах, по контракту с вооруженными силами США создает спасательный вертолет с маховиком. Преимуществом этого вертолета является то, что он способен взлетать и набирать высоту в 5 раз быстрее обычного. Маховик разгоняется электродвигателем мощностью 1,5 кВт до 28 000 об/мин, а затем подключается к воздушному винту. Маховичный двигатель не требует охлаждения, чем выгодно отличается от обычного, и позволяет производить до девяти взлетов без подзарядки маховика. Ясно, что маховичный двигатель не заглохнет, и путешествие на таком вертолете намного безопаснее, чем на обычном. Маховик обеспечивает не только надежный взлет, но и посадку. И еще одно — маховичный двигатель рабо-

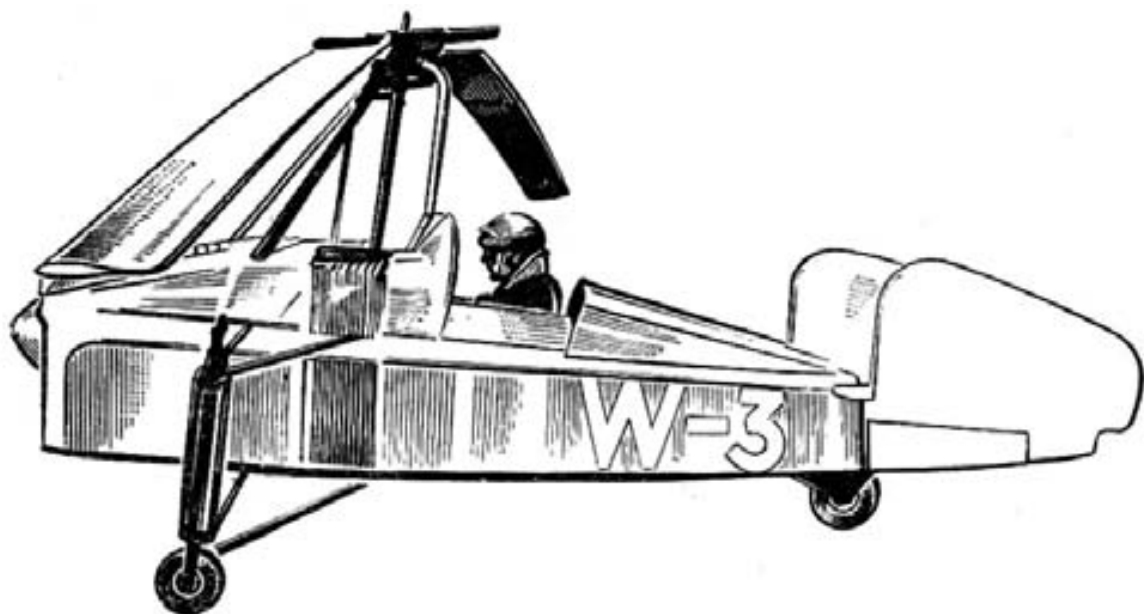


Рис. 43. Маховичный вертолет «Прыгающий Гиро»

тает совершенно бесшумно. Это ценнейшее в городских условиях свойство двигателя могло бы позволить производить взлет и посадку вертолетов и самолетов прямо в густонаселенных районах города. Д. В. Рабенхорст, имея в виду это же свойство маховика, предлагает использовать его в качестве двигателя самолетов. Современные маховики вполне справились бы с этой задачей.

Кроме фирмы «Локхид» вопросами маховичных двигателей занимается известная авиационная фирма «Юнайтед Эркафт Корпорейшн» (США), и это неспроста — маховикам в авиации принадлежит большое будущее, контуры которого обрисовываются уже сейчас.

Интересно, что в этом применении маховиков игрушки обогнали серьезные конструкции: детские инерционные вертолеты, взлетающие после разгона от шнурка, уже давно известны и пользуются широким спросом.

С помощью маховичного двигателя можно произвести взлет не только вертолета, но и самолета, особенно легкого. Извечная проблема легких самолетов — ограниченная мощность двигателя (90—120 кВт). Более мощный мотор позволил бы сократить разбег, дал бы возможность круче набирать высоту, подниматься с небольших площадок. Это то, что и требуется от легких самолетов. Однако, чем мощнее двигатель, тем больше его вес и тем больше требуется для него горючего. В итоге вес машины прогрессивно растет, и самолет рискует перейти в более тяжелую «весовую категорию». Тут неоценимую помощь могут оказать маховичные двигатели, что было признано зарубежными авиаконструкторами. Ведь маховики развивают практически неограниченную мощность, а современные их конструкции обеспечивают вес меньший, чем двигателя любого другого типа. За рубе-

жом пока отдают предпочтение маховичным двигателям с супермаховиком щеточного типа при угловой скорости 30 тыс. об/мин, хотя такие же показатели (если не лучше) имеют и ободковые супермаховики. Ценно и то, что маховичный двигатель «заряжается» энергией буквально за несколько минут. В результате маховик массой 13 кг способен в течение 20 с отдать мощность 115 кВт, а маховик массой 57 кг — 225 кВт в течение 60 с — время, вполне достаточное для взлета. Кроме того, в полете раскрученный маховик гарантирует безопасность: при остановке мотора самолет с его помощью может летать еще 3 мин — время, во многих случаях вполне достаточное, чтобы выбрать площадку и благополучно приземлиться.

Как мы видим, энергии маховика достаточно, чтобы обеспечить взлет или посадку летательного аппарата. Но на тех же летательных аппаратах, да и на других машинах, содержащих тепловые двигатели, маховик довольно успешно применялся и для запуска двигателя. Сейчас авиационные двигатели уже не заводят маховиком, но конструкция маховичного или инерционного стартера может применяться и для запуска труднозапускаемого двигателя любого типа. Несколько оборотов заводной рукоятки, маховик разогнан, затем подключение к двигателю и...

УДАЧНЫХ СТАРТОВ!

Инерционные стартеры, в частности стартеры типа «Эклипс», были очень распространены лет 40 назад и выпускались ведущими фирмами «Бендикс» (США), «Ротакс» (Англия) и др. Впоследствии, когда двигатели стали заводиться легче, инерционный стартер постепенно вышел из употребления. Однако, конструкция стартера представляет интерес, так как она характерна для агрегатов, требующих развития значительной мощности при кратковременном включении, и может служить как пусковой двигатель достаточно широкого назначения.

Инерционный стартер представляет собой маховик в виде обода с диском, соединенный через понижающую планетарную передачу, многодисковую фрикционную и кулачковую муфты с валом двигателя. Маховик приводится во вращение заводной ручкой. После разгона маховика включается кулачковая муфта, и вал двигателя раскручивается, благодаря чему двигатель запускается. Фрикционная муфта, включенная постоянно, играет роль предохранительной.

На стартере фирмы «Ротакс», Англия (рис. 44), разгон маховика массой около 2 кг производится ручкой через заводной вал и планетарный привод с передаточным числом 1:180. Вращению ручки с частотой 65 об/мин соответствует частота вращения маховика 12000 об/мин. При этом маховик накапливает энергию 4800 Дж. Затем включается кулачковая муфта, и вра-

шение маховика через трансмиссию с передаточным числом 150:1 передается на вал двигателя. При крутящем моменте, достигающем 180 Н м, двигатель заводится.

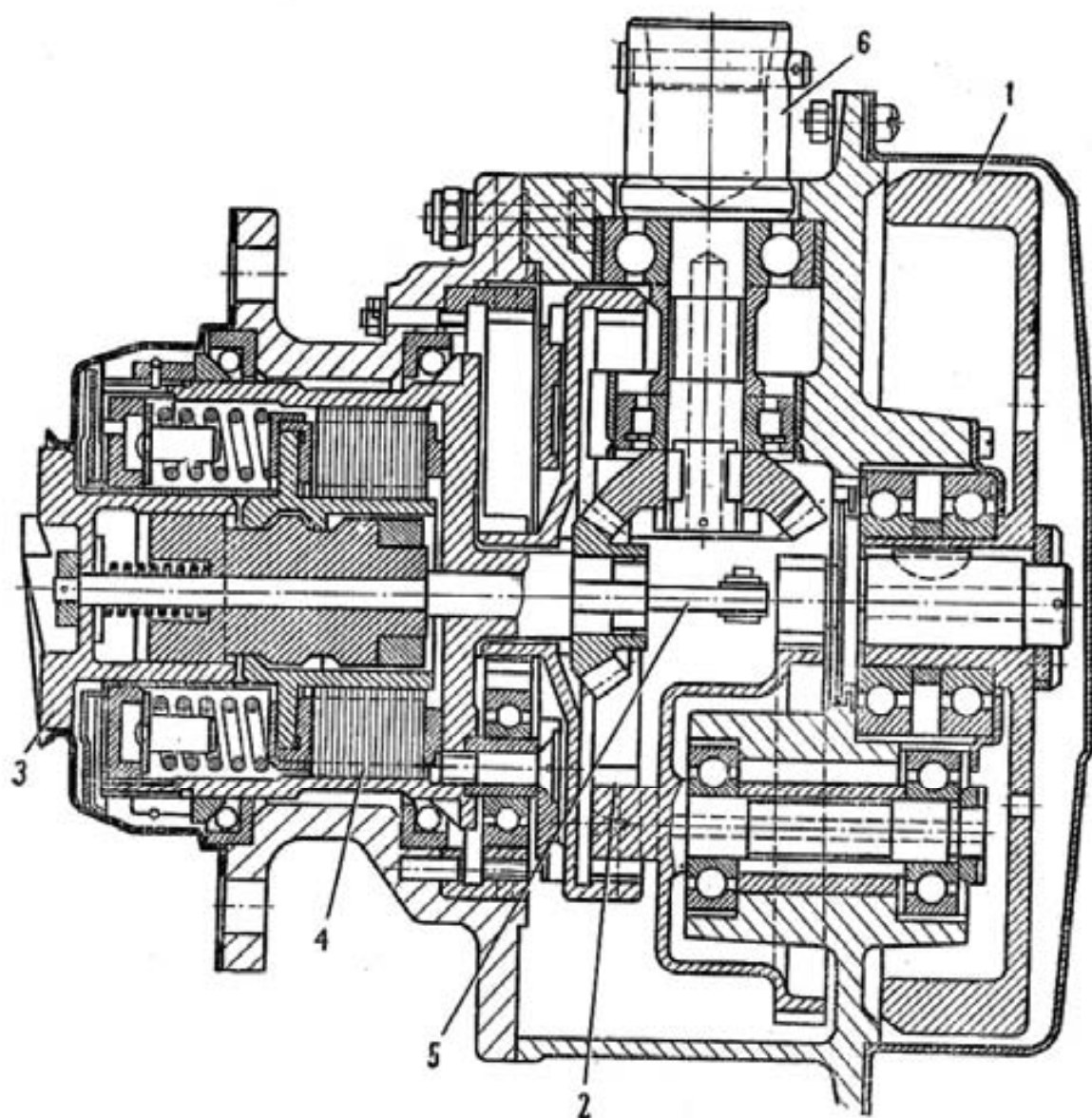


Рис. 44. Инерционный стартер:

1—маховик; 2—понижающая зубчатая передача; 3—вал двигателя; 4—предохранительная фрикционная муфта; 5—кулачковая муфта; 6—заводная ручка

Впоследствии для разгона маховика стали использовать серийные электромоторы, позволяющие достигнуть 10 000 об/мин маховика за 25 с.

В инерционных стартерах маховик демонстрирует одно из наиболее полезных свойств — способность достаточно медленно накапливать кинетическую энергию, а затем выделять ее с высокой интенсивностью, так сказать, в ударном темпе. Еще ярче эта способность маховика проявляется в так называемых машинах ударного действия. Что это за машина? Если побывать на

любом машиностроительном заводе, то там всегда найдется цех, при подходе к которому мы начинаем физически ощущать работу установленных там машин ударного действия. Цех этот может называться по-разному: заготовительный, кузнечный, штамповочный и т. д., а вот установленные там машины ударного действия все работают почти в одном режиме, который можно охарактеризовать словами футбольного комментатора:

УДАР! ЕЩЕ УДАР!

И здесь, в отличие от футбола, удар почти всегда достигает цели. А энергию для удара, при котором машина совершает полезную работу, поставляет маховик. Речь идет, конечно, о маховичных машинах ударного действия, так как бывают еще и паровые, пневматические и другие.

К маховичным машинам ударного действия относятся ковочные машины, механические ножницы, прессы, дробилки, копры. Суть их заключается в достаточно медленном накоплении кинетической энергии в маховике путем разгона его двигателем небольшой мощности и последующем весьма кратковременном рабочем процессе — ударе, при котором и выделяется кинетическая энергия маховика, идущая на совершение полезной работы: ковку, резку, дробление, прессование и пр.

На рис. 45 показан один из таких прессов, использующих энергию маховика, с кривошипным механизмом передачи движения от маховика к рабочему органу — штампу. Все машины ударного действия, использующие энергию маховика, отличаются между собой в основном типом передачи. Движение от маховика к исполнительному органу машины может передаваться кривошипным, винтовым, эксцентриковым и другими механизмами, а также гидрореперачей.

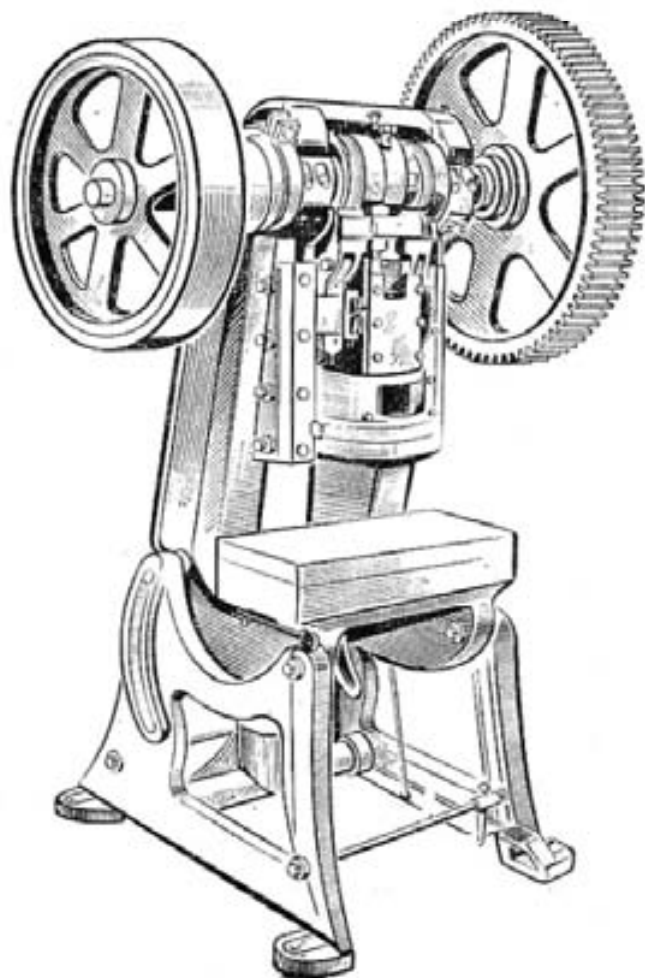


Рис. 45. Кривошипный пресс с маховиками

Применение маховиков в металлообработке не ограничивается машинами ударного действия. Знаменитая фраза шофера «Антилопы-Гну» Адама Козлевича...

ЭХ, ПРОКАЧУ!

Может в буквальном смысле охарактеризовать роль маховика еще в одной металлообрабатывающей машине — прокатном стане.

Маховики позволяют здесь преодолевать пиковые сопротивления, возникающие при прокате металла. Маховик при этом может быть соединен с прокатными валками как жестко (в старых конструкциях), так и через электропривод (в более новых конструкциях). В энергетическом узле прокатного стана для изготовления алюминиевых листов, например, мотор, разгоняющий маховик, имеет мощность 6000 кВт. Маховик имеет диаметр 3,6 м, толщину на периферии около 30 см, массу 28 т. При 750 об/мин он накапливает энергию 120 млн Дж. Маховик соединен с четырьмя генераторами, позволяющими развивать пиковую нагрузку 7500 кВт каждый. Ток от генераторов подается к моторам, вращающим прокатные 144-дюймовые валки. Цапфы маховика помещены в разъемные подшипники скольжения, позволяющие поднимать маховик непосредственно вверх для снятия и замены втулок.

Энергоемкость маховика в зависимости от мощности электромотора можно выбрать по приближенному, но простому правилу: на 1 кВт номинальной мощности электромотора следует брать $1,5\text{--}2 \cdot 10^4$ Дж кинетической энергии маховика. Конечно, эти цифры могут быть изменены в зависимости от частоты и продолжительности подачи металла в валки.

Для сталепрокатных станов размеры и вес маховиков еще внушительнее. Например, для блюминга с мощностью прокатного двигателя 7500 кВт применяется почти пятиметровый маховик массой 82 т, а на прокатном стане завода «Серп и молот» в Москве стоит, пожалуй, самый большой в мире маховик-гигант массой в 100 т!

Но самым неожиданным применением маховиков в технологии обработки металлов является, пожалуй...

ИНЕРЦИОННАЯ СВАРКА

Казалось бы, что имеют общего маховик и сварка? Но оказалось, что роднящим их связующим звеном является эффект разогрева металлов при трении их один о другой. На этом эффекте основана сварка металлов трением, первые патенты на которую были выданы еще в конце прошлого века. Однако широкое практическое применение сварка трением получила только сейчас.

Простейшая схема процесса сварки дана на рис. 46. Две детали, которые надо сварить, располагаются по одной оси и закрепляются в сварочной машине. Одна из них неподвижна, а другая приводится в быстрое вращение. Прижатые друг к другу торцы деталей разогреваются до $1000\text{--}1300^\circ\text{C}$, после чего детали должны возможно быстрее прекратить относительное вращение. Раскаленные торцы деталей при этом привариваются один к другому. Нетрудно заметить, что основной расход энергии возникает в течение весьма непродолжительного времени — при вращении

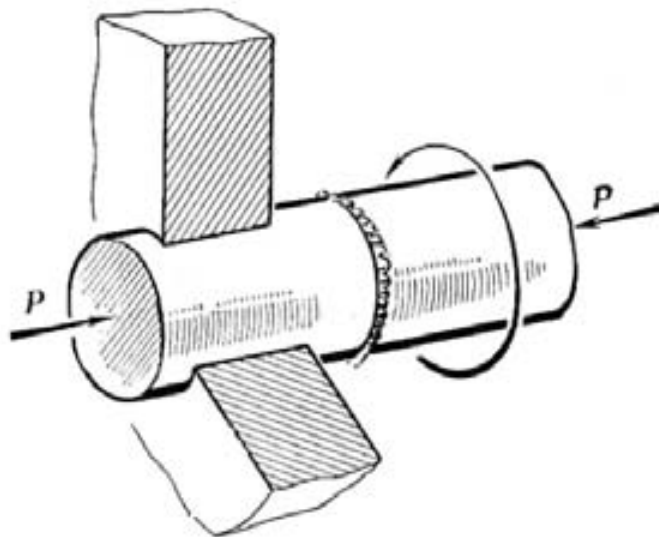


Рис. 46. Схема процесса сварки трением

свариваемых деталей. А остальное время машина работает вхолостую или простаивает. И естественно, что ученым и конструкторам пришла в голову идея использования маховика для накопления энергии от работающего маломощного двигателя для последующего интенсивного выделения ее при сварке. Отсюда и название процесса — инерционная сварка.

Нетрудно заметить, что в конструкциях маховичных стартеров, ударных и сварочных машин, летательных аппаратов и других маховик используется для сглаживания «пиковых» нагрузок и временного повышения мощности машин. Аналогичным образом можно использовать маховик...

В ПОМОЩЬ ЗЕМЛЕКОПУ

Землекопу механическому, конечно — экскаватору, скреперу, бульдозеру.

В качестве примера использования маховика для временного повышения мощности машин уместно привести конструкции скрепера и экскаватора с инерционными аккумуляторами энергии. Эти конструкции в СССР существовали, правда, только как экспериментальные, однако их положительные качества дают основание говорить об их несомненной перспективности.

Скрепер представляет собой землеройную машину циклического действия. Рабочий цикл ее складывается в основном из копания, когда требуются максимальные мощность и тяговое усилие машины, и транспортировки груженой и порожней машины, когда требуемые мощность и тяговое усилие незначительны. Для

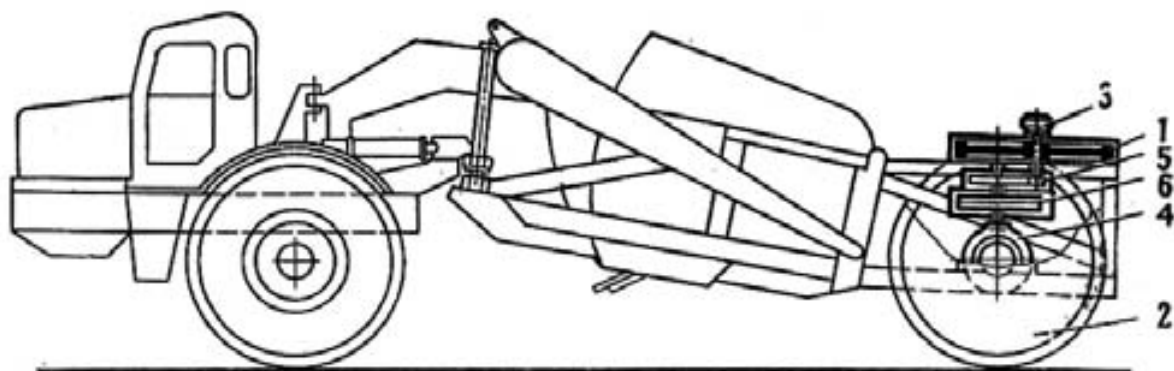


Рис. 47. Схема самоходного скрепера с инерционным двигателем-аккумулятором:

1—маховик; 2—приводное колесо; 3—фазгонный двигатель; 4—дифференциал; 5—редуктор; 6—муфта сцепления

преодоления больших сопротивлений при копании грунта обычно используется трактор — толкач, сообщающий машине дополнительное тяговое усилие.

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте транспортного строительства (ЦНИИСе) при участии автора был изготовлен опытный скрепер с инерционным аккумулятором¹, играющим роль вспомогательного двигателя и приводящим во вращение задние колеса скрепера при копании (рис. 47). Развиваемое при этом тяговое усилие достаточно для выполнения копания и заполнения ковша скрепера грунтом без помощи толкача. Разгон маховика осуществляется при холостом ходе скрепера и избыточной мощности основного двигателя машины с помощью маломощного серводвигателя или непосредственно от колес.

Представляет интерес также конструкция силового агрегата одноковшового экскаватора, снабженного маховиком. Рабочий цикл экскаватора осуществляется при неравномерной загрузке двигателя по мощности. Маховик экскаватора накапливает энергию в период неполной загрузки двигателя с последующей отдачей ее при копании грунта. Таким путем удастся существенно повысить эффективность работы одноковшового экскаватора.

Так, например, если для мощного экскаватора средняя нагрузка составляет 6000 кВт, то пиковая может достигать до 150 000, причем возрастание нагрузки происходит в течение считанных секунд. Наличие же маховика в силовом приводе обеспечивает около половины пиковой мощности. Фирма «Вестингауз» (США) создала на этой основе экскаваторы с электромаховичным приводом, эксплуатируемые сейчас в Австралии. В частности, фирме удалось создать экскаватор с емкостью ковша около 80 м³ с использованием силовой установки относительно малой мощности.

¹ Н. В. Гулиа, И. А. Недорезов, Д. И. Федоров и др. Авторское свидетельство № 171810. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 11, 1965 г.

У нас в стране подобные разработки, проведенные еще в 50-х годах проф. Д. П. Волковым, также показали перспективность маховиков для этих целей.

Циклический характер работы большинства землеройных машин и их неравномерная загрузка по мощности дают основание полагать, что установка инерционных аккумуляторов целесообразна и на других землеройных машинах, например бульдозерах.

Но, пожалуй, наиболее ярким примером установки маховика для преодоления пиковых нагрузок являются маховичные генераторы, где используется буквально...

УДЕСЯТЕРЕННАЯ МОЩНОСТЬ

При работе электрогенератора с двигателем внутреннего сгорания перегрузка агрегата может вызвать остановку двигателя. Для предотвращения этого ротор генератора снабжают маховиком, кинетическая энергия которого позволяет преодолевать временные перегрузки.

На рис. 48 представлен один из таких генераторов, предназначенный для сварки высоковольтной контактной сети. Генератор с двигателем 75 кВт установлен на самоходном шасси. На валу генератора помещен маховик диаметром около 122 см и массой 1 т. Форма маховика близка к диску равной прочности. Двигатель и маховик соединены гидромуфтой. Номинальный интервал частот вращения маховика 2700—3200 об/мин. Сбавляя обороты в этих пределах, маховик выделяет 5 млн. Дж энергии. Гидромуфта служит для обеспечения лучшего разгона маховика двигателем, особенно при старте с места. На полный разгон затрачивается около 4 мин; причем только на разгон от 2700 до 3200 об/мин тратится около 1 мин. Выделение энергии происходит в среднем за 5 с. Мощность, развиваемая при этом генератором, около 1000 кВт. Следовательно, наличие маховика позволяет уменьшить мощность двигателя более чем в 10 раз.

Более мощный стационарный маховичный генератор представлен на рис. 49. Здесь гидромуфта помещена между маховиком и генератором. Маховик разгоняется небольшим мотором до скорости, превышающей номинальную скорость генератора на 40%. Затем гидромуфта постепенно заполняется рабочей жидкостью, и генератор приводится во вращение. Запас скорости позволяет преодолеть кратковременную перегрузку, достигающую 12 000 кВт и более чем в 10 раз превышающую мощность разгонного двигателя. Маховик имеет диаметр около 2,5 м, толщину на периферии 25 см и массу 8,4 т. Система обеспечивает в среднем удельную энергоемкость 1 кВт ч на 1 т массы, отнесенную к напряжению в маховике 10 кН/см². Вентиляционные поте-

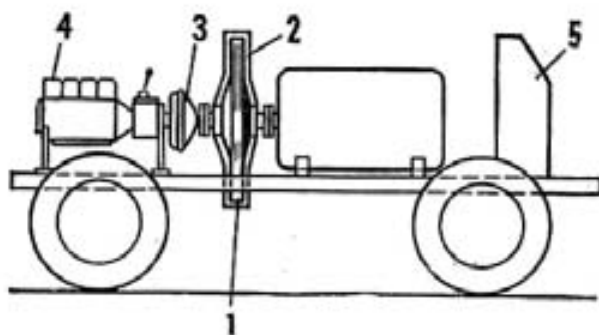


Рис. 48. Маховичный генератор для сварки высоковольтной сети:

1—маховик; 2—кожух; 3—гидромуфта; 4—двигатель; 5—пульт управления

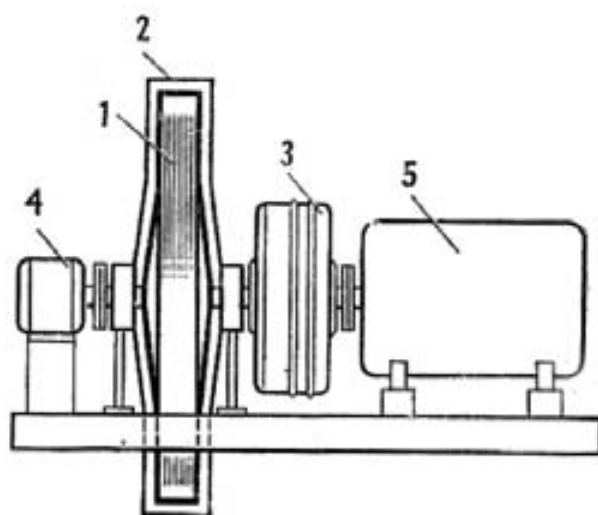


Рис. 49. Стационарный маховичный генератор:

1—маховик; 2—кожух; 3—гидромуфта; 4—мотор; 5—генератор

ри маховика уменьшены путем помещения его в плотно прилегающий кожух.

Подобные генераторы с маховиками устанавливаются на телевизионных ретрансляционных станциях, а также в других случаях, где не должно быть перерывов в подаче электроэнергии. Очень нежелательным явлением в маховичных генераторах является падение угловой скорости при выделении энергии маховиком. Это влечет за собой не только падение напряжения, но, что еще хуже, падение частоты тока, вырабатываемого генератором. Однако использованием описанного выше центробежного аккумулятора, имеющего переменный момент инерции, можно добиться постоянной угловой скорости, а следовательно, и частоты тока при выделении большей части энергии, накопленной маховиком. Кроме того, в последнее время, как следует из зарубежной печати, появились генераторы переменного тока, обеспечивающие постоянную частоту в очень широком диапазоне угловых скоростей. Это постоянство частоты вызывается «навязыванием» такому ротору генератора подмагничивания посторонним источником тока требуемой частоты. На это уходит всего несколько процентов полезной мощности, и в общем генератор имеет достаточно высокий к. п. д.

Описанные способы получения тока постоянной частоты от генераторов с маховичным приводом безусловно расширяют область их применения.

И, наконец, еще один интересный случай применения маховика в генераторе, когда нужно временно увеличить мощность установки почти в 100 раз. Это система энергоснабжения установки для получения регулируемой термоядерной реакции, на машинах типа «Токамак».

Система энергоснабжения одной из этих машин состоит из электродвигателя мощностью 1500 кВт, вращающего маховик диаметром 70 см и длиной свыше метра с частотой 6000 об/мин. Накапливаемая им огромная кинетическая энергия позволяет получить импульс мощностью 100 000 кВт. Этот ток поступает в обмотки машины, позволяя «удержать» плазму, нагретую до 100 млн градусов и таким образом помогает использовать термоядерную энергию.



Но у маховика, кроме чисто энергетических качеств, есть еще одно привлекательное свойство, позволяющее получить при работе маховичных устройств, как это ни парадоксально...

ДЕЙСТВИЕ ... БЕЗ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Ясно, что при работе дрели возникающий реактивный момент действует на работающего с ней человека. Это обстоятельство исключает пользование обычной дрелью в условиях невесомости, где реактивный момент будет вращать самого оператора.

От названных недостатков свободна инерционная дрель¹, питающаяся энергией раскрученного маховика. Вал маховика соединен со шпинделем (патроном), в котором укреплено сверло, бор, шлифовальный круг или иной инструмент. Маховик раскручивается любым способом от источника питания, а затем дрель переносится к месту работы, где и используется накопленная энергия.



Благодаря продолжительности выбега маховика дрель может быть использована на значительном удалении от места зарядки. При работе дрели на оператора действует только тот ничтожно малый реактивный момент, который создается трением в подшипниках и аэродинамическими потерями. Особенно благоприятны условия для работы инерционной дрели в вакууме, где аэродинамические потери отсутствуют.

Инерционная дрель малогабаритна, но может развивать большие мощности. После зарядки от сети 127 В в те-

¹ Н. В. Гулиа. Авторское свидетельство № 207648. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 2, 1967 г.

чение 1 мин дрель просверливает 4—5 отверстий диаметром 4 мм в стальном листе толщиной 5 мм или до 100 отверстий в плотном дереве или пластмассе.

При работе с инерционной дрелью нужно учитывать следующую особенность: для установки ее в исходное положение требуется некоторое усилие, преодолевающее гироскопический момент; однако при сверлении дрель прекрасно сохраняет заданное направление.

Следует заметить, что гироскопический эффект, если он нежелателен, легко устраняется — для этого нужно иметь два маховика, вращающиеся в противоположные стороны.

Если нужно уменьшение частоты вращения выходного вала, то это можно сделать с помощью редукторов, широко используемых на механических гайковертах. Такие редукторы в отличие от обычных не требуют опорного звена и, стало быть, не передают реактивного момента на корпус инструмента.

Рассмотрим еще одно применение маховиков в электростанциях, неразрывно связанное с именем известного русского изобретателя А. Г. Уфимцева, которого А. М. Горький назвал «поэтом техники». Изобретения Уфимцева были необычайно широкого диапазона — от керосиновых ламп до самолетов и от двигателей до лечебных поясов.

Но, на наш взгляд, наиболее интересны и перспективны...

МАХОВИЧНЫЕ ТВОРЕНИЯ «ПОЭТА ТЕХНИКИ»

Анатолий Георгиевич Уфимцев — известный русский изобретатель-самоучка, человек интересной и трудной судьбы, родился в Курске 13 ноября 1880 года.

Особенно знаменит Уфимцев созданием маховичных инерционных аккумуляторов, которые он применил для ветроиспользования, хотя и отмечал их перспективность для транспортных целей. Им были разработаны аккумуляторы разных типов для ветроиспользования, проведен тщательный анализ электрических аккумуляторов, а также «водородного аккумулялирования», т. е. разложения воды путем электролиза на кислород и водород с дальнейшим их использованием; анализ теплового аккумулялирования энергии в водяных баках и, наконец, инерционных аккумуляторов, на которых и был остановлен выбор.

Инерционный аккумулятор, состоящий из вращающегося маховика, соединенного с электрической (см. рис. 29) или механической (рис. 50) трансмиссией, был предложен Уфимцевым в 1918 г. В 1920 г. им был изготовлен инерционный аккумулятор с маховиком массой 30 кг и давлением в камере вращения 2,5—3 мм рт. ст. После 50-минутной зарядки инерционного аккумулятора маховик вращался с частотой 12 000 об/мин. Затем зарядный двигатель отключался, включался генератор и к нему

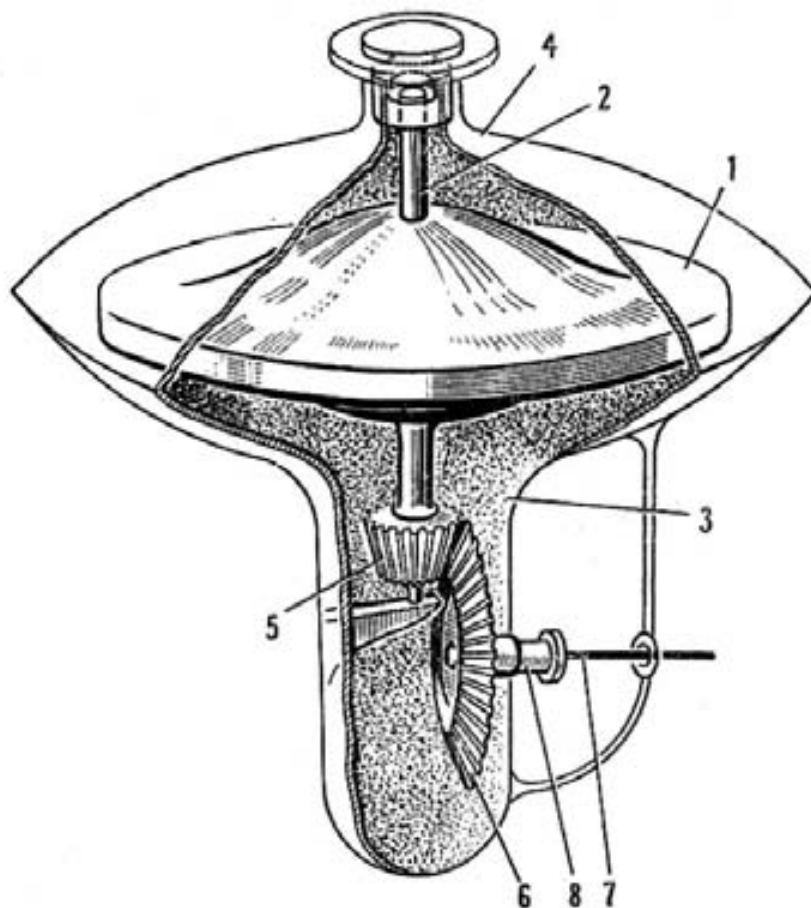


Рис. 50. Инерционный аккумулятор А. Г. Уфимцева с механическим приводом:

1—маховик; 2—вал; 3—кожух; 4—крышка; 5 и 6—малая и большая шестерни; 7—выходной вал; 8—подшипник с уплотнением

подключалась электрическая 5-свечовая лампочка, которая светила в течение 3 ч.

В 1924 г. Уфимцевым была построена более крупная модель инерционного аккумулятора с маховиком массой 320 кг. Этот аккумулятор после зарядки обеспечивал равномерное свечение группы электрических ламп в 1000 свечей в течение часа.

Работы А. Г. Уфимцева по созданию аккумулятора энергии для ветродвигателей приобрели народнохозяйственное значение. Для демонстрации действия нового аккумулятора была построена Курская ветроэлектрическая станция, существующая и по настоящее время.

А. Г. Уфимцев сделал исключительно много для создания новых типов маховичных аккумуляторов и их усовершенствования. И, пожалуй, в любом современном маховичном двигателе есть доля работы и жизни нашего «поэта техники» А. Г. Уфимцева.

Идеи Уфимцева живут, например, в проекте проф. Р. Поста и С. Поста (США), предусматривающем накопление энергии на электростанциях для использования в часы пик при помощи

супермаховиков. Расчет показывает, что накопление энергии с помощью супермаховиков значительно эффективнее и экономичнее, чем применяемое в настоящее время аккумуляирование с помощью подъема воды насосными установками. Ранее, когда маховики изготовлялись из металла, о таких перспективах не могло быть и речи.

В проекте предусматривается накопление 20 МВт энергии в час в супермаховике массой 200 т и диаметром 5 м. Рабочая частота вращения супермаховика 3500 об/мин.

Супермаховик состоит из концентрических колец, навитых из кремниевого волокна, насаженных одно на другое с небольшим зазором, заполненным эластичным веществом типа резины для предохранения от расслоения обода (рис. 51).

Супермаховик помещается в герметичный корпус и соединяется с валом генератора. Устройство работает как генератор при потребности в энергии и как электродвигатель, когда энергия накапливается в маховике. Подсчитано, что затраты на кило-

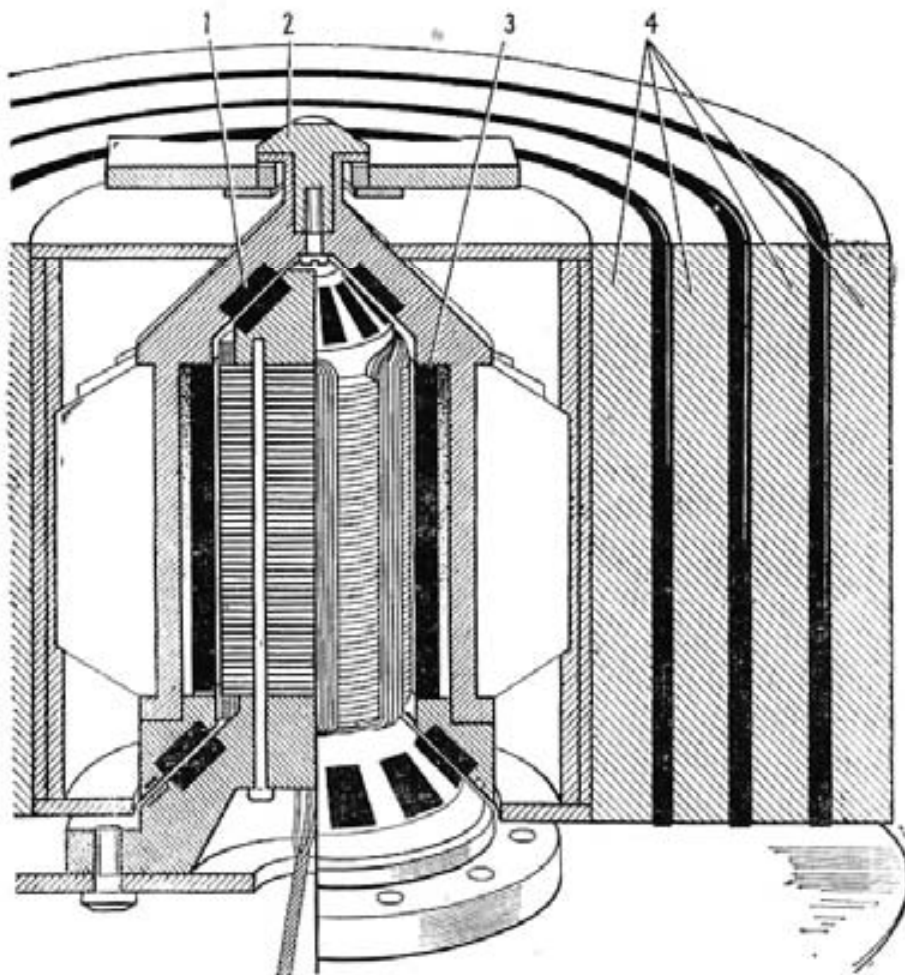


Рис. 51. Гигантский маховик для аккумуляирования энергии электростанций в ночное время:

1—магнитная подвеска; 2—подшипники; 3—мотор-генератор с постоянными магнитами на роторе; 4—«слоеный» маховик

ватт мощности будут в этом случае на 47 фунтов стерлингов меньше, чем при гидроаккумуляции.

Единственное, что вызывает опасение авторов проекта — это случайный разрыв супермаховика. При его разрыве выделится энергия, эквивалентная взрыву 1000 т тринитротолуола. Поэтому энергетический агрегат планируется помещать под землей на безопасной глубине.

Однако, по нашему мнению, эти опасения преувеличены. Опыты по разрыву супермаховиков, описанные выше, показывают, что мгновенно выделяется лишь ничтожная часть энергии, накопленной в маховике, — не более 1—2%. Остальная энергия выделяется достаточно медленно, вызывая лишь тепловой эффект. Еще менее опасен разрыв ленточных супермаховиков.

Итак, маховик в качестве двигателя позволяет значительно увеличить экономичность, производительность и другие полезные качества машин (мы здесь не говорим о транспортных машинах, так как о них пойдет речь особо). Но, к сожалению, иногда от маховика требуют больше, чем он способен дать. Иногда, увлекаясь кинематикой маховичных устройств, авторы разработок забывают о динамической, силовой стороне дела и создают (к счастью, чаще всего на бумаге) нежизненные и даже опасные конструкции.

Конечно, создать маховичный двигатель, который отдаленно (а при ближайшем рассмотрении и очень) напоминал бы вечный двигатель или безопорный инерциод...

ЗАМАНЧИВО, НО, УВЫ, НЕРЕАЛЬНО

Мне приходит много писем от читателей, особенно после выхода в свет той или иной статьи в популярных журналах. Авторы этих писем движет благородное стремление к созданию новых двигателей, преимущественно маховичных. И надо сказать, что во многих из них предлагаются оригинальные и жизнеспособные конструкции. Со многими авторами, выступающими преимущественно от имени предприятий, мы плодотворно сотрудничаем. Но встречаются и совершенно нереальные проекты, причем они в большинстве своем похожи один на другой. Поэтому я их и опишу, чтобы создатели маховичных двигателей впредь не тратили на них время.

Все нереальные проекты можно грубо разделить на три категории: 1) вечные двигатели; 2) инерциоды; 3) псевдоработоспособные маховики.

Вечные двигатели, этот бич изобретателей, никто уже не называет своим именем. Но и под названием «беззаправочный маховичный двигатель» или «инерционный двигатель с самоподпиткой» нетрудно угадать старого знакомого — *perpetuum mobile*. И хотя это и странно, почему-то изобретатели вечных двигателей видят в маховике своего союзника. Вот, например, одна из

идей (рис. 52). Обыкновенный маховичный генератор, состоящий из генератора 1, маховика 2 и электродвигателя 3, какой уже мы рассматривали выше только с маленькой хитростью, становится вечным двигателем. Оказывается надо, предварительно, разогнав маховик электродвигателем и получив напряжение на зажимах генератора, быстро, (чтобы, не дай бог, маховик не успел остановиться!) перекинуть провода от генератора на двигатель.

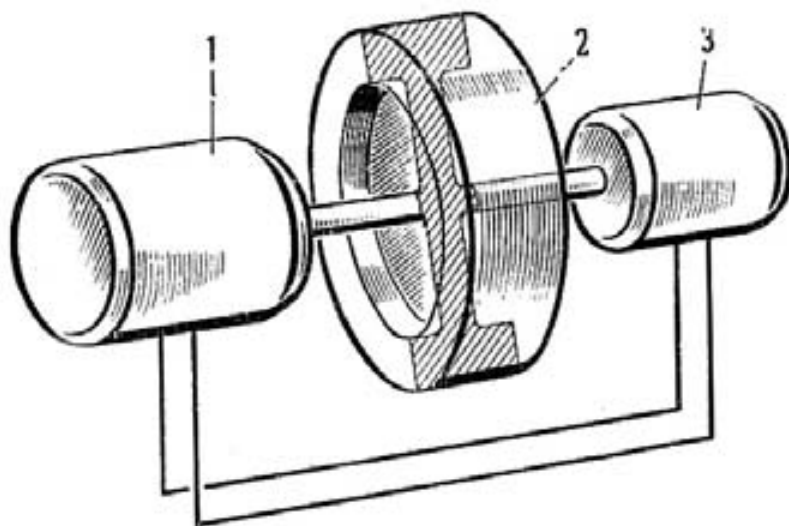


Рис. 52. «Вечный двигатель» на основе маховичного генератора:

1—генератор; 2—маховик; 3—двигатель

Ток, вырабатываемый генератором, будет подпитывать двигатель, двигатель будет разгонять маховик, маховик же, вращая вал генератора, вырабатывать электроэнергию, частично потребляемую, а частично подпитывающую двигатель и так до бесконечности. Можно прекратить добывать уголь, нефть, газ, пытаться регулировать термоядерный процесс. Зачем это, когда вечно вращающийся маховик будет всегда поставлять нам сколько угодно энергии! Каюсь, что и я сам грешен — в детстве предложил именно эту схему и возмущался, когда надо мной смеялись. Но письма с такими схемами приходят не только от детей.

Хочу реабилитировать маховик — он здесь совершенно не при чем. Такой же эффект, что и с маховиком, будет получен и без него. Просто надо соединить генератор с двигателем и валами и проводами и крутануть вручную — завести «вечный двигатель». Думаю, никто не сомневается, что в соединенном по схеме *perpetuum mobile* виде и генератор и мотор остановятся после закрутки быстрее, чем по отдельности.

Были предложения ставить на маховичный автобус воздушный винт, соединенный с генератором, который должен был вращаться от набегающего воздушного потока при движении автобуса. Отличие от предыдущего проекта заключается здесь в

том, что этот вечный двигатель будет иметь еще меньший к. п. д., чем предыдущий, и остановится еще быстрее¹.

Инерциод — штука более тонкая, чем вечный двигатель. Журналы не раз поднимали шумиху по поводу того или иного инерциода, то доказывая их существование, то опровергая его. Почувствовав свежее дело, изобретатели вечных двигателей частично перебросились на инерциод.



Что же такое инерциод? Под этим названием обычно понимается машина, которая может двигаться без опоры, перемещая (вопреки всем законам механики) свой центр тяжести своими же внутренними силами. Классический пример — попытка барона Мюнхаузена вытащить себя из болота за волосы. Большинство авторов, как и родоначальник течения инерциодов — страховый агент Норман Дин, основывает действие своих инерциодов на вращении неуравновешенных маховиков-эксцентриксов. Инерционные силы, вызванные вращающимися маховиками, в одном направлении складываются, в другом — вычитаются и в результате (в фантазии авторов, конечно) возникает равнодействующая сил инерции, направленная в сторону движения машины.

Чтобы не критиковать чужие идеи (а вдруг, чем черт не шутит, они еще и окажутся справедливыми?), раскритикую типичный инерциод, в свое время предложенный и построенный мною. Я даже писал на него заявку в Комитет по изобретениям, но вскоре получил оттуда отрезвляющий ответ². Если он покажется кому-нибудь из изобретателей похожим на его собственную модель, то я с радостью могу уступить авторство.

Инерциод (рис. 53) содержит двигатель 1, кривошипношатунный механизм и неуравновешенные маховички 2, одна сторона которых намеренно утяжелена, например, сверлениями в противоположной стороне. Маховички приводятся в колебательное движение, но с амплитудой не более половины окружности. По мысли автора, центробежные силы утяжеленной части, возникающие при вращательном движении, будут распределяться на той части окружности, по которой движется эта утяжеленная

¹ К сожалению, по ошибке иногда на инерциоды выдают патенты. Например патент Франции № 2101562 выдан на явный инерциод «Устройство, в котором используется центробежная сила в качестве тягового усилия для транспортного средства без внешней опоры».

² Не следует думать, что если на конструкцию вечного двигателя выдан патент, то двигатель обязательно заработает. Патенты Франции № 1244375, 2137205, 2088030, например, выданы как раз на самые типичные вечные двигатели.

часть. Боковые составляющие сил будут устраняться наличием двух маховичков, колеблющихся в противофазе, а составляющая, направленная вперед, просуммируется, и наша машина устремится вперед. И действительно, модель двигалась по столу в указанном направлении! Правда, я пробовал и взвешивать модель в работающем и неподвижном положении, причем подвешенную на пружинке «вверх ногами» и в вакууме, чтобы избежать аэродинамических сил. При включении модель задержалась, но ее вес, который должен был по идее прибавиться за счет тягового усилия, ни на миллиграмм не изменился. Я тогда поступил, как и подобает конструктору инерцоидов — результаты опыта, которые меня не устраивали, были с гневом отвергнуты, и модель снова запускалась по столу.

Конечно, ни о какой силе тяги, развиваемой моделью, речи и не могло идти. Я тогда не учел реакции на опоры маховичков, которые толкали модель в противоположную сторону и с той же силой. А двигалась модель из-за того, что при вибрации трение очень уменьшается, и она скатывалась даже под самый легкий уклон, который трудно заметить. Другие инерцоиды движутся из-за того, что импульсы (т. е. произведения силы на время действия), развиваемые эксцентриками во взаимно противоположных направлениях, будучи одинаковыми, различны по силе и продолжительности действия. Импульс, направленный в одну сторону, кратковременен, но сила велика, а в другую продолжителен, но сила мала. Будучи положен на шероховатую поверхность, такой инерцоид будет двигаться, если большая из сил может преодолеть силу трения, а меньшая — нет. Естественно движение будет в сторону большей силы. Так человек обычно передвигается по скользкому льду. Ни о каком «безопорном» движении, конечно, речи идти не может. И надо твердо помнить один из основных законов механики, что внутренними силами центра масс тела не сдвинуть.

И последняя категория — псевдороботоспособные маховики. «Псевдо» потому, что с первого взгляда они кажутся вполне жизнеспособными, и только анализ их динамики выдает пороки. Обычно предложения этой категории касаются маховиков переменного момента инерции. Задача создания такого маховика заман-

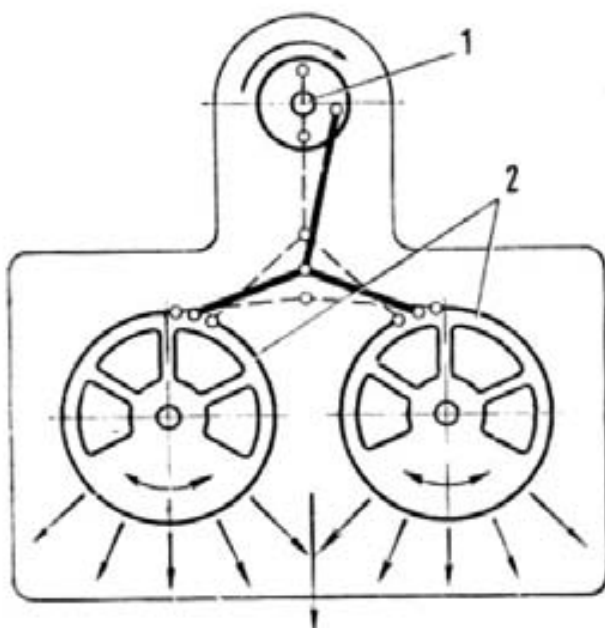


Рис. 53. Безопорный двигатель или инерцоид:

1—двигатель; 2—неуравновешенные маховики

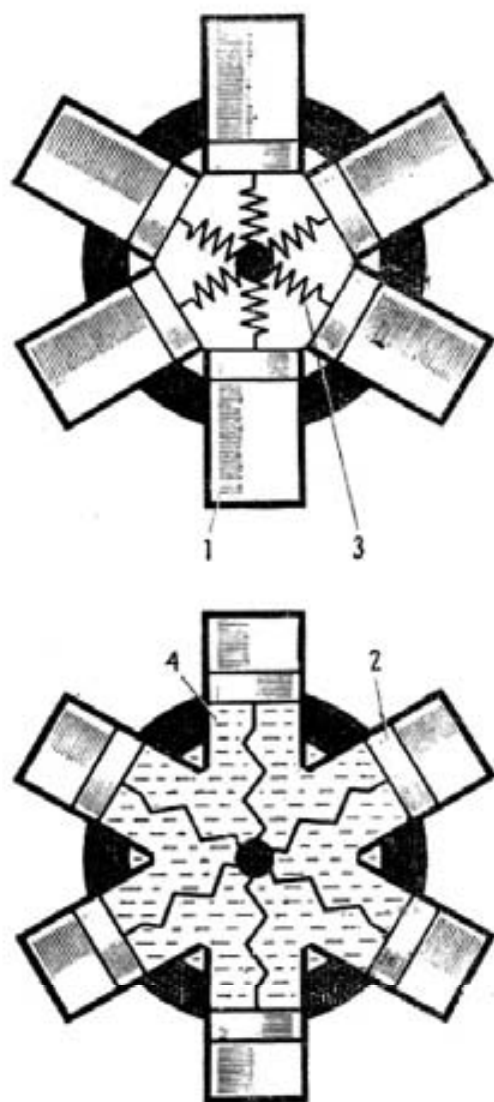
Рис. 54. Маховик переменного момента инерции конструкции А. Сент-Экзюпери: 1—цилиндры; 2—поршни; 3—пружины; 4—жидкость

чива — ведь меняя момент инерции маховика, можно обеспечить его разгон и получить желаемую рабочую характеристику при выделении энергии. Поэтому эта задача увлекала и увлекает многих изобретателей.

Одна из конструкций подобных маховиков дана на рис. 54. Этот маховик был предложен известным французским писателем и летчиком Сент-Экзюпери. Принцип действия маховика заключается в следующем: при отсутствии давления воды поршни, стягиваемые пружинами, находятся у центра. При подаче воды в центральную часть маховика поршни раздвигаются, увеличивая общий момент инерции. При пуске воды они возвращаются в исходное положение.

Несмотря на то, что кинематически этот маховик вполне работоспособен, анализ динамики показывает полную его непригодность для выполнения поставленной цели. Например, при массе одного из поршней (грузов), равной 10 кг, и угловой скорости маховика 628 рад/с (6000 об/мин) при расстоянии груза от центра вращения 0,25 м нагрузка на каждую пружину составит свыше 1 МН, что явно невыполнимо.

Следует еще раз отметить актуальность задачи создания работоспособных маховиков переменного момента инерции, поскольку изменение момента инерции дает возможность варьирования частоты вращения маховика, а это является очень ценным свойством любого привода.





Хм! Все, в чем они нуждаются, — это
маленький вращающийся маховик!

АССЕН ДЖОРДАНОВ

ГЛАВА III

МАХОВИК В ТРАНСПОРТЕ

Перспективы использования маховичных двигателей на транспортных машинах столь велики и заманчивы, что об этом стоит поговорить в отдельной главе. Автономность маховичного двигателя, его высокая удельная мощность, выделение энергии непосредственно в виде механического вращения (именно то, что и нужно колесам!), быстрая зарядка, необыкновенно высокая надежность и долговечность — вот неполный перечень свойств маховичного двигателя, весьма привлекательных для автомобилистов. И нельзя сказать, чтобы эти качества маховиков обнаружили только сейчас. Более ста лет назад внимание инженеров стала привлекать...

САМОБЕГЛАЯ ТЕЛЕЖКА — МАХОВОЗ

И приоритет в этой области принадлежит России. Еще в 1860 г., т. е. на самой заре автомобилизма, проект «маховоза», или самобеглой тележки, использующей маховик в качестве двигателя, был предложен русским инженером В. И. Шуберским.

В 1905 г. англичанин Ланчестер получил патент № 7949 на изобретение, имеющее отношение к «...применению для механического движения мотора в форме тяжелого, быстровращающегося маховика, с целью приведения в движение моторного экипажа» (рис. 55).

Колеса экипажа Ланчестера соединялись любой механической передачей с маховиком или даже с системой из двух маховиков, вращающихся в противоположные стороны, чтобы устранить действие вредного для экипажа гироскопического эффекта. Для разгона маховика на остановках экипажа он соединялся через вариатор с валом стационарного двигателя. Предусмотрел Ланчестер и разгон маховика встроенным электродвигателем, который подсоединялся на остановках к электрической сети.

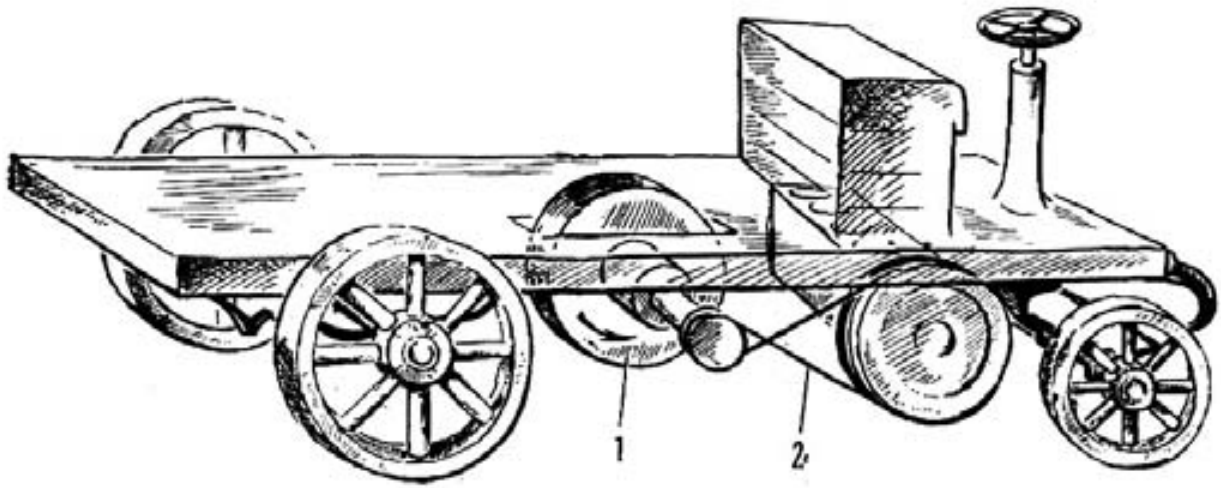


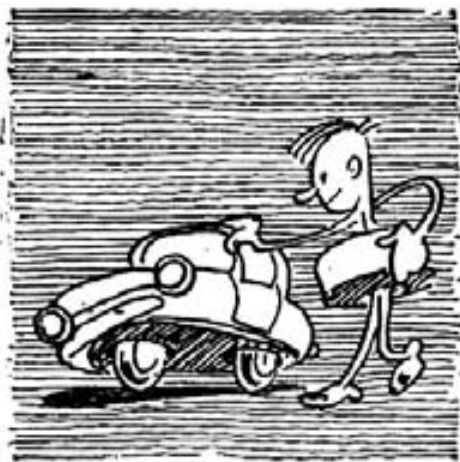
Рис. 55. Экипаж Ланчестера, движущийся накопленной энергией маховика:
1—маховик; 2—передача

Оригинальный экипаж с маховиком был построен и продемонстрирован в Лондоне в 1914 г. русским инженером П. Шиловским. Машина, названная им гирокаром, имела всего два колеса (рис. 56) и поддерживалась в устойчивом состоянии вращающимся маховиком, приводимым во вращение электромотором. Генератор, питающий электромотор, получал вращение от вала основного двигателя гирокара. Таким образом, маховик в этой машине, как и в построенном недавно фирмой «Форд» двухколесном автомобиле «Гирон» (в английском произношении «Джирон»), использовался только для устойчивости. Этому способствовал так называемый гироскопический эффект (см. гл. IV), который всегда сопутствует вращающимся маховикам.

Характерно, что П. Шиловский, не найдя поддержки в царской России, построил свой гирокар на средства английской фирмы «Уолсли», работавшей на военное ведомство. Гирокар привлек внимание фирмы своей единственной колеей, повышающей проходимость автомобилей.

Не исключена возможность, что маховичные автомобили в будущем будут выполняться именно двухколесными, что значительно упростит и удешевит конструкцию машины. Двухколесный экипаж тратит меньше энергии на свое перемещение, чем четырехколесный, он гораздо маневреннее, что очень важно в условиях современного города.

К тому же основной маховичный двигатель можно одновременно использовать и как маховик-стабилизатор. Поэтому конструкция гирокара Шиловского не утратит своей актуальности и в будущем.



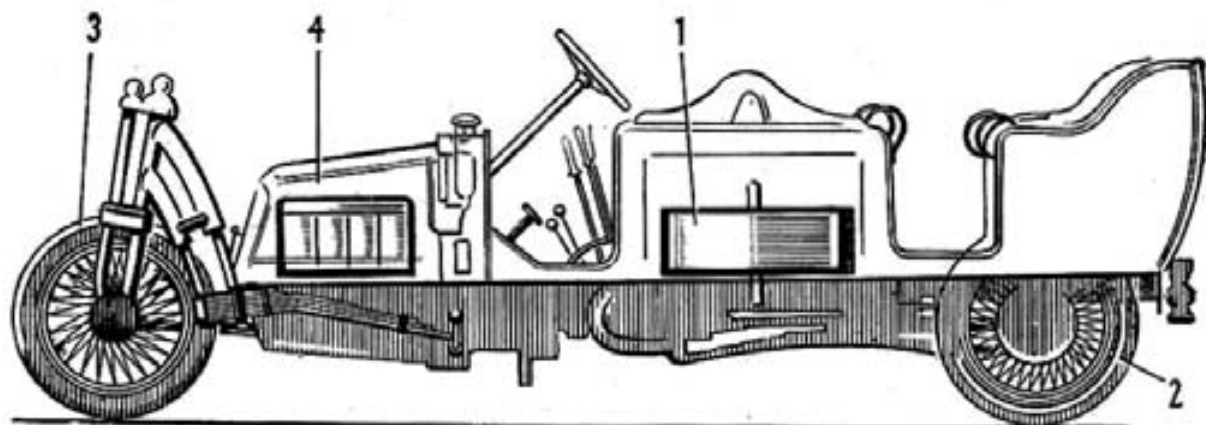


Рис. 56. Гироскопический экипаж П. Шиловского на двух колесах:
1—маховик; 2—приводное колесо; 3—рулевое колесо; 4—двигатель

К числу маховозов принадлежат и всякого рода инерционные тележки для внутризаводских перевозок. Этот вид транспорта, пока еще очень несовершенный, получает все большее распространение на различных заводах для межцеховых и внутризаводских перевозок. Выгодно отличаясь от аккумуляторных электрокаров, такие инерционные тележки могут при рациональном использовании дать значительный экономический эффект.

На рис. 57 показана тележка, разработанная на Казанском компрессорном заводе. Грузоподъемность тележки 10—15 тс. Скорость движения около 25 м/мин. Маховик, разгоняемый электродвигателем до 800 об/мин во время загрузки тележки, обеспечивает длину ее пробега 500—900 м. Несмотря на очевидную простоту такой тележки, годовой эффект от ее применения составил более 3000 руб.

Аналогично действует инерционный тельфер, движущийся энергией разогнанного маховика. Разгон маховика производится электро- или гидродвигателем.

Следует отметить, что инерционный внутризаводской транспорт еще весьма далек от совершенства. Применение маховичного двигателя для внутризаводских транспортных средств пока ограничено. Бывает, что этим совершенно специфичным источником энергии нередко механически заменяется обычный двигатель, что не только приводит к ухудшению работы трансмиссии, но часто влечет за собой потерю ряда ценнейших свойств и возможностей маховичного двигателя. Применение его на том или ином транспортном средстве должно иметь строгое научное обоснование, предполагающее увязку характеристики движения транспортного средства, с характеристикой маховичного двигателя.

Надо заметить, что инерционные тележки очень перспективны для внутризаводского транспорта с интенсивным движением

по определенному маршруту. Дешевизна, простота устройства и обслуживания, высокая долговечность, гигиеничность — вот качества, которые должны в ближайшем будущем обеспечить инерционным тележкам достойное место.

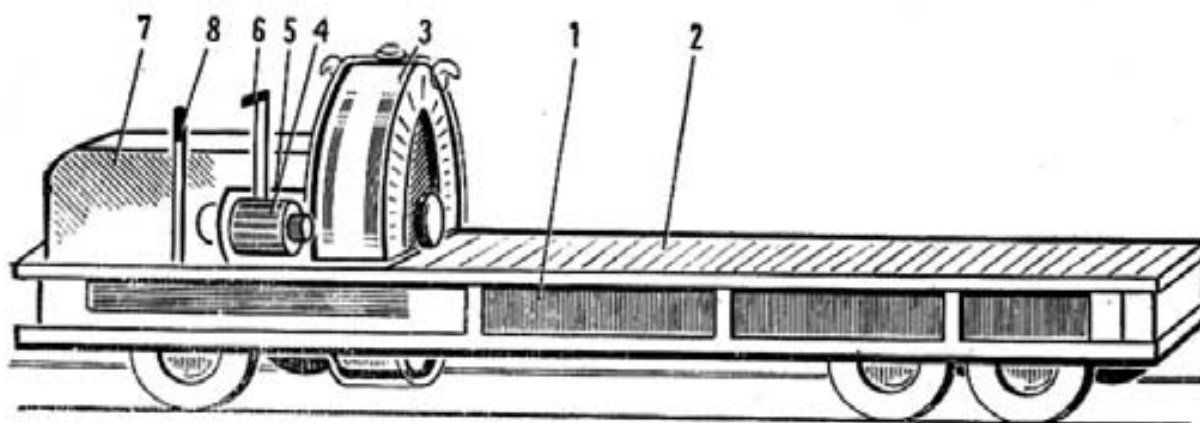


Рис. 57. Инерционная тележка для внутризаводских перевозок:

1—шасси; 2—платформа; 3—маховик; 4—электродвигатель; 5—коробка отбора мощности; 6—рукоятъ хода и реверса; 7—редуктор; 8—рукоятъ сцепления

Маховик в качестве двигателя имеет еще одно ценное преимущество перед двигателями внутреннего сгорания и электродвигателями: его рабочий процесс не связан с горением или искрением, поэтому он не может вызвать воспламенения или взрыва окружающей взрыво- или огнеопасной среды. И с особым эффектом использует маховик в качестве двигателя ...

ТРАНСПОРТ ПОРОХОВЫХ СКЛАДОВ

Сказать по правде, места, где используется такой взрывобезопасный маховичный транспорт, еще опаснее, чем пороховые склады. Шахты и рудники, атмосфера которых содержит много метана, чрезвычайно опасны — малейшая искра вызывает взрыв газа. Также опасна атмосфера некоторых цехов, насыщенная ацетоном, бензином и другими растворителями, мучной пылью и т. д.

Но описанные выше «самобеглые тележки» неприменимы к взрывоопасным условиям: там есть электропривод, могущий вызвать искру, приводящую к ужасным последствиям.

Поэтому маховичные тележки, или как их называют гиравозы или гираволокомотивы, во взрывобезопасном исполнении содержат механическую или гидравлическую трансмиссию от маховика к колесам и пневматический или гидравлический двигатель разгона.

Такие гировозы серийно выпускаются у нас в стране и эксплуатируются на взрывоопасных шахтах и рудниках для транспортировки вагонеток с углем (рис. 58).

Принципиальная кинематическая схема гировоза с механической передачей дана на рис. 59.

На реальных образцах гировоза, конечно, все значительно сложнее и несколько иначе, но эта схема дает понятие о принципе работы машины.

Прежде чем начать двигаться, необходимо разогнать маховик. Разгон его осуществляется пневмодвигателем от сети сжатого воздуха. Пневмодвигатель имеет очень низкий к. п. д. порядка 0,15—0,2. Это в несколько раз ниже, чем у электродвигателя, но увы, электродвигатель может дать искру, которая в данных условиях недопустима. При зарядке муфты маховика и разгона включены, муфты переднего и заднего хода выключены. После разгона маховика пневмодвигатель выключается, как и муфта разгона. Если гировоз еще не скоро тронется в путь, то выключается муфта маховика, и выбег (свободный ход) его протекает без излишних потерь. Выбег маховиков отечественных гировозов длится не очень долго — около 4 ч.

Если же требуется привести гировоз в движение, то включается муфта маховика, в коробке передач устанавливается необходимая передача, и включается муфта переднего или заднего хода в зависимости от того, куда нужно двигаться. Вращение через цепную передачу передается на ведущую ось гировоза.

Маховик гировоза (он показан в корпусе на рис. 60) представляет собой обод с диском диаметром около метра и массой 1650 кг. Изготовлен он из легированной хромистой стали 40Х. Маховик обтачивают и статически балансируют (см. гл. IV). Затем в маховик запрессовывают вал, изготовленный из хромоникелевой стали 40ХН. Маховик подвешивают в крышке на двух шарикоподшипниках, причем верхний подшипник воспринимает радиальную и осевую нагрузки, ограничивая перемещение вала вверх, например, от толчков машины вверх. Нижний подшипник воспринимает, как и верхний, радиальную нагрузку, а также и осевую, но уже вниз от веса маховика. Нижняя же часть вала маховика поддерживается одним роликоподшипником, воспринимающим только радиальную нагрузку. Вал, удлиняясь или укорачиваясь, например, от перемены температуры, может скользить в осевом направлении в этом подшипнике.

Корпус маховика, как и крышка, изготавливаются литыми из стали 35Л. Для уменьшения вентиляцион-



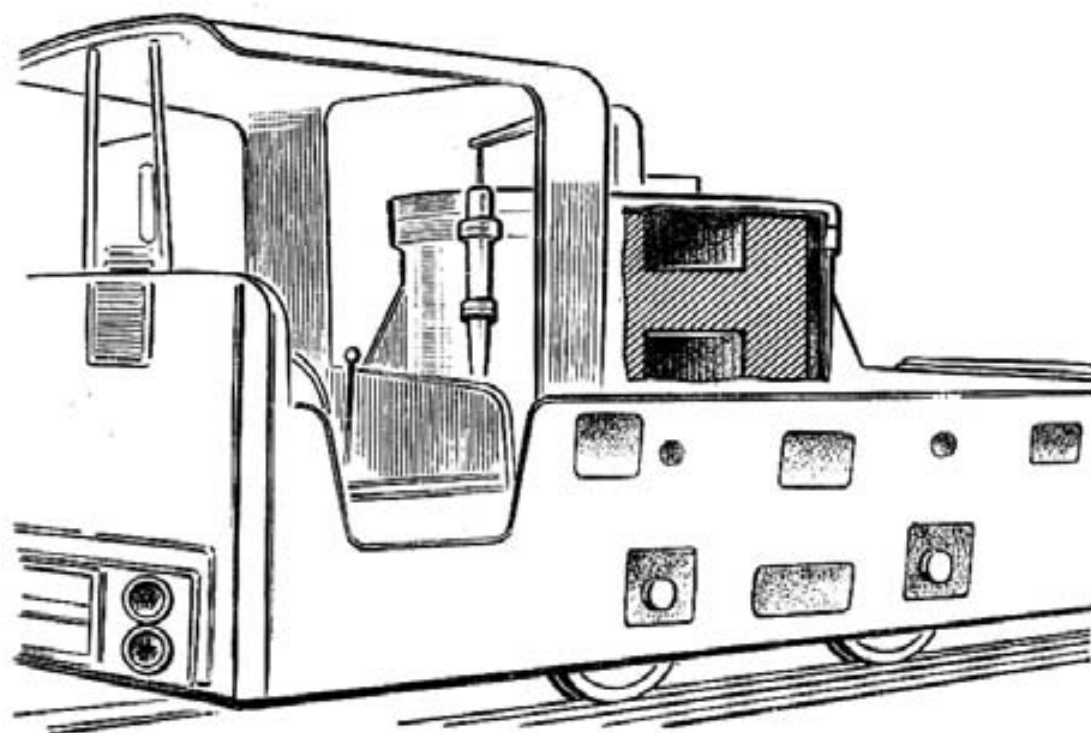


Рис. 58. Шахтный маховичный локомотив — гировоз

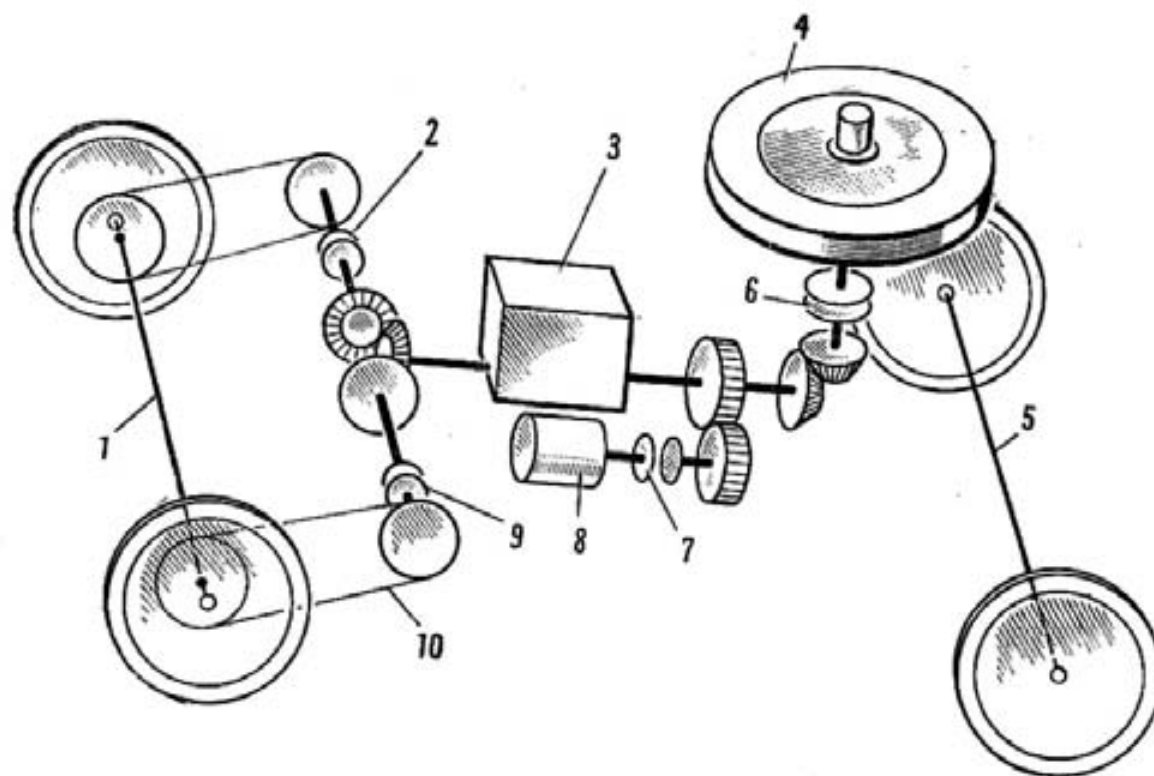


Рис. 59. Принципиальная схема привода колес гировоза от маховика:

1—ведущая ось; 2—муфта заднего хода; 3—коробка передач; 4—маховик;
5—ведомая ось; 6—муфта маховика; 7—муфта разгона; 8—пневмодвига-
тель; 9—муфта переднего хода; 10—цепная передача

ных потерь конфигурация корпуса и крышки как бы «следит» за конфигурацией маховика, причем соблюден определенный зазор между ними — 10 мм. Маховик гировоза и его корпус, конечно, излишне массивны, но это и нужно гировозу для увеличения сцепного веса.

Гировоз с механической передачей имеет тот недостаток, что передача вращения от маховика к колесам ступенчатая. При переключении скоростей и пуске гировоза муфты сильно буксуют. Бесступенчатые коробки передач, получающие в последнее время все большую популярность, все еще дефицитны, и конструк-

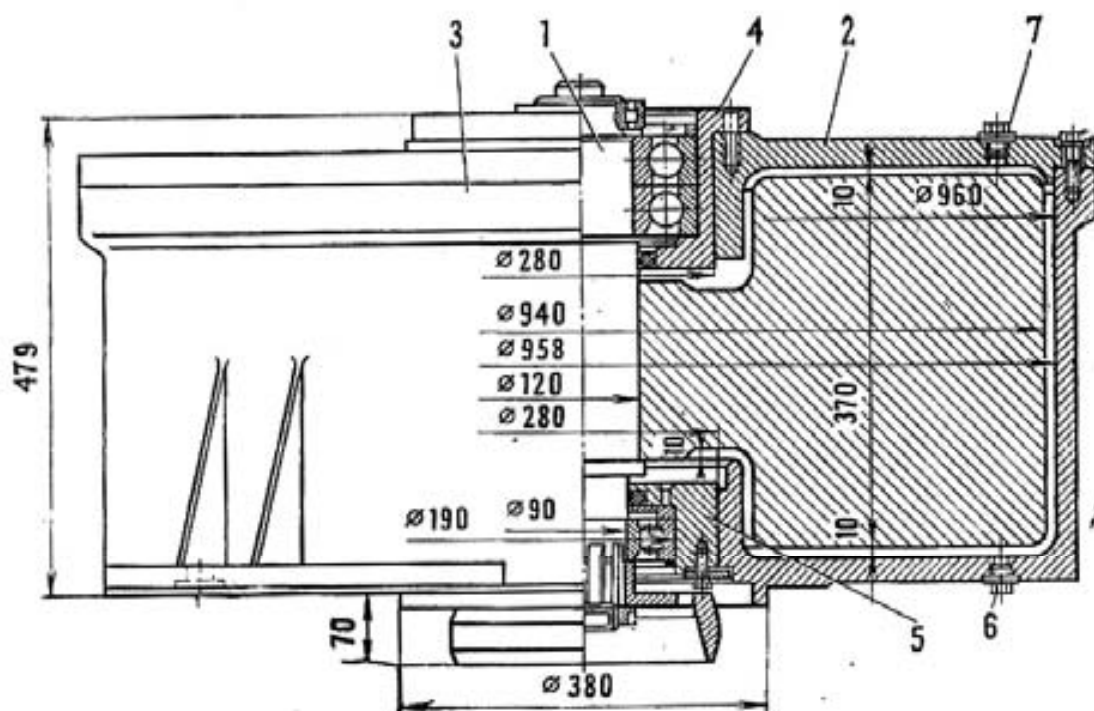


Рис. 60. Маховик гировоза в корпусе:

1—вал; 2—крышка; 3—корпус; 4 и 5—верхний и нижний стаканы;
6 и 7—пробки

торы гировозов создали машину с гидротрансмиссией, используя аксиально-поршневые гидронасос и двигатель. Машина получила удобное управление, возможность поддержания постоянной рабочей скорости, трансмиссия надежно предохранена от перегрузок, но... упал к. п. д. Гировоз вместо положенных 4,5 км пробега проходил с гидравликой всего 2,3 км. К. п. д. передачи упал с 0,77 до 0,44 а к. п. д. всего гировоза — с 0,476 до 0,281.

Все-таки механическая трансмиссия, несмотря на ее древность, непревзойденна в отношении к. п. д. Хорошо роет старый крот! — как говорил Гамлет, принц Датский. Но перспектива, по крайней мере в маховичных приводах, видимо, за бесступенчатыми приводами, а механические таковые, как уже отмечалось, еще редки. Поэтому конструкторы гировозов на основе опыта с гидropередачами предложили перспективную гидро-

трансмиссию, работающую по обратимой схеме. Эта схема показана на рис. 61.

Привод состоит из зарядного двигателя 1 любого типа, редуктора 2 режимов работы, двух гидравлических насосов-двигателей регулируемой производительности: 3—работающего в режиме разрядки как мотор и 4—работающего в режиме зарядки как насос; аккумулятора энергии — маховика 5 с соединительной муф-

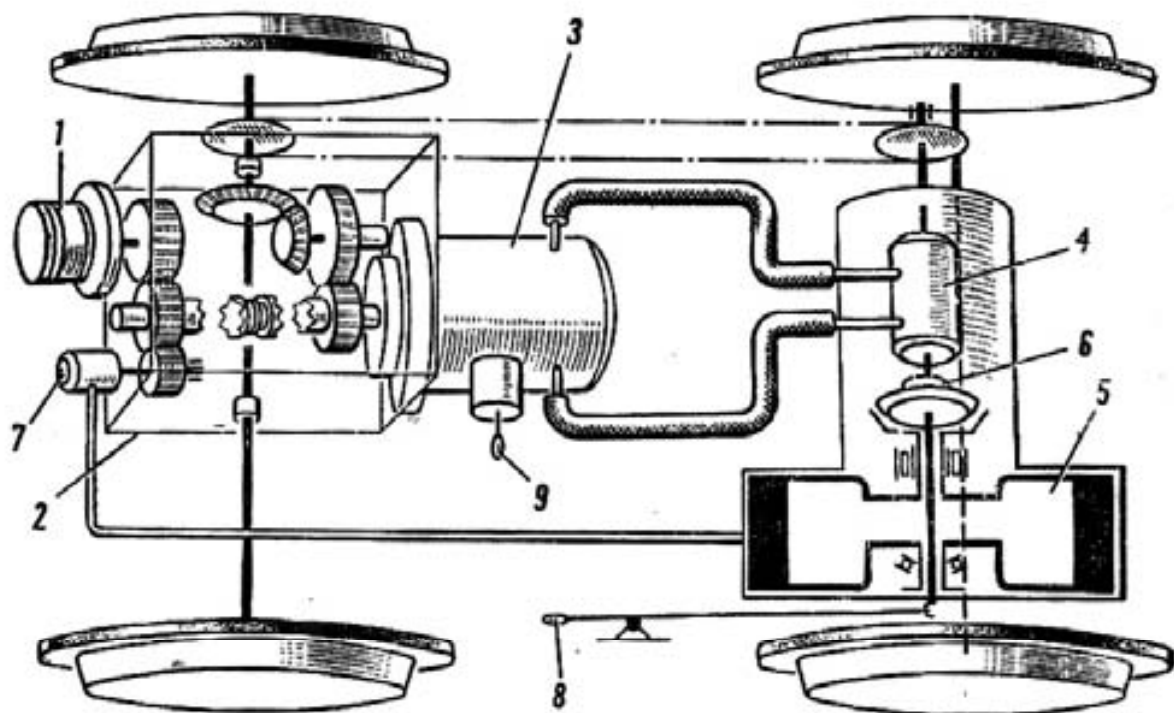


Рис. 61. Кинематическая схема гировоза с гидравлической обратимой связью:

1—зарядный двигатель; 2—редуктор; 3 и 4—гидродвигатели; 5—маховик; 6—муфта; 7—вакуум-насос; 8 и 9—механизмы управления

той 6 для временного отключения маховика от трансмиссии. Для создания вакуума в кожухе маховика предусмотрен вакуум-насос 7, работающий от зарядного двигателя. Для управления соединительной муфтой и насосом-двигателем 3 предусмотрены соответствующие механизмы 8 и 9.

Основным преимуществом этой схемы является наличие вакуума в камере вращения маховика, что позволяет не только снизить аэродинамические потери для стандартных маховиков, но и применять совершенные, высокоскоростные маховики, энергоемкость которых в 2—3 раза выше обычных. Но осуществление подобной работоспособной схемы пока связано с известными трудностями.

Однако взрывобезопасный транспорт не главное, где маховик проявляет свои качества транспортного двигателя.

Настоящей сенсацией в маховичном транспорте было...

ШВЕЙЦАРСКОЕ ЧУДО

Так называли появившийся в 50-х годах в Швейцарии маховичный автобус.

Эпоха современных инерционных двигателей для автомобилей начинается с работ швейцарской фирмы «Эрликон» над созданием маховичного автобуса — гиробуса, начало которых относится к 1945 г. В 1953 г. фирмой была выпущена серия в количестве 17 таких гиробусов, которые курсировали в Швейцарии, а также в Африке на трассах протяженностью от 4,5 до 7,7 км (рис. 62).

При изготовлении образцов этого вида транспорта фирме пришлось решать многие проблемы; основные из них — максимальное уменьшение потерь на трение при вращении маховика, обеспечение высоких динамических показателей гиробуса, а также создание простой и надежной электромеха-

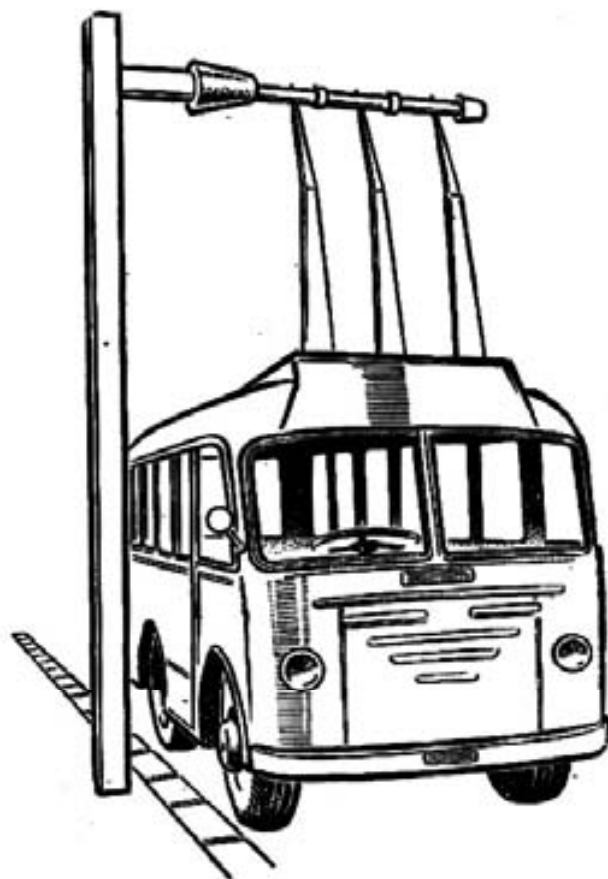


Рис. 62. Гиробус швейцарской машиностроительной фирмы «Эрликон» в процессе зарядки — раскрутки маховика

нической передачи между маховиком и ведущими колесами гиробуса.

Эффективным средством уменьшения потерь на трение является помещение маховика в корпус, заполненный водородом, который в 14,4 раза легче воздуха, а коэффициент теплопередачи которого в 1,7 раза больше, чем у воздуха. Уменьшение потерь становится еще более ощутимым, если в корпусе маховика, заполненном водородом, создать предварительный вакуум. Применение водорода не только значительно снижает вентиляционные потери, но также способствует охлаждению отдельных частей электромаховичного агрегата. Расчетная мощность потерь на вращение маховика в такой среде около 1,5 кВт.

Расчеты, а также экспериментальная проверка показали, что устойчивость движения гиробуса будет достаточно высокой, если выдержаны следующие соотношения:

$$a=8b; a+b=0,6l; ab=1,1 \frac{J}{M}, \quad (27)$$

где a и b — соответственно расстояния от центра тяжести гиробуса до передней и задней оси; l — длина гиробуса; J — момент инерции подрессорных масс; M — масса подрессорных частей гиробуса.

Такие условия центровки вызваны наличием в конструкции гиробуса массивного электромаховичного агрегата, вызывающего дополнительные нагрузки на подвеску и колеса при колебаниях шасси.

При угловых перемещениях гиробуса и связанного с ним электромаховичного агрегата возникает прецессия — вынужденное движение маховика. В результате появляется дополнительный, так называемый гироскопический момент (см. гл. IV), который, как показали расчеты, может достигнуть 800—900 Нм. Этот момент, а также свободные колебания гиробуса относительно горизонтальной оси могут вызвать значительную нагруженность пружин подвески и подшипников трансмиссии. В связи с этим было установлено, что электромаховичный агрегат необходимо устанавливать на шасси на упругом основании. Такое устройство должно предохранять трансмиссию гиробуса от высоких ударных нагрузок при езде по неровной дороге, а также ограничивать вынужденную прецессию электромаховичного агрегата.

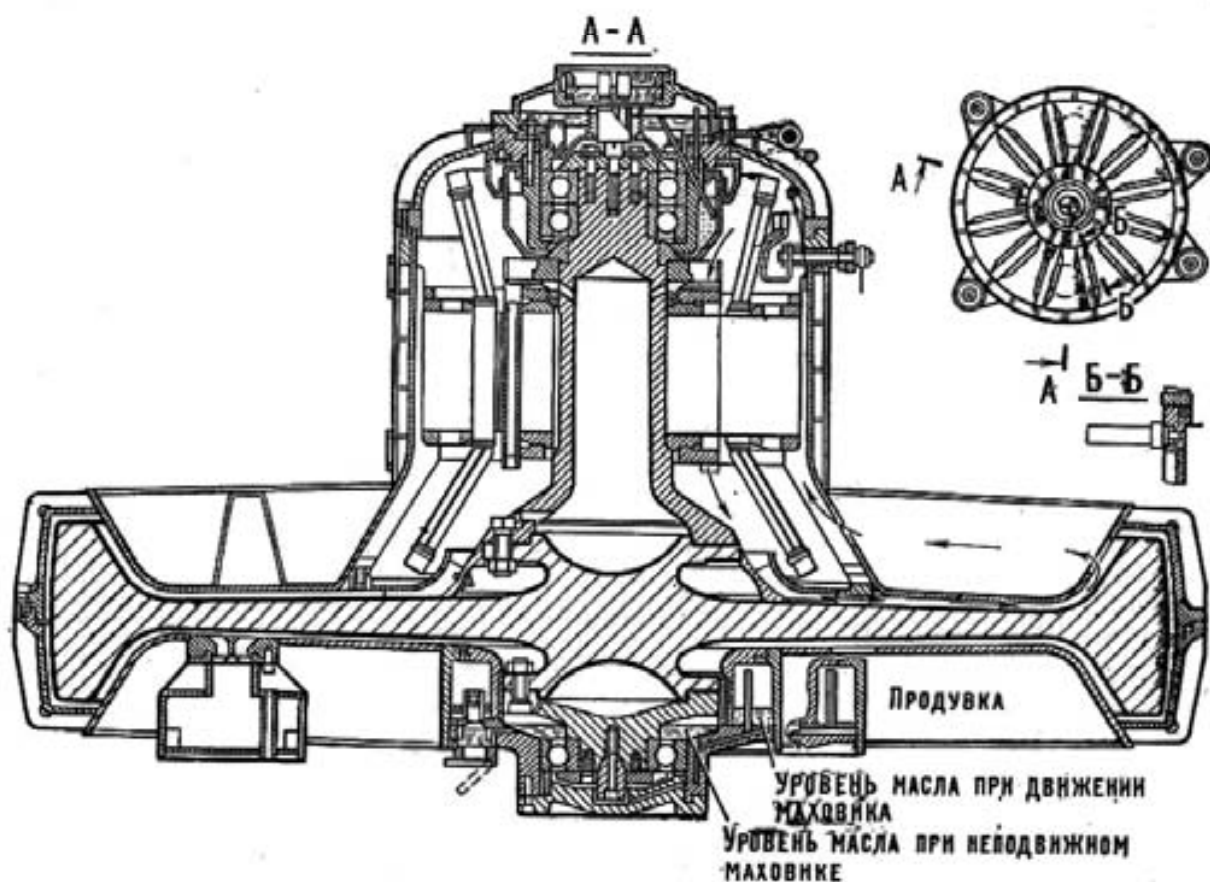


Рис. 63. Электромаховичный силовой агрегат гиробуса (разрез)

Масса гиробуса образца 1953 г. составляла 11 т без нагрузки и 16 т с полной нагрузкой. Он был рассчитан на перевозку 70 пассажиров.

Электромаховичный агрегат (рис. 63) устанавливался в центральной части гиробуса под одним из спаренных сидений.

Маховик, установленный на этом гиробусе, имел диаметр 1626 мм и массу 1,5 т. Он был отлит из хромоникельмолибденового сплава и непосредственно соединялся с валом короткозамкнутого электродвигателя. Электромаховичный агрегат был заключен в герметический корпус, заполненный водородом. Давление в корпусе равнялось 7 Н/см^2 . Конфигурация маховика при минимальной массе и максимально допустимой частоте вращения обеспечила накопление необходимой энергии. В то же время при максимальной частоте вращения (3000 об/мин) напряжения в маховике не превышали 30% предела прочности материала на растяжение. Отношение массы полностью нагруженного гиробуса к массе маховика составляло 10:1, что, по мнению фирмы, является оптимальным.

Вал собранного электромаховичного агрегата устанавливался в трех подшипниках, один из которых — радиально-упорный служил для восприятия осевых нагрузок. Интенсивная циркуляция водорода в корпусе обеспечивалась вентиляционным напором, создаваемым вращающимся маховиком, а также центробежной крыльчаткой, укрепленной на валу агрегата. Для улучшения охлаждения ротора электродвигателя-генератора, а также облегчения циркуляции водорода через агрегат стержни короткозамкнутого ротора были выполнены полыми. Для уменьшения вентиляционных потерь корпус маховика имел обтекаемую форму, а отношение ширины к диаметру составляло всего 0,0175.

При разгоне маховика до 3000 об/мин накапливаемая им энергия составляла $3,3 \cdot 10^7$ Дж или 9 кВт·ч. Полное время вращения маховика с 3000 об/мин до остановки (выбег) составляло 12 ч.

Действительные потери в электромаховичном агрегате с учетом потерь на трение в подшипниках были примерно в 3 раза больше потерь, полученных расчетным путем, — и составляли 4,5 кВт при 3000 об/мин. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что в расчетах рассматривались только потери при вращении маховика — диска. При этом не были учтены потери, вызванные вращением ротора генератора и сложной конфигурацией маховика.

Электроагрегаты гиробуса питались от городской сети трехфазного тока напряжением 500 В с частотой 50 Гц. Ночью на стоянке установка заряжалась от трехфазного тока напряжением 220 В, причем частоту вращения маховика можно было доводить от 0 до 2500 об/мин за 25 мин. Окончательная зарядка и доведение частоты вращения маховика до 2900—2950 об/мин

производились у первого пункта питания на маршрутной линии.

При подаче тока от электродвигателя-генератора на тяговые двигатели гиробуса его обмотка возбуждения питалась от конденсаторов.

Для уменьшения скорости и остановки гиробуса использовалось рекуперативное торможение, позволяющее увеличивать интервал между зарядками, а также значительно уменьшать износ тормозов.

Когда гиробус подходил к пункту питания для зарядки, его подвижные токоприемники при помощи пневматического устройства поднимались для соприкосновения с питающими контактами мачты. Одновременно выдвигались два вспомогательных контакта, которые заземляли электрооборудование гиробуса и включали основной электромагнитный выключатель питания (рис. 62).

Стоимость каждого пункта зарядки даже при наличии понижающего трансформатора составляла всего 20% стоимости 1 км воздушной контактной сети троллейбуса. Указанное обстоятельство, а также небольшие затраты при эксплуатации и ремонте гиробуса являются основными преимуществами этого вида транспорта, несмотря на то, что первоначальные затраты на производство гиробуса больше, чем на производство троллейбуса таких же размеров. Суммарный к. п. д. гиробуса составлял 50%.

Электромаховичный агрегат «Электрогиро» был применен также на маневровом гиролокомотиве, построенном фирмой «Эрликон» (Швейцария) совместно с английской фирмой «Сентинель». В этом гиролокомотиве массой 34 т были применены два агрегата «Электрогиро», обеспечивающие пробег до 40 км. Управление и принцип работы гиролокомотива близки к таковым на гиробусе. Этот гиролокомотив, конечно, не является взрывобезопасным из-за наличия электропривода.

В самое последнее время ряд стран (США, ФРГ, Австрия) приступили к проектированию и постройке новых гиробусов, гораздо более перспективных, чем швейцарский.

Оказывается, маховичный автобус отлично проявляет себя ...

В СОЮЗЕ С ТРОЛЛЕЙБУСОМ

Оказывается, подзаряжать маховик энергией можно не только на стоянке, но и на ходу от троллейных проводов и штанг. Некоторое время гиротроллейбус (именно так называли этот вид транспорта) работает как обычный троллейбус, питаясь энергией от троллейных проводов. Но в то же время он подзаряжает свой маховичный аккумулятор, чтобы затем, когда уже не будет троллейных проводов, пройти около 10 км на одном маховичном двигателе.

Проект такого гиротроллейбуса был разработан в 1970 г. отделением фирмы «Локхид» (США) под руководством

Л. Лоусона и Дж. Бакстера. После тщательного исследования двух опытных образцов гиротроллейбуса, которое планировалось на 1972—73 гг., фирма совместно с муниципальным управлением железных дорог г. Сан-Франциско должна выпустить для этого города 350 машин.

Весь маховичный двигатель имеет диаметр чуть больше метра и около полуметра высотой. Он размещается под полом салона гиротроллейбуса. Двигатель состоит из маховика из термообработанной высокопрочной стали массой 314 кг. Профиль маховика — гиперболический, близкий к равнопрочному диску. Благодаря этому маховик может накопить в 10 раз больше энергии на единицу массы, чем маховик швейцарского гиробуса. Маховик откован заодно с валом, на котором сидит ротор обратимого электродвигателя переменного тока. Корпус маховика, в котором также находится и электродвигатель, вакуумирован. Маховичный двигатель гиротроллейбуса показан на рис. 64, гиротроллейбус — на рис. 65.

Маховик при движении машины в режиме троллейбуса разгоняется до 20 000 об/мин. Затем он выделяет энергию на движение гиротроллейбуса на расстояние около 10 км при снижении угловой скорости маховика вдвое, т. е. до 10 000 об/мин. Выделяется при этом три четверти всей запасенной в маховике энергии.

Интересный гибрид троллейбуса, самосвала и гировоза разработан у нас в стране институтом УкрНИИПроект в г. Киеве. Для работ в карьерах часто используются большегрузные самосвалы с питанием от троллейных проводов, как троллейбусы. Это делается для того, чтобы не загрязнять атмосферу карьера вредными выхлопными газами. Однако при этом троллейвоз, как была названа эта машина, теряет маневренность, особенно в забое; при погрузке грунта экскаватором мешают троллейные провода. Они же затрудняют проведение взрывных работ в забое. Самосвал должен хотя бы сотню — другую метров проходить без питания от проводов.

Для этого был создан 25-тонный самосвал с питанием от троллейных проводов, причем во время движения маховик, установленный на нем, как и у гиротроллейбуса, разгоняется электродвигателем. При необходимости самосвал отходит от сети и может двигаться до 400 м в груженом состоянии за счет энергии, накопленной при разгоне в маховике.

Схема этой интересной машины и ее общий вид показаны на рис. 66 и 67.

Масса троллейвоза в груженом виде 55 т. Маховик диаметром 1,2 м и массой 1320 кг вращался с максимальной частотой 3500 об/мин и выделял около 4 кВт·ч энергии при снижении угловой скорости до 1000 об/мин. Маховик, сидящий в корпусе, как и в конструкции гировозов, соединялся с электродвигателем-генератором обратимого типа мощностью около 100 кВт.

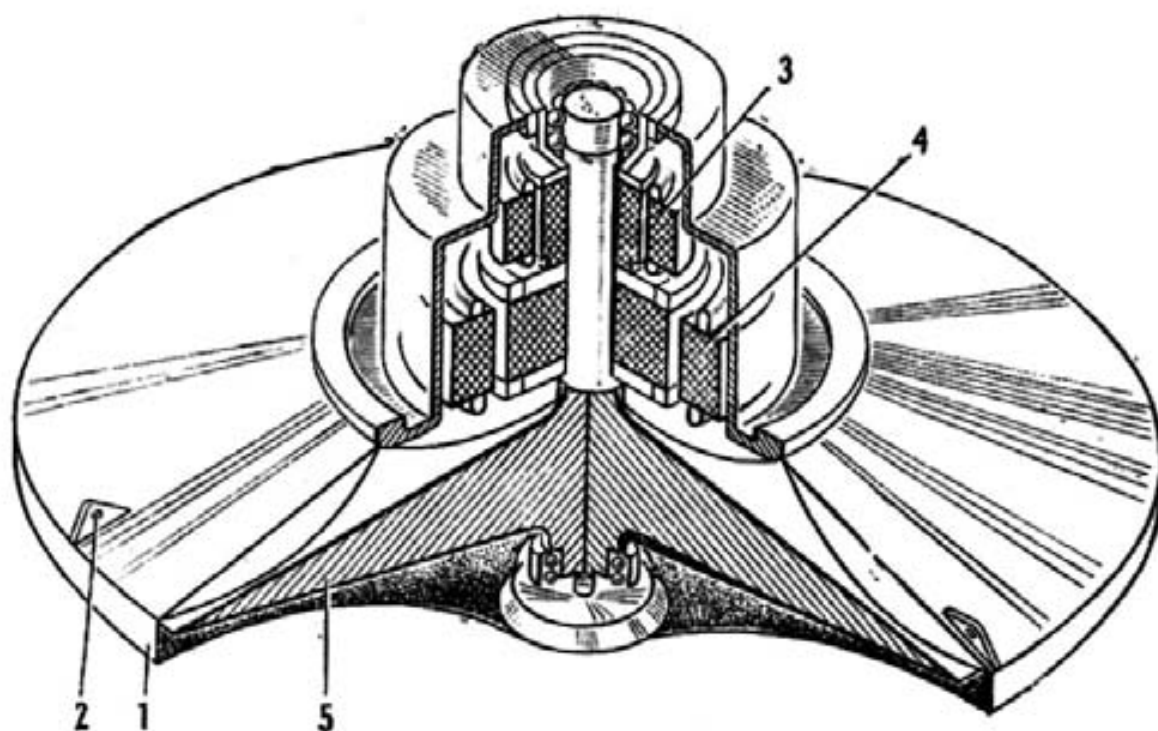


Рис. 64. Электромаховичный силовой агрегат гиротроллейбуса фирмы «Локхид» (США):

1—герметичный корпус; 2—точка подвеса; 3—возбудитель; 4—главный асинхронный двигатель-генератор; 5—маховик

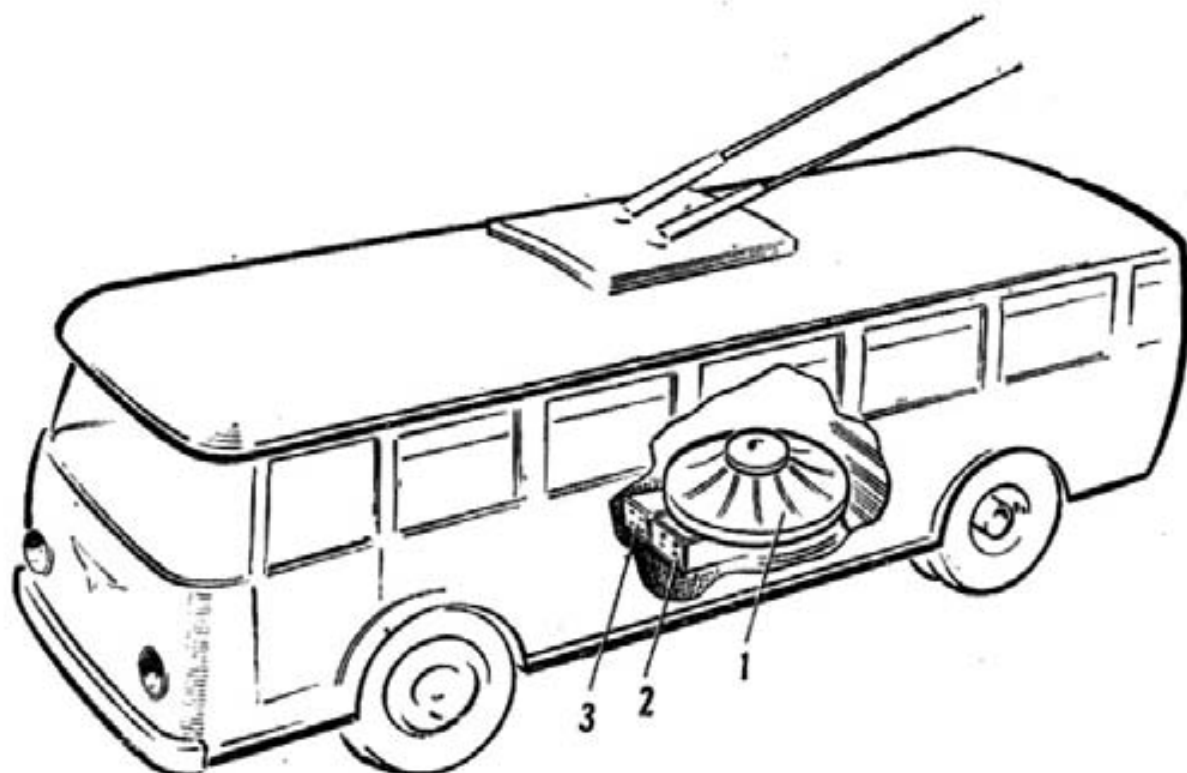


Рис. 65. Гиротроллейбус фирмы «Локхид» (США), предназначенный для города Сан-Франциско:

1—электродвигатель-генератор с маховиком; 2—вакуум-насос; 3—приборы управления

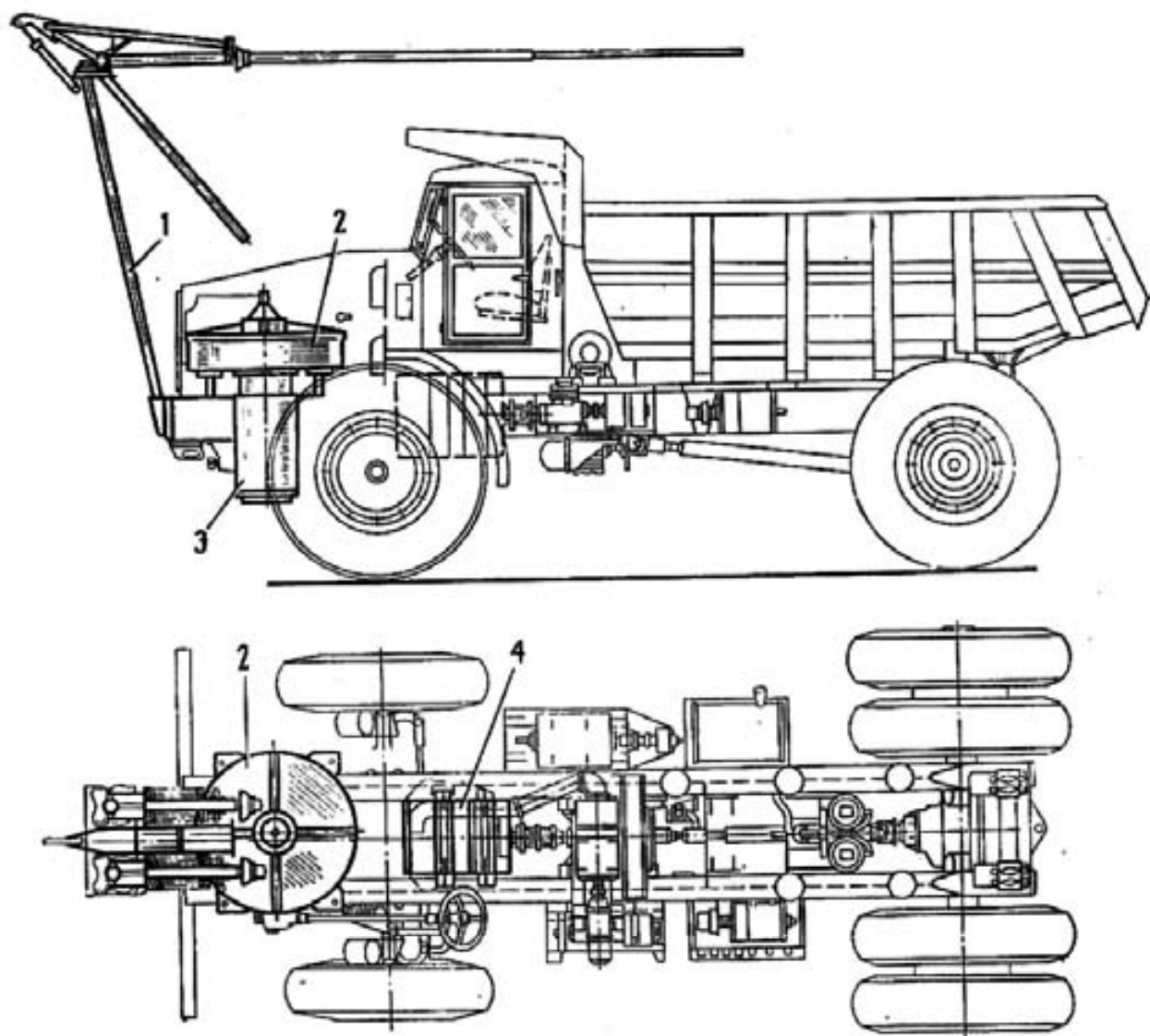


Рис. 66. Схема гиротроллейвоза УкрНИИПроекта:

1—штанга токосъемника; 2—маховик; 3—мотор-генератор маховика;
4—тяговый двигатель

К. п. д. троллейвоза, как гировоза и гиробуса, составлял около 0,5. Схема маховичного двигателя этой машины дана на рис. 68.

Следует отметить высокую эффективность таких гибридов троллейбуса и гиробуса для городского транспорта. Помимо того, что не тратится дополнительное время на подзарядку маховичного двигателя, первый разгон машины производится через троллеи от сети. В дальнейшем же энергия при торможении рекуперируется (см. ниже).

В новейших зарубежных проектах гиротроллейбусов для Австрии масса маховика повышена до 600 кг при частоте вращения 4200 об/мин (для ФРГ — 6700 об/мин), что при расходе 0,7 кВт·ч на 1 км пробега обеспечивает пробег от маховика 15 км.

Фирмы, разрабатывающие гиробусы и гиротроллейбусы, подчеркивают, что преимуществами маховичных двигателей перед

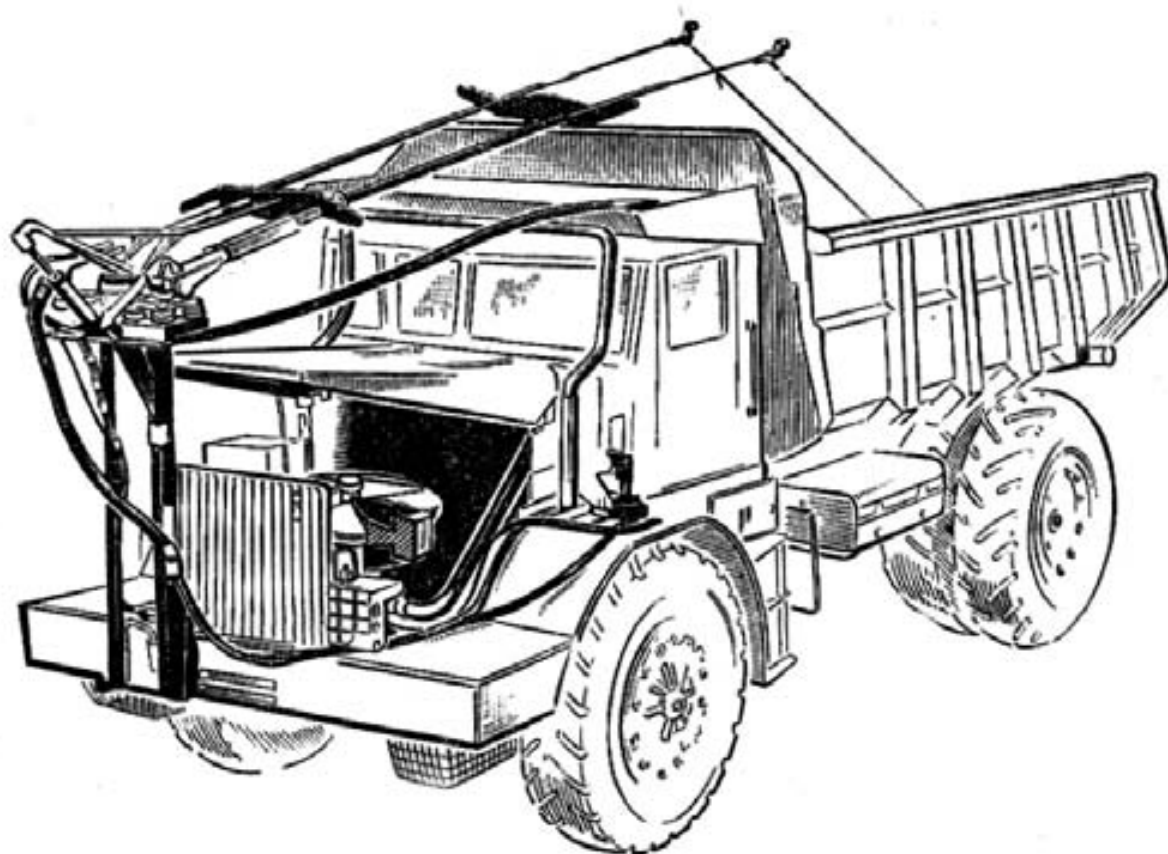


Рис. 67. Гиротроллейвоз (под капотом вместо двигателя виден маховик)

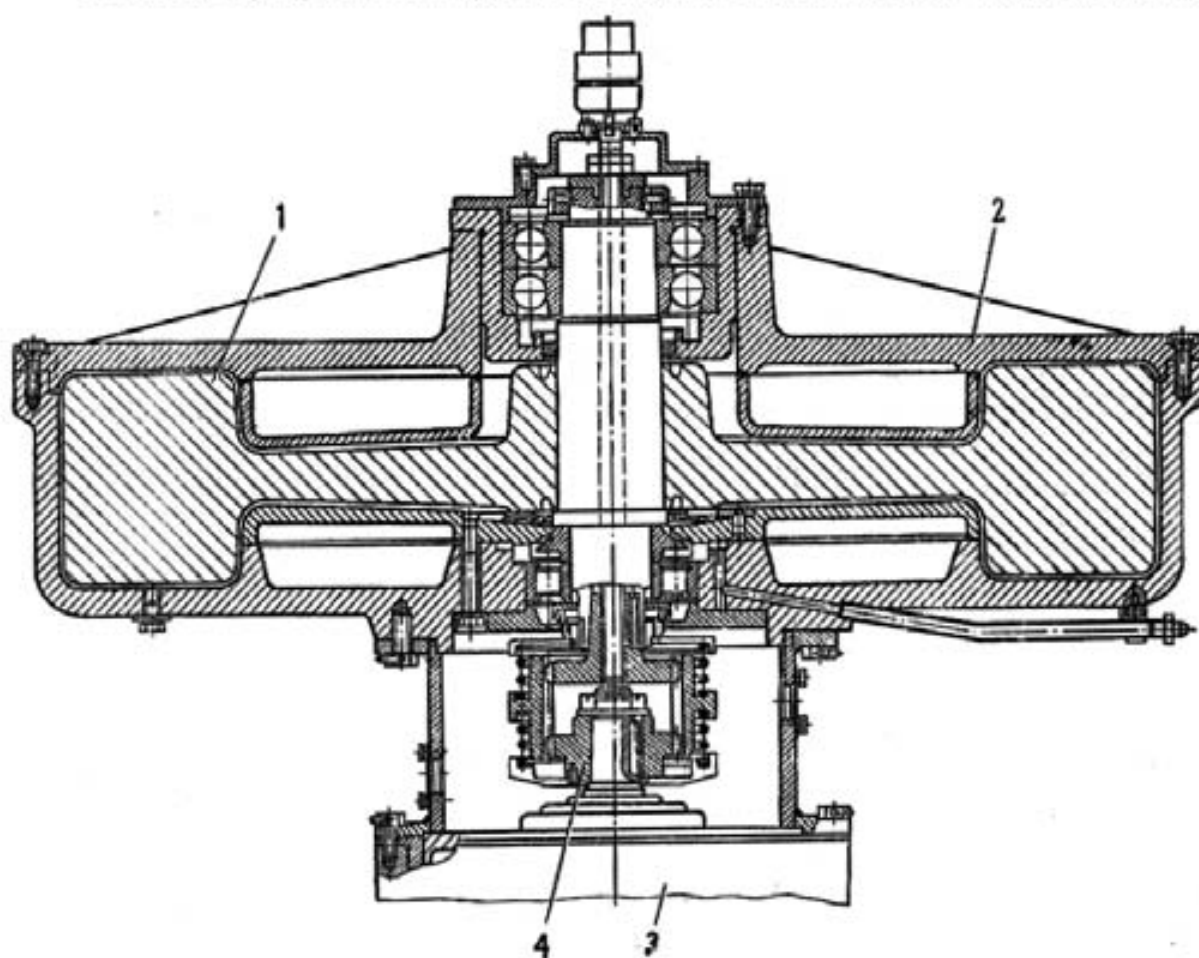


Рис. 68. Маховичный силовой агрегат гиротроллейвоза:
1—маховик; 2—корпус; 3—мотор-генератор; 4—зубчатая муфта

электроаккумуляторным приводом являются значительно больший срок службы, ничтожные затраты на обслуживание, быстрая зарядка, способность к большим перегрузкам и очень высокая надежность. Маховичные автомобили имеют в 6 раз больший пробег до ремонта, чем автомобили с двигателями внутреннего сгорания (при этом не затрачивается дефицитное горючее и не выделяются газы!). Этого, по-видимому, достаточно, чтобы проникнуться симпатией к маховичному транспорту. Характерно, что в Швейцарии гиробус так полюбился местным жителям, что они пропускали автобусы и троллейбусы, лишь бы сесть на гиробус!

Но, наверное, хватит говорить о транспортных гигантах с огромным маховиком. Уделим некоторое внимание малым и микроавтомобилям. Итак...

МАХОВИЧНЫЕ МИНИАВТОМОБИЛИ

Рассмотрим их в порядке убывания размеров и массы. Наибольший интерес представляет оригинальный проект маленького городского легкового автомобиля конструкции Д. В. Рабенхорста с супермаховичным двигателем. Масса автомобиля чуть более 500 кг и включает 150 кг полезного груза.

Мощность двигателя автомобиля, исходя из данных по шинам и аэродинамике автомобилей США начала 70-х годов, при крейсерской скорости 90 км/ч составляет около 3,35 кВт. При проектировании автомобиля предполагалось движение в течение 2 ч, что составляет путь пробега 180 км и запас энергии в маховике 6,7 кВт·ч. Подробный анализ движения автомобиля с инерционным двигателем в городе позволил сделать следующие выводы:

1) энергия, затрачиваемая на разгон автомобиля, в 3 раза больше энергии, затрачиваемой на преодоление расстояния, равного пути разгона, на установившейся скорости;

2) системой рекуперативного торможения, доступной маховичным силовым агрегатам, восстанавливается 25% всей энергии¹;

3) полезно может использоваться лишь около 75% всей энергии маховика.

Исходя из этого, Д. В. Рабенхорст увеличивает необходимый запас энергии, а следовательно, и общую массу супермаховика на 33%.

В качестве трансмиссии выбрана гидростатическая с приводом на четыре мотор-колеса.

Д. В. Рабенхорст отмечает, что в автомобиле с инерционным двигателем отсутствуют такие необходимые для обычного авто-

¹ По другим данным (как зарубежным, так и нашим) этот процент восстановленной энергии может быть еще выше (см. следующий раздел).

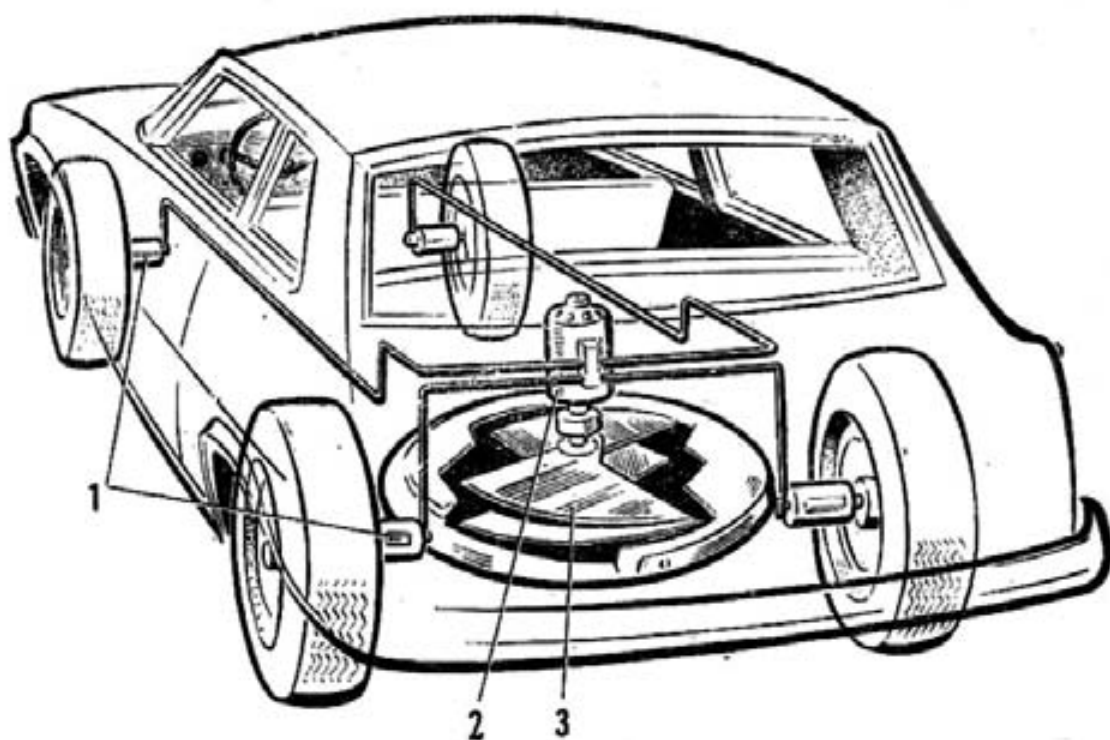


Рис. 69. Маховичный автомобиль д-ра Д. В. Рабенхорста (США):
1—мотор-колесо; 2—электродвигатель-генератор; 3—супермаховик

мобиль агрегаты и системы, как сцепление, приводной вал, дифференциал, полуоси, тормозная система, аккумуляторы, стартер и генератор, система охлаждения, топливная система. Автомобиль с инерционным двигателем может быть приведен в движение практически мгновенно, так как ускорения при разгоне весьма велики.

Для разгона маховика применяется электродвигатель авиационного типа, который подключают к сети. Время разгона составляет 20—25 мин.

Массы важнейших узлов автомобиля Д. В. Рабенхорста (рис. 69) следующие: маховик — 100 кг; корпус маховика и подвеска — 25 кг; электродвигатель авиационного типа — 18,4 кг; гидронасос — 37,5 кВт — 11,4 кг; четыре гидравлических мотор-колеса общей мощностью 37,5 кВт — 10 кг; контрольное оборудование и приборы — 9 кг; ходовая система — 175 кг; полезный

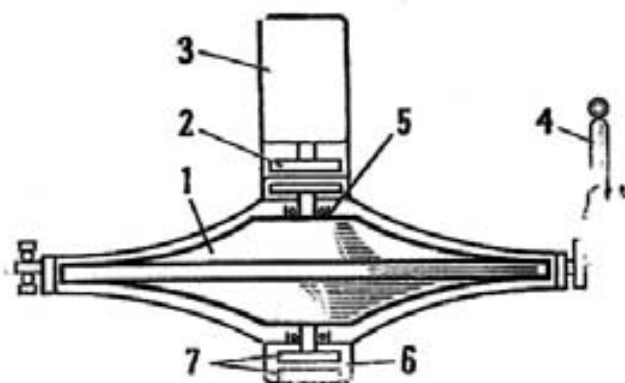


Рис. 70. Маховичный силовой агрегат автомобиля Д. В. Рабенхорста:
1—супермаховик; 2—магнитная муфта; 3—электродвигатель-генератор; 4—амортизатор; 5—подшипник; 6—герметичный вакуумированный корпус; 7—магнитный подпятник

груз — 150 кг; кузов — 270 кг. Итого полная масса автомобиля около 600 кг.

Эксплуатационные данные следующие: крейсерская скорость 90 км/ч; путь пробега 180 км; путь пробега по городу с учетом частых остановок 170 км; максимальная скорость свыше 110 км/ч; время разгона от 0 до 100 км/ч 15 с; стоимость пробега 0,6 долл. (54 коп. по курсу 1972 г.) на 100 км.

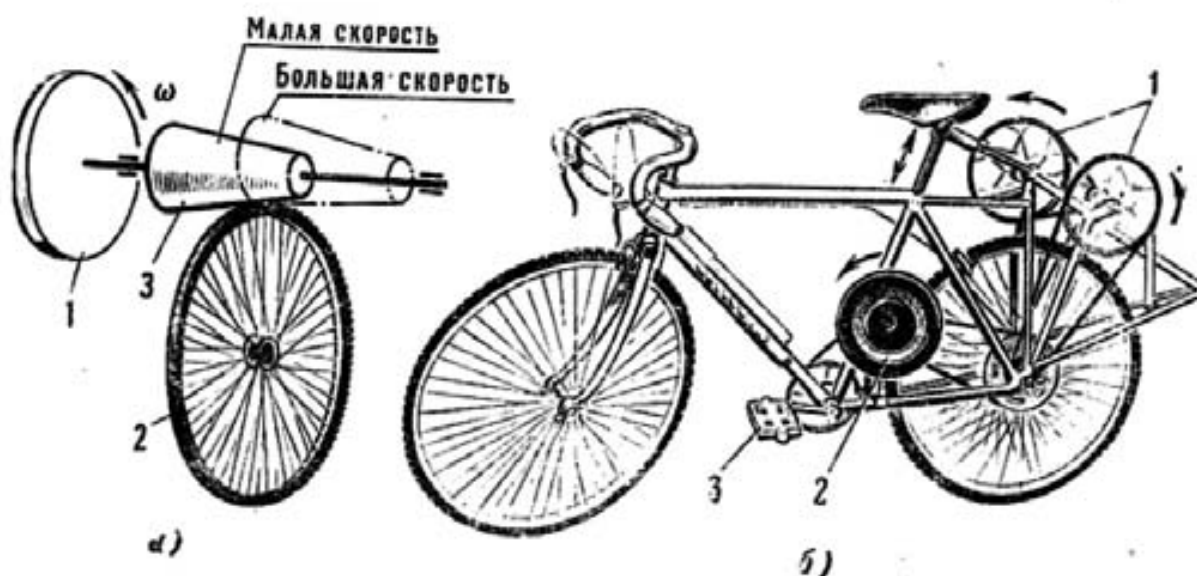


Рис. 71. Маховичные велосипеды:

а — привод велосипеда американца проф. А. Франка (1 — маховик; 2 — ведущее колесо велосипеда; 3 — конический фрикцион); б — велосипед англичанина Г. Бата с маховиком (1 — цепной привод движения седла; 2 — маховик; 3 — педали ножного привода)

Данные маховичного силового агрегата автомобиля Д. В. Рабенхорста: объем маховика 14 дм³; полезно используемая масса 75 кг; полезно используемая энергия 6,7 кВт·ч; начальная частота вращения маховика 23 700 об/мин, конечная — 11 900 об/мин; мощность потерь менее 0,01 кВт. Снижение потерь энергии до столь малой величины достигают помещением супермаховика в герметичный вакуумированный корпус с выводом вала магнитной муфтой (рис. 70). Выбег маховика (свободное вращение) будет длиться свыше 1000 ч или более 41 суток. Для сравнения выбег маховика гиروبуса фирмы «Эрликон» — 12 ч, а маховика рекуператора фирмы «Кларк» около недели.

Подшипники супермаховика с сухой смазкой воспринимают нагрузку только гироскопическую или динамическую при тряске, а вес супермаховика воспринимается магнитной подвеской из сильных постоянных магнитов. Валы электродвигателя и супермаховика соединяются магнитной муфтой; при свободном выбеге муфта расцепляется, и потери на вращение электродвигателя устраняются. Характерно, что как электродвигатель, так и подшипники супермаховика находятся в обычных атмосферных ус-

ловиях, а не в вакууме, что существенно улучшает условия их работы.

Для предохранения от тряски и уменьшения гироскопических воздействий корпус супермаховика подвешен на упругих амортизаторах.

Следующим по величине (вернее по малости) является маховичный велосипед, созданный проф. Висконсинского университета в США. А. Франком. Велосипед, конечно, не самоцель. Благодаря опытам на этом велосипеде А. Франк нашел оптимальные соотношения и определил экономичность установки маховика на автомобиле. Маховик предполагается установить дополнительно, в помощь основному двигателю. Проф. А. Франк считает, что установка маховика на стандартный автомобиль с мощностью двигателя в 75 кВт позволит кратковременно развить мощность до 225 кВт, а расход горючего свести всего к 2,5 л на 100 км пути. При этом дополнительные расходы на установку маховика составят около 100—200 долларов. «Вы едете

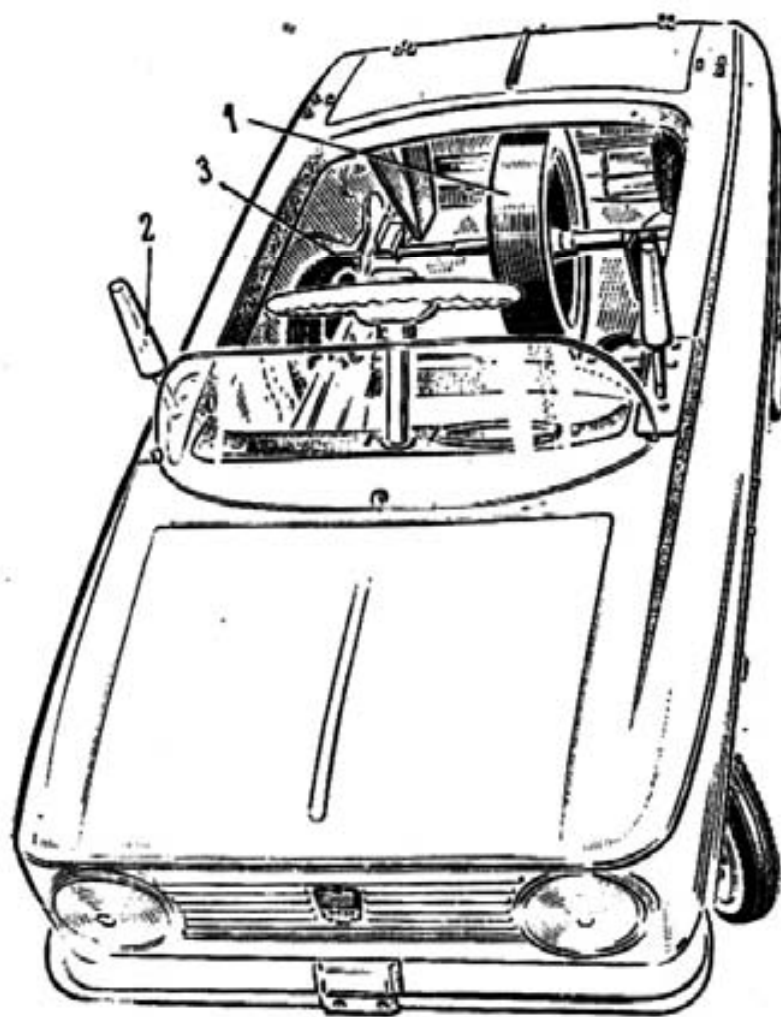


Рис. 72. Маховичный микроавтомобиль:

1—маховик; 2—рукоять управления; 3—фрикционная передача на колесо

Рис. 73. Зависимость доли кинетической энергии в энергетическом балансе автомобиля от режима движения:

1— $S=300$ м, $P=1,5\%$; 2— $v=60$ км/ч, $P=1,5\%$; 3— $v=60$ км/ч, $S=300$ м

по неровной местности, не ощущая дополнительной нагрузки на педали» — сообщил профессор после езды на своем велосипеде. Масса маховика здесь всего 10 кг, частота его вращения 2500—3000 об/мин.

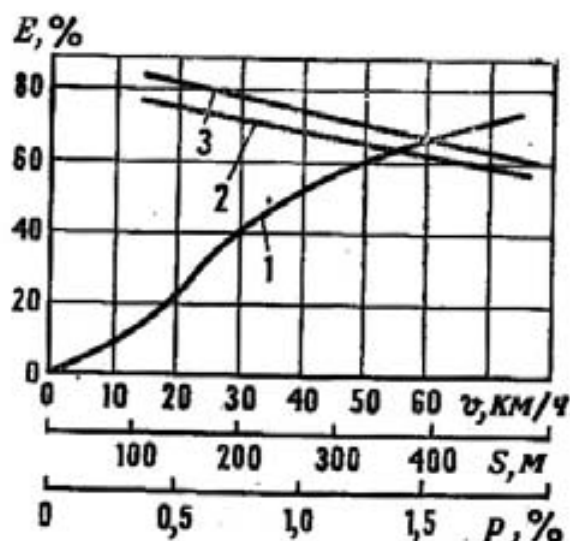
Маховик соединяется с задним колесом велосипеда фрикционным конусом, контактирующим с шиной (рис. 71, а). Перемещением конуса в осевом направлении меняется диаметр его рабочей зоны, контактирующей с колесом, и вследствие этого меняется скорость движения велосипеда. На рис. 71, б показан велосипед англичанина Г. Бата, маховик которого накапливает энергию при «подпрыгивании» пассажира на седле и выделяет ее для помощи в езде.

И наконец, самый маленький представитель маховичных автомобилей — микромобиль для обучения детей правилам уличного движения на автогородках. Микромобиль разработан в Курском политехническом институте. Один из вариантов микромобиля, показанный на рис. 72, содержит маховик массой около 10 кг, разгоняемый электродвигателем до 6000 об/мин. Маховик установлен в задней части микромобиля и так же, как и на велосипеде проф. Франка, контактирует при помощи фрикциона с задним колесом автомобиля.

Первый вариант микромобиля, еще очень несовершенный, проходит с пассажиром до полукилометра с одной раскрутки маховика. Раскрутка же производится включением разгонного электромотора в обычную электросеть посредством штепсельной розетки и вилки.

В настоящее время ведется разработка усовершенствованного варианта микромобиля, способного пройти несколько километров пути с одной раскрутки маховика.

Во всех рассмотренных случаях маховик играет роль двигателя машины. И нельзя не заметить, что мощность маховичного двигателя значительно меньше мощности обычных двигателей для автомобилей, да и стоимость пробега одного и того же пути на маховичных автомобилях меньше. Это происходит в первую очередь потому, что маховичный двигатель, в отличие от обычных, способен эффективно рекуперировать механическую энергию. А...



РЕКУПЕРАЦИЯ — ЭТО ЭКОНОМИЧНОСТЬ!

Рабочий процесс каждой машины, в том числе и транспортной, обязательно включает разгоны и замедления. Для машин непрерывного действия эти процессы играют незначительную роль, так как работа носит характер установившегося режима. Для машин же циклического действия, например городского транспорта, процессы разгона и замедления составляют значительную часть рабочего цикла. Рассматривая эти два процесса, можно заметить, что в первом случае происходит накопление кинетической энергии, во втором же случае — ее уменьшение. Кинетическая энергия при замедлениях автомобиля расходуется на его движение, а также рассеивается (диссипирует) в тормозах.

При малых скоростях машин доля кинетической энергии в общем энергетическом балансе невелика. Однако с повышением скоростей кинетическая энергия машин возрастает, быстро занимая преобладающую роль в энергетическом балансе. Такое же явление имеет место при снижении сопротивлений (или повышении к. п. д. трансмиссий) и уменьшении длины пути цикла.

В качестве примера рассмотрим зависимость изменения доли кинетической энергии E в общем расходе механической энергии от перечисленных факторов — скорости, сопротивления движению и расстояния между остановками для городского транспорта. Кривая 1 (рис. 73) представляет зависимость изменения доли кинетической энергии E от скорости движения v км/ч при расстоянии между остановками $s=300$ м и средней силе сопротивления движению $P=1,5\%$ от массы автомобиля.

Кривая 2 отражает тот же процесс, но уже в зависимости от расстояния s между остановками при максимальной скорости движения 60 км/ч и той же силе сопротивления движению P . Наконец, кривая 3 характеризует зависимость той же величины E от силы сопротивления движению P в % от массы автомобиля при постоянных скоростях $v=60$ км/ч и расстоянии $s=300$ м между остановками. Ясно, что при повышении скорости движения с одновременным уменьшением расстояния между остановками и силы сопротивления движению доля кинетической энергии в общем расходе энергии за цикл увеличивается еще интенсивнее.

Между тем, следует отметить, что как у транспортных, так и у других машин циклического действия скорость движения неуклонно повышается, сила сопротивления движению уменьшается, увеличивается к. п. д. трансмиссий; кроме того, у транспортных машин иногда желателен и уменьшение расстояния между остановками. Для современных машин циклического действия: автобусов, трамваев, троллейбусов, поездов метро, пригородных поездов, мостовых кранов и аналогичных им для наиболее эффективных циклов на совершение работы тратится

около половины суммарной энергии двигателя, а другая половина энергии переходит в кинетическую с последующим ее рассеиванием. В будущем же это соотношение несомненно еще более ухудшится.

Такое положение приводит к необходимости как постоянного повышения мощности двигателя для обеспечения динамических качеств машины, так и применения устройств, поглощающих кинетическую энергию — различных замедлителей и тормозов. В результате этого затрудняется дальнейшее повышение производительности и экономичности машин. Использование кинетической энергии циклических машин могло бы обеспечить весьма большой экономический эффект.

Отношение энергии E_n , затраченной на полезное сопротивление, к полной энергии E_o может служить мерой для оценки резерва кинетической энергии в машине в заданных условиях

$$\delta = \frac{E_n}{E_o} . \quad (28)$$

С улучшением использования энергии значение δ , увеличиваясь, стремится к единице. Резерв кинетической энергии при этом соответственно уменьшается.

В качестве примера в табл. 1 приведены значения δ для различных циклов работы городского транспорта на пневмошинах — автобусов, троллейбусов и др. Для простоты оценки аэродинамическими сопротивлениями пренебрегаем.

ТАБЛИЦА 1

Расстояние между остано- вками, м	Значение δ при начальной скорости торможения, км/ч						
	10	20	30	40	50	60	70
100	0,8	0,49	0,3	0,196	—	—	—
200	0,89	0,66	0,464	0,32	0,238	—	—
300	0,92	0,74	0,565	0,42	0,29	0,246	—
400	0,94	0,79	0,635	0,48	0,385	0,3	0,242
500	0,95	0,83	0,69	0,55	0,44	0,35	0,284

Из таблицы следует, что δ достигает высоких значений при малой скорости и больших расстояниях между остановками. Между тем, современные транспортные машины работают в основном на высоких скоростях и имеют низкое значение δ и, следовательно, большие резервы кинетической энергии. Использование этой энергии может дать значительный экономический эффект. Особо значительный эффект может быть достигнут при малых значениях δ .

На практике кинетическая энергия движущихся машин частично используется рациональным управлением при свободном выбеге (накате) и динамическом преодолении подъемов.

При использовании наката кинетическая энергия транспортной машины расходуется на работу сил сопротивления на участке, называемом путем выбега или наката. Однако по ряду причин применение наката не всегда оправдано.

Кинетическую энергию транспортной машины можно также использовать для преодоления подъемов. При этом она частично аккумулируется в виде потенциальной энергии.

Ясно, что использование кинетической энергии для наката или преодоления подъемов носит частный характер, так как это далеко не всегда позволяют условия движения.

Кинетическая энергия транспортной машины может быть также использована путем рекуперативного торможения. Это такой вид использования кинетической или потенциальной энергии транспортной машины, когда предназначенная для рассеивания энергия путем соответствующих мероприятий затрачивается на совершение полезной работы.

В том случае, когда большое количество транспортных машин связано единой сетью питания (например, электрический транспорт), вероятное число тормозимых транспортных машин близко к числу разгоняющихся. Здесь принципиально возможной является отдача в сеть энергии, выделяемой при торможении и использовании ее для разгона других машин.

Это может быть осуществлено путем перевода тяговых двигателей в генераторный режим с отдачей выделяемой энергии в сеть. Однако ввиду того, что режим замедления до остановки весьма неэффективен для работы генераторов, этот метод позволяет использовать всего несколько процентов кинетической энергии. Торможение до остановки не следует отождествлять с торможением при движении под уклон. В последнем случае генераторы работают с большей эффективностью. Описанный метод рекуперативного торможения практикуется лишь для большой группы машин городского транспорта, связанной единым питанием, а для машин с индивидуальным питанием непригоден.

Кинетическая энергия используется радикально в том случае, когда она может быть накоплена в аккумуляторе, находящемся на самой машине, а затем выделена для использования.

В настоящее время техника располагает различными видами аккумуляторов энергии, из которых наиболее распространены электрические, тепловые и механические.

Для накопления энергии при торможении машины аккумулятор должен иметь специфические свойства, обусловленные кратковременным интенсивным протеканием процесса. Из рассмотрения, по-видимому, следует исключить тепловые аккумуляторы, требующие преобразования механической энергии в тепловую и обратно. Эти процессы, особенно последний, как известно, весьма трудоемки и неэффективны, а также имеют низкий к. п. д.

Электрические аккумуляторы наиболее распространены в технике. Они имеют высокую удельную энергоемкость, способны

сохранять энергию длительное время. Основной недостаток этих аккумуляторов — малая удельная мощность как при зарядке, так и при разрядке. Кроме того, для преобразования механической энергии в электрическую и обратно требуется электродвигатель, работающий также в режиме генератора. Несмотря на это, электрические аккумуляторы все-таки принципиально пригодны для аккумуляирования кинетической энергии машин.

Наиболее целесообразны для этих целей аккумуляторы механической энергии — статические и динамические.

Статические аккумуляторы представляют собой пружину, резиновый элемент или иное упругое тело. Однако энергоемкость статических аккумуляторов в тысячи раз ниже, чем динамических той же массы. Этим объясняется неприемлемость статических аккумуляторов для накопления значительных количеств энергии.

Небольшие количества кинетической энергии могут быть накоплены в маховике инерционного рекуперативного тормоза с резиновым упругим звеном¹ (рис. 74). Инерционный аккумулятор с упругим звеном подключается к трансмиссии машины с помощью фрикционной муфты. На первом этапе торможения основная часть энергии аккумулируется в упругом звене в виде потенциальной энергии. Затем по мере разгона маховика кинетическая энергия торможения вместе с аккумулированной потенциальной энергией упругого звена накапливается в маховике. Недостатком этого рекуператора является то, что в упругом звене должно накапливаться от 0,25 до 0,5 суммарной энергии торможения (в зависимости от частоты вращения маховика перед торможением). Ввиду малой аккумулирующей способности упругого звена такой рекуператор не может применяться при накоплении большого количества кинетической энергии.

Статические аккумуляторы могут накопить большое количество энергии только в том случае, если рабочим телом является газ, так как он имеет высокую деформируемость (сжимаемость). Однако при этом имеют место большие потери энергии, вызываемые малым к. п. д. пневмокомпрессоров и пневмодвигателей в требуемом режиме работы, а также потерей адиабатического тепла. Это практически исключает возможность применения пневмоаккумуляторов для накопления с последующим использованием кинетической энергии, если только в качестве рабочего тела не использовать жидкость. Такие «пневмогидравлические» аккумуляторы принципиально пригодны для рекуперации кинетической энергии и сейчас исследуются для этих целей у нас и за рубежом.

Из механических аккумуляторов для данной цели более эффективен инерционный аккумулятор — маховик.

¹ Н. В. Гулиа. Авторское свидетельство № 236147. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 6, 1969 г.

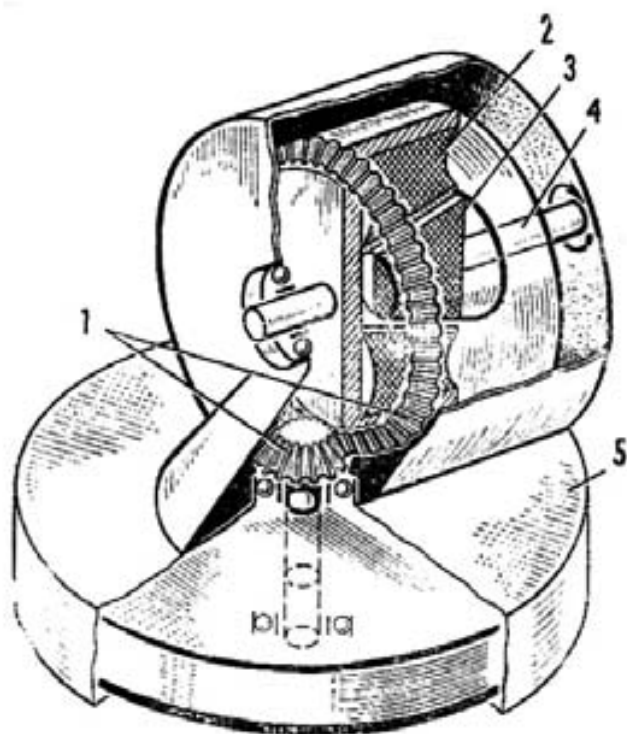


Рис. 74. Маховичный рекуператор с упругим звеном:

1—коническая пара; 2—резиновое кольцо; 3—фрикционная муфта; 4—вал трансмиссии; 5—маховик

Наибольшая сложность в системе рекуперативного торможения маховиком заключается в приводе, соединяющем маховик, разгоняющийся при торможении, с трансмиссией и, наоборот, разгоняющийся вал трансмиссии при разгоне машины с замедляющимся маховиком.

Проф. Н. К. Куликовым в 1951 г. была предложена схема инерционного рекуператора с планетарным приводом. Рекуператор Н. К. Куликова (рис. 75) представлял собой планетарную коробку передач с маховиком и бесступенчатым вариатором, но он не был построен из-за отсутствия прогрессивной передачи (вариатора) с требуемой характеристикой.

Фирмой «Кларк» (Англия) разработаны различные варианты

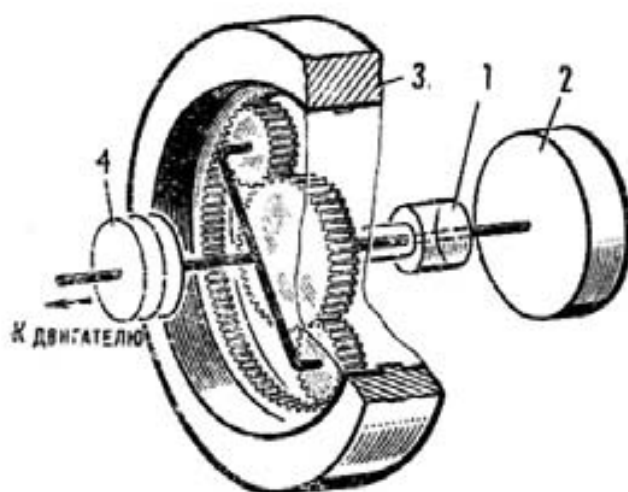


Рис. 75. Маховичный рекуператор проф. Н. К. Куликова:

1—вариатор; 2—приведенная масса автомобиля; 3—маховик; 4—сцепление

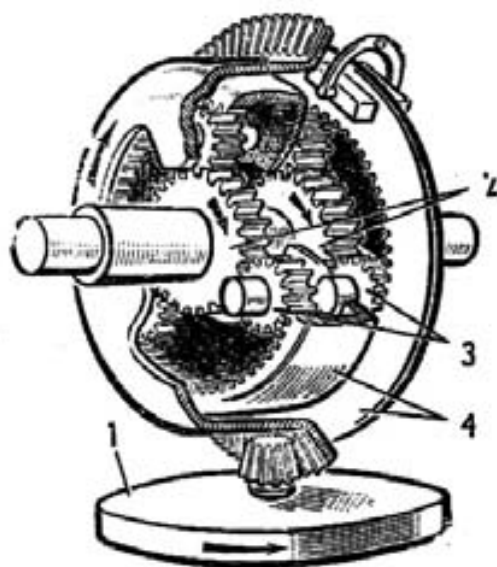


Рис. 76. Схема маховичного рекуператора Гиректа фирмы «Кларк» (Англия):

1—маховик; 2—центральные шестерни; 3—сателлиты; 4—венцы

рекуперативных тормозов, состоящих из маховиков и планетарных коробок передач.

Автобусный рекуперативный тормоз Гиректа фирмы «Кларк» (рис. 76) представляет собой четырехскоростную планетарную коробку передач, соединенную солнечной шестерней с двигателем автобуса, водилом сателлитов — с карданным валом, а венцом — с маховиком, аккумулирующим кинетическую энергию автобуса вместе с энергией, выделяемой работающим двигателем.

При торможении автобуса, связанного трансмиссией с водилом сателлитов, на венец передачи, а стало быть, и на вал маховика действует крутящий момент. Реактивный же момент, который и замедляет автобус, действует на вал двигателя. Поэтому двигатель автобуса не отключается ни при торможении, ни при разгоне.

Маховик привода имеет массу 80 кг и вращается с максимальной частотой до 15 000 об/мин. При диаметре маховика 0,57 м его окружная скорость достигает 450 м/с. Форма маховика близка к диску равной прочности.

При торможении автобуса маховик разгоняется с 12 000 до 15 000 об/мин.

Установленный на автобусе массой 10 т привод Гиректа позволяет тормозить со скорости 48 до 16 км/ч; а при разгоне, который продолжается около 15 с, он заменяет дополнительный двигатель мощностью 90 кВт.

При снижении частоты вращения маховика ниже 12 000 об/мин, например при стоянке, оператор может по желанию непосредственно из кабины соединить маховик с двигателем и разогнать его.

Маховик привода Гиректа ввиду большой частоты вращения помещен в кожух с разреженной атмосферой для снижения вентиляционных потерь. Воздух из кожуха непрерывно удаляется насосом, питающимся непосредственно от маховика. Благодаря этому разогнанный маховик может вращать-

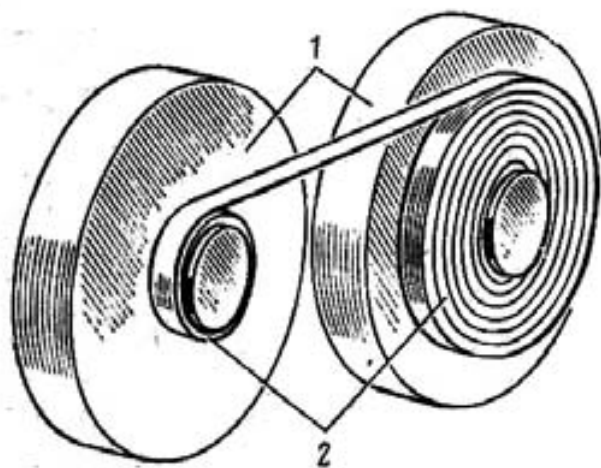
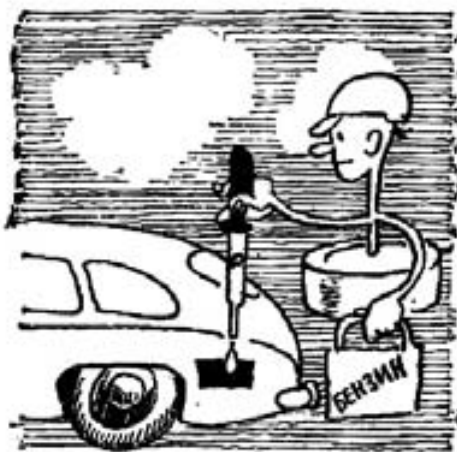


Рис. 77. Схема дискретного ленточного вариатора:

1—маховики; 2—мотки ленты

ся до остановки более недели. После ночной стоянки автобуса энергии маховика хватает для пуска двигателя.

Передача планетарной коробки включается автоматически с помощью электромагнитных муфт.

Следует отметить, что установка рекуперативного тормоза такого типа на автобусе позволяет экономить до 50% топлива, особенно при малых расстояниях между остановками.

Фирмой «Кларк» разработано также гидромеханическое устройство с маховиком для рекуперативного торможения, названное Гидректа.

Гидректа представляет собой сочетание планетарного привода Гиректа с гидродинамическим трансформатором для повышения плавности и легкости управления. При этом экономические показатели Гидректа несколько ниже, чем у Гиректа, что объясняется потерями энергии в гидроприводе.

Маховик привода Гидректа имеет диаметр 0,51 м и массу 64 кг. Его максимальная частота вращения 20 000 об/мин. Общее время разгона неподвижного маховика до максимальных оборотов 1 мин 40 с.

Автомобиль массой около 1200 кг, снабженный двигателем в 115 кВт и устройством Гидректа, позволяет разогнаться с места до скорости 100 км/ч за 4,75 с, а до 145 км/ч — за 11,25 с. Это очень высокие динамические показатели для автомобиля. Среднее ускорение его достигало 6 м/с^2 .

Рекуператоры кинетической энергии на основе маховиков и планетарных передач не обеспечивают достаточной эффективности работы из-за ступенчатого изменения передаточного отношения привода.

Кинетическая энергия автомобиля выделяется при замедлении его движения, а воспринимается маховиком при ускорении движения. Это вызывает необходимость соединения трансмиссии автомобиля и маховика бесступенчатой передачей с весьма широким диапазоном регулирования передаточного отношения, причем, это регулирование должно проводиться достаточно быстро — ведь торможение автомобиля длится обычно всего несколько секунд.

Кроме того, высокие мощности привода вызывают потребность в его компактности и высоком к. п. д.

В этом смысле представляются перспективными новые схемы рекуператоров кинетической энергии на основе дискретного ленточного вариатора и маховика¹ (рис. 77). Изменение передаточного отношения дискретного ленточного вариатора основано на изменении диаметров витков ленты в процессе перемотки.

Дискретный ленточный вариатор состоит из двух кассет с мотками ленты, навитой на валы с посаженными на них махо-

¹ Н. В. Гулиа. Авторские свидетельства № 171607 и № 193874. «Бюллетени изобретений и товарных знаков» № 11, 1965 г. и № 7, 1967 г.

выми массами. Один из маховиков, имитирующий, например, движущуюся машину, вращается, другой остановлен, причем вся лента намотана на его валу. При навивании ленты на вал вращающегося маховика она сматывается с другого мотка, и маховик разгоняется по мере перемотки ленты. В конце цикла, когда вся лента сматывается с вала маховика, последний имеет максимальную скорость. Далее цикл может повторяться.

Такие приводы могут обеспечить использование кинетической энергии циклических машин с очень малыми внутренними потерями за цикл. Дискретный ленточный вариатор обеспечивает варьирование передаточного числа практически в 50 раз при к. п. д. около 0,97. Смазки вариатор не требует, а по удельной мощности (передаваемой мощности, отнесенной к массе установки) он близок к зубчатым передачам.

Особенность работы рекуператора заключается в том, что лента в ленточном вариаторе при торможении и разгоне должна перематываться в разных направлениях — реверсироваться.

Схема рекуперативного тормоза с реверсированием путем переворота ленточного механизма показана на рис. 78. В этой схеме маховик связан с валом вариатора фрикционной и зубчатой муфтами; второй вал вариатора связан с колесами автомобиля точно так же. Ленточный механизм поворачивается на 180° для изменения направления намотки ленты маломощным сервоприводом.

При торможении или разгоне необходимо включение сначала обеих зубчатых муфт, а затем фрикционных.

По завершении процесса следует выключить фрикционные, а затем зубчатые муфты. Последнее производится автоматически с помощью датчика степени намотки ленты и любой из систем управления автомобиля — механической, пневматической, электрической.

Для проверки работоспособности рекуператора был изготовлен опытный образец, опробованный как в стендовых условиях, так и на автомобиле УАЗ-450 (рис. 79). Автомобиль УАЗ-450 был выбран главным образом вследствие наличия двух ведущих мостов, что облегчило задачу подсоединения рекуператора к трансмиссии.

Эксперименты, проведенные на автомобиле с рекуперативным тормозом, показали принципиальную применимость данной системы рекуперирования кинетической энергии на автомобиле.

Несмотря на конструктивные недостатки испытанной системы рекуператора, она показала удовлетворительные характеристики торможения и разгона. Автомобиль со скоростью примерно 30 км/ч, т. е. со средней и даже высокой скоростью регулярного торможения городских автобусов, затормаживался совершенно без участия фрикционных тормозов. Торможение было плавным, без рывков. Рекуператор в этом случае играл роль замедлителя.

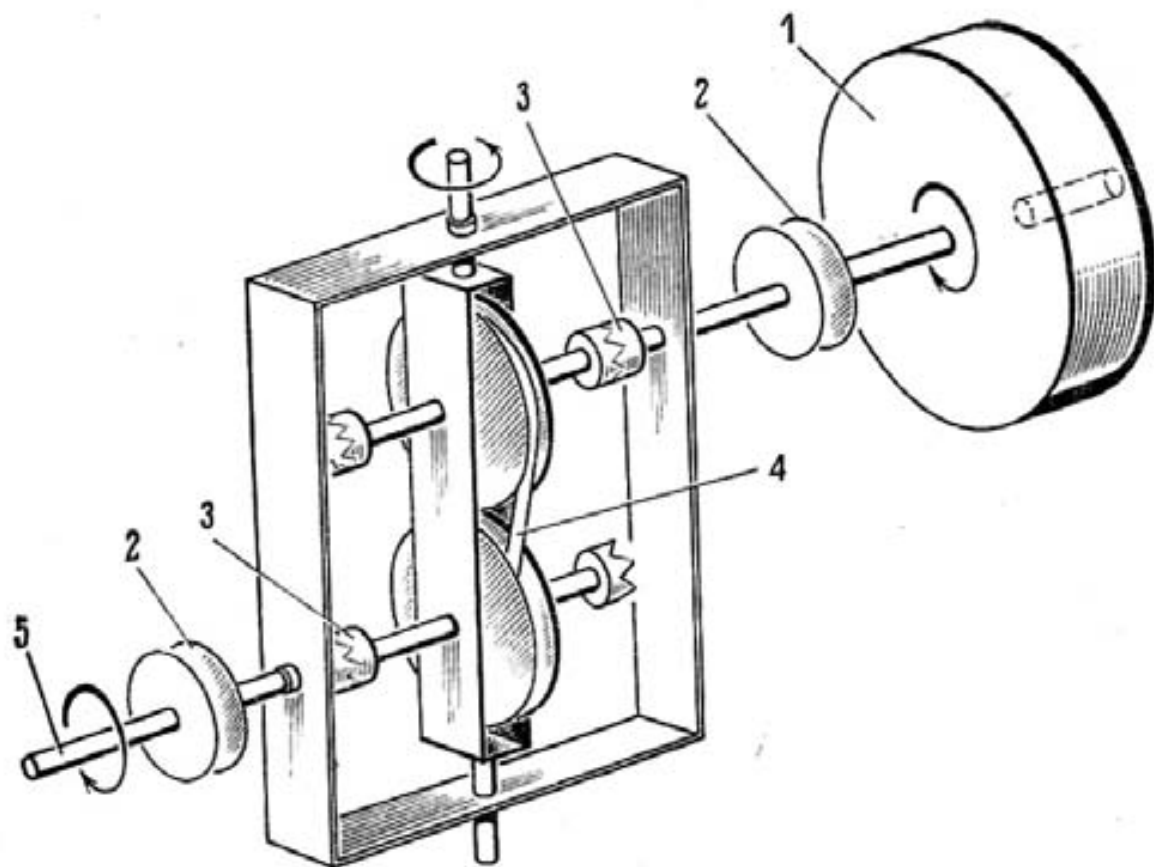


Рис. 78. Схема маховичного рекуператора с дискретным ленточным вариатором:

1—маховик; 2—фрикционная муфта; 3—зубчатая муфта; 4—лента; 5—вал трансмиссии

Разгон автомобиля энергией, накопленной при торможении, был очень плавным, намного лучше обычного разгона с помощью коробки передач. После разгона автомобиля рекуператором включалась высшая передача. Таким образом, автомобиль разгонялся без применения низших и промежуточных передач.

Измерение расхода топлива показало следующее: для разгона автомобиля с места до скорости 30 км/ч без участия рекуператора требовалось 28 см³, а для разгона рекуператором и двигателем совместно до той же скорости в тех же условиях требовалось всего 16 см³ топлива. Таким образом, на каждом разгоне экономилось около 45% топлива. Эти показатели близки к полученным Р. Кларком на его системе рекуперативного тормоза.

Лабораторией аккумулялирования и рекуперирования механической энергии Курского политехнического института совместно со Всесоюзным конструкторско-экспериментальным институтом автобусостроения разработаны и испытаны экспериментальные рекуператоры к автобусам типа ЛАЗ-695 (рис. 80). Рекуператор установлен в отсеке двигателя справа от него по ходу и связан карданным валом с передачей автобуса.

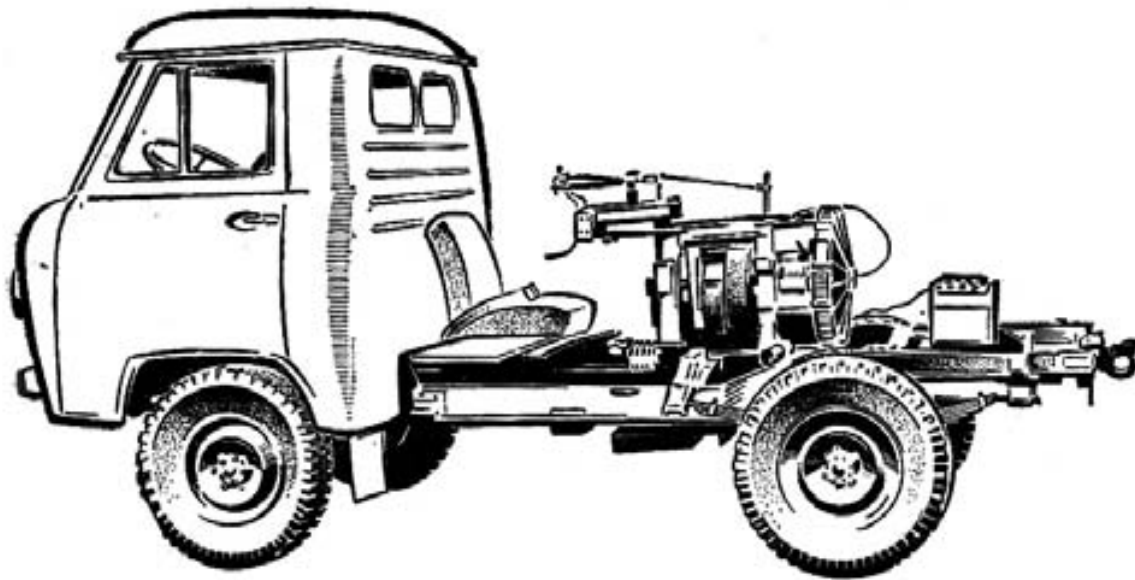


Рис. 79. Экспериментальный автомобиль с маховичным рекуператором

Масса рекуператора 150 кг при массе маховика 80 кг; максимальная частота вращения маховика 6000 об/мин; энергоемкость рекуператора до 0,6 млн. Дж энергии.

Рекуперация энергии торможения на городских автобусах, как показал эксперимент, может обеспечить экономию около 50% топлива и сохранение основных фрикционных тормозов для экстренных торможений. Значительное снижение расхода топлива и работа двигателя преимущественно на установившихся режимах существенно уменьшает выделение отработавших газов в атмосферу, особенно наиболее вредных компонентов, выделяющихся при неустановившихся режимах. Повышается интенсивность разгона автобусов, а следовательно, и его средняя скорость.

Большой эффект дает рекуперация энергии торможения на метрополитене. Метропоезд «Эдванс Консепт», недавно вышедший на линию Нью-Йоркского метро, экономит с помощью маховичных рекуператоров свыше 30% электроэнергии, что очень существенно отражается на энергетическом балансе города.

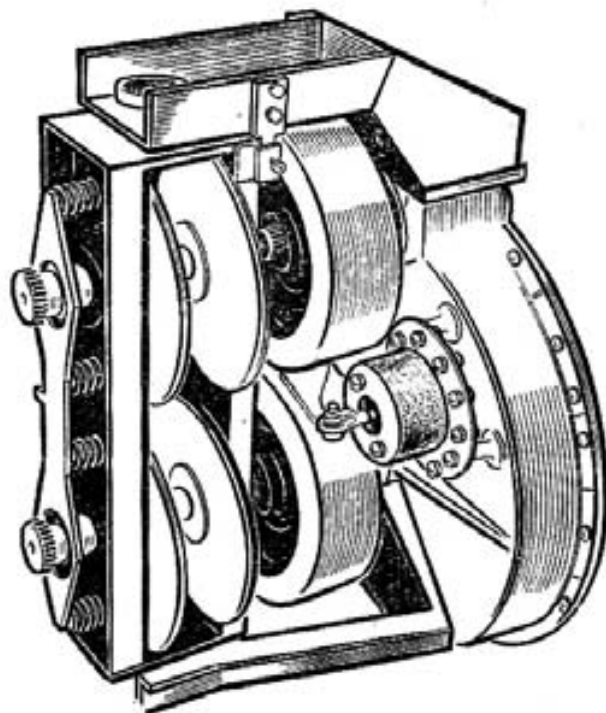


Рис. 80. Экспериментальный рекуператор к автобусу ЛАЗ-695

Надо отметить, что основная цель рекуперации энергии торможения сегодня состоит в существенном очищении атмосферы городов от чрезвычайно опасных для человека и природы продуктов неполного сгорания топлива. И в этом кроме рекуператоров энергии помогают и очень похожие на них по назначению...

СПАСИТЕЛЬНЫЕ ГИБРИДЫ

Индивидуальные инерционные силовые агрегаты, хотя и являются перспективными для автомобилей и автобусов, требуют радикальной перестройки существующих видов транспорта. Кроме этого, создание конкурентоспособного инерционного автомобиля связано пока с определенными техническими трудностями. Поэтому признаны целесообразными паллиативные решения — так называемые гибридные схемы силовых агрегатов, представляющих собой совокупность двигателя внутреннего сгорания и инерционного двигателя. Гибрид поистине является спасительным, так как он спасает положение именно сейчас, не откладывая дел в долгий ящик.

Гибридный силовой агрегат позволяет в 2 раза и более сократить мощность основного двигателя, значительно уменьшить расход топлива, повысить динамические качества автомобиля, сократить до допустимых пределов токсичность продуктов неполного сгорания топлива. При этом гибридный силовой агрегат, существенно не отличаясь от обычного двигателя по габаритам и массе, может быть установлен на автомобилях существующих конструкций без их существенной переделки.

Имея много общего с рекуператорами, гибридные силовые агрегаты более универсальны, применимы для более широкого диапазона эксплуатационных условий, и для более широкого класса автомобилей, чем рекуператоры, но зато более сложны и дороги.

Ниже описаны результаты разработок по гибридным схемам автомобильных силовых агрегатов, выполненных отделением наземных транспортных систем фирмы «Локхид» (США). Работы велись под руководством Р. Р. Гильберта, Дж. Р. Гарвея, Г. Е. Хойера и Л. Дж. Лоусона.

Жизненная необходимость подобных исследований в США очевидна, так как крупные насыщенные автомобилями города страдают из-за отравления атмосферы отработавшими газами. Гибридные силовые агрегаты наряду с высокой экономичностью во много раз меньше отравляют воздух токсичными продуктами неполного сгорания топлива, чем двигатель внутреннего сгорания.

Подобные работы проводятся и в нашей стране. Это предотвратит возможность отравления атмосферы городов при резко возросшем числе автомобилей, а заодно обеспечит значительную экономию топлива.

Гибридная схема фирмы «Локхид» представляет собой двигатель внутреннего сгорания, кинематически объединенный с инерционным аккумулятором (рекуператором) механической энергии, помогающим двигателю в периоды работы его на неустановившихся режимах, когда выделение токсичных продуктов особенно велико. Маховик в гибридных схемах служит для рекуперативного торможения и разгона автомобилей, пуска двигателя; он равномерно загружает двигатель по мощности, обеспечивая благоприятный режим его работы.

Фирмой были рассмотрены возможности применения гибридных схем для машин следующих типов: семейного автомобиля, городского автобуса, прокатного автомобиля и почтового фургона.

Недавнее (1970 г.) утверждение закона о сохранении чистоты воздушного бассейна в США сильно изменило подход к контролю загрязнения воздуха отработавшими газами автомобилей.

Уровни выделений (эмиссий), установленные этим законом, существенно ниже тех, которые обеспечиваются современными автомобилями.

Сравнительные данные по эмиссиям среднего современного автомобиля (выпуска 1970 г.) и требования закона о сохранении чистоты воздуха следующие:

Продукты сгорания	C_xH_y	CO	NO _x
Количество выделений, г/км:			
современным автомобилем	2,03	23,0	2,0
по требованию закона	0,29	2,94	0,31

Из приведенных данных видно, что требуется почти восьмикратное уменьшение вредных выделений.

Есть два пути уменьшения вредных выделений двигателем автомобиля: сжигание лучшего топлива и лучшее его сгорание. Анализ различных методов осуществления этих путей — применением электронного зажигания, различных термических реакторов и др. — показал, что они не в состоянии снизить вредные выделения до требуемых законом. Фирма решила использовать третий, по ее мнению оптимальный, путь снижения выделений — сжигание меньшего количества топлива, что достигается рекуперацией энергии торможения и выбором двигателя, исходя из довольно низкой средней мощности. Это может быть обеспечено применением гибридной схемы (двигатель внутреннего сгорания + инерционный двигатель), приведенной на рис. 81 и 82 и дающей следующие преимущества:

1) снижение расхода топлива примерно вдвое за счет рекуперации кинетической энергии;

2) уменьшение установочной мощности двигателя до 40% от номинальной, так как маховик обеспечивает автомобилю мощность, необходимую для пуска двигателя и разгона;

3) возможность работы двигателя главным образом на единственной точке его характеристики, отвечающей оптимальному

режиму, когда вредные выделения значительно сокращаются;

4) устраняются различные системы быстрого пуска двигателя и режимы холостого хода, как известно, увеличивающие токсичность отработавших газов.

Применение гибридных схем не накладывает ограничений на размеры и мощность двигателей; к гибридным схемам применимы все улучшения, осуществленные в автомобильных двигателях современных типов.

Лучшим типом двигателя внутреннего сгорания для гибридных схем является карбюраторный, хотя усовершенствованные двигатели, работающие по циклу Ранкина, Брейтона, или модифицированные дизельные двигатели с низким уровнем вредных выделений также пригодны для этой цели.

Фирмой проанализированы режимы движения и потребление энергии для автомобилей упомянутых четырех типов, а также исследованы рациональные формы и конструкции маховиков для этих автомобилей.

В результате исследований маховиков для гибридных схем были выбраны два основных типа: стальной диск равного сопротивления и супермаховик стержневого типа из ориентированного стеклопластика.

ТАБЛИЦА 2

Тип автомобиля	Энергия маховика, Дж	Максимальная масса системы движения ¹ , кг	Масса маховиков, кг	
			Стальной диск, $e=185 \cdot 10^3$ Дж/кг	Стержень из стеклопластика, $e=2 \cdot 10^6$ Дж/кг
Семейный	$49 \cdot 10^7$	680	2650	2450
Прокатный	$6 \cdot 10^7$	275	335	300
Городской автобус	$35 \cdot 10^7$	2750	1900	1750
Почтовый	$18,4 \cdot 10^7$	770	1000	920

¹ Система движения включает маховик, трансмиссию, муфты, кардан, дифференциал, оси и управление.

В табл. 2 даны рассчитанные на счетно-решающих устройствах параметры маховиков в виде стального диска и супермаховика стержневого типа для привода отмеченных четырех автомобилей в их типичном режиме работы с использованием только энергии маховика (без двигателя, как в гиробусах).

Видно, что масса маховика получает приемлемые значения только для одного автомобиля — городского автобуса; для всех остальных она превышает даже массу всей движущей системы. Здесь уместно отметить, что фирма «Локхид» закладывала в счетно-решающие устройства теоретические данные по современным материалам и маховикам из них. Д. В. Рабенхорст предполагает повышение в перспективе удельной энергоемкости супермаховиков до $1,75 \cdot 10^6$ Дж/кг. Массы маховиков по табл. 2 в

этом случае соответственно были бы 280, 34, 200 и 105 кг, что с запасом удовлетворяет самым придирчивым требованиям. Фирма «Локхид», между тем, исходит из возможности создания новых систем незамедлительно. Однако первоочередной задачей, как было отмечено, является создание гибридных агрегатов, и поэтому все дальнейшие материалы даны в расчете только на маховики гибридов.

Параметры маховиков гибридных схем определяются исходя из запаса кинетической энергии, необходимой для создания максимальной скорости автомобиля. При проектировании гибрида (как, впрочем, и рекуператора) принимается целесообразным, чтобы сумма кинетических энергий маховика и автомобиля в любой момент времени была равна кинетической энергии автомобиля при максимальной скорости. Таким образом, маховик обеспечивает автомобиль мощностью, требуемой для ускорения, а двигатель внутреннего сгорания обеспечивает энергией, необходимой для преодоления всех сопротивлений (качение, аэродинамика, уклоны и пр.).

Параметры маховиков на основе диска с удельной энергоемкостью $18,5 \cdot 10^4$ Дж/кг для гибридных схем рассматриваемых автомобилей приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3

Тип автомобиля	Требуемая энергия маховика, Дж	Масса маховика, кг
Семейный	$134 \cdot 10^4$	7,2
Прокатный	$41,5 \cdot 10^4$	2,2
Городской автобус	$240 \cdot 10^4$	12,9
Почтовый	$56 \cdot 10^4$	3,0

Эти параметры свидетельствуют о том, что маховик занимает весьма малую часть силового агрегата и его масса может быть без ущерба для автомобиля увеличена в 2—3 раза, а удельная энергоемкость маховика соответственно понижена в это же число раз для удешевления и упрощения конструкции.

Хотя параметры маховика вполне приемлемы для автомобилей всех рассматриваемых типов, основной упор был сделан на городской автобус и семейный автомобиль, как главных загрязнителей атмосферы.

Трансмиссия гибридного силового агрегата автомобилей обоих типов должна обеспечить следующее:

1) плавность изменения передаточного числа; передаточное число трансмиссии должно изменяться бесступенчато и плавно, без колебаний скорости, чтобы не вызвать нежелательных динамических нагрузок, характерных для привода с маховиком, или неустойчивости движения;

2) широкий диапазон передаточного числа; исходя из того, что маховик при ускорении движения автомобиля замедляется

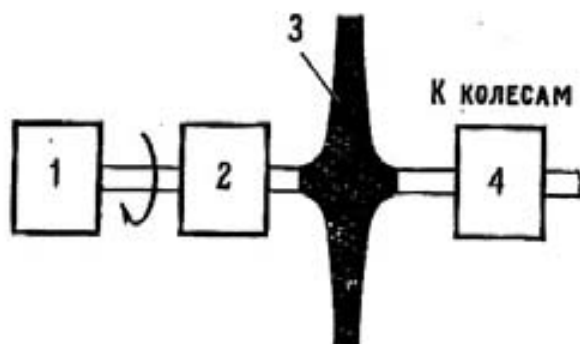


Рис. 81. Гибридная схема (двигатель внутреннего сгорания+маховичный двигатель) силового агрегата со сдвоенной трансмиссией;

1—двигатель, 40% номинала; 2—муфты и привод; 3—маховик; 4—трансмиссия

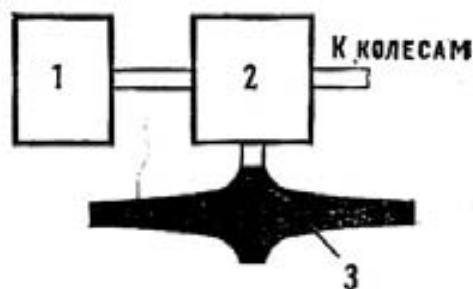


Рис. 82. Гибридная схема (двигатель внутреннего сгорания+маховичный двигатель) силового агрегата с одинарной трансмиссией:

1—двигатель 40% номинала; 2—трансмиссия; 3—маховик

и, наоборот, при замедлении автомобиля маховик получает ускорение, для обеспечения рационального регулирования скорости автомобиля был выбран диапазон изменения передаточного числа примерно 10—15;

3) возможность рекуперации кинетической энергии; обмен кинетической энергии между маховиком и автомобилем должен быть обратимым; трансмиссия гибридного агрегата должна обеспечить передачу кинетической энергии автомобиля маховику при торможении автомобиля, а энергии маховика — автомобилю при его разгоне;

4) высокую передаваемую мощность; чтобы обеспечить уменьшение вредных выделений двигателя, трансмиссия должна быть эффективной по всему широкому диапазону скоростей автомобиля; мощность, передаваемая маховиком, особенно критическая, может иногда превосходить в несколько раз среднюю мощность двигателя, что необходимо учитывать при проектировании трансмиссии;

5) совместимость с практикой; трансмиссия маховика должна быть совместимой с текущей автомобильной практикой, если гибридные схемы войдут в производство в следующие 5 или 10 лет; трансмиссия не должна создавать излишнего шума при эксплуатации и не требовать специальных мер для ее обслуживания и ремонта.

Основная идея управления гибридным силовым агрегатом состоит в регулировке двигателя внутреннего сгорания таким образом, чтобы поддерживать сумму кинетической энергии автомобиля и маховика постоянной.

Маховик можно установить в гибридном силовом агрегате двумя способами: с двойной трансмиссией (рис. 81) и с единой трансмиссией (рис. 82), отличающейся тем, что маховик и двигатель подключены к единой трансмиссии параллельно и мо-

гут отключаться независимо. В случае двойной трансмиссии двигатель и маховик подключаются к трансмиссии автомобиля последовательно.

Анализ автомобильных трансмиссий — механической, электрической, гидрокинетической и гидростатической — показал, что для гибридных силовых агрегатов больше всего подходят электрическая и гидростатическая трансмиссии.

Кроме отмеченных трансмиссий, как оказалось, для гибридных агрегатов более других подходит трансмиссия с так называемым «разделением потока мощности». Часть крутящего момента идет при этом по механической передаче, а часть по гидростатической. Для разделения и последующего соединения потоков мощности служит дифференциальная передача. Такие трансмиссии с разделением потока мощности очень популярны в автомобилестроении в последнее время, особенно на грузовых автомобилях.

Данные по трансмиссиям разных типов для гибридной системы семейного автомобиля и городского автобуса приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4

Трансмиссии	Семейный автомобиль				Городской автобус			
	Коэффициент эффективности	Объем, лм³	Масса, кг	Стоимость, дол. лд.	Коэффициент эффективности	Объем, лм³	Масса, кг	Стоимость, дол.
Электрическая:								
единая	0,588	120	220	640	0,6254	560	920	6088
двойная	0,369	140	245	689	0,4267	600	950	6291
Гидростатическая:								
единая	0,745	115	128	403	0,7681	720	870	3335
двойная	0,626	130	132	469	0,6615	830	960	3900
С разделением мощности:								
единая	1,0	130	142	261	1,000	900	1020	2205
двойная	0,835	180	178	341	0,8495	1170	1330	2872

Коэффициент эффективности здесь зависит от рекуперированности энергии и к. п. д.; он нормализован на основе равенства его единице для лучшей трансмиссии.

Как следует из табл. 4, лучшей и для автобуса и для семейного автомобиля является трансмиссия с разделением потока мощности как единая, так и двойная.

Для выбора рационального типа двигателя для гибридного силового агрегата были проанализированы наиболее приемлемые для автомобилей карбюраторные и дизельные двигатели. Всесторонний анализ показал, что лучшим типом двигателя для гибридного силового агрегата является карбюраторный.

ТАБЛИЦА 5

Показатели	Эмиссия, г/км		
	HC	CO	NO _x
Стандарт для семейного автомобиля	0,29	2,94	0,31
Средние данные по двигателю семейного автомобиля (данные 1970 г.)	2,03	23,00	2,00
Данные маховичной гибридной системы семейного автомобиля:			
с лучшим карбюраторным двигателем	0,05	0,89	0,38
с худшим карбюраторным двигателем	0,43	1,60	0,70
Калифорнийский стандарт 1973 г.	6,9	10,60	15,50
Данные маховичной гибридной системы городского автобуса:			
с лучшим карбюраторным двигателем	0,337	5,80	2,40
с худшим карбюраторным двигателем	2,80	10,00	4,50
с лучшим дизельным двигателем	1,13	1,14	5,65
с худшим дизельным двигателем	1,65	42,30	18,40

В табл. 5 приведены значения вредных эмиссий (выделений) для карбюраторных двигателей и гибридной системы легкового семейного автомобиля, для карбюраторных, а также дизельных двигателей и гибридных систем с этими двигателями городского автобуса в сравнении с требованиями закона о сохранении чистоты воздуха.

Из табл. 5 видно, что все карбюраторные двигатели и лучшие дизельные в гибридной системе с маховиком удовлетворяют требованиям, предъявляемым законом чистого воздуха. Вредные выделения указанных двигателей, работающих без маховичных агрегатов, во много раз превышают стандартные требования.

Представляет интерес компоновка гибридного силового агрегата на автомобиле.

На рис. 83, а показан автомобиль с маховиком, смонтированным вместе с двигателем. Двигатель слегка передвинут вперед, чтобы компенсировать большую длину приводной трансмиссии маховика, вмонтированного вместо гидротрансформатора. Можно заметить, что сам двигатель в этом случае будет существенно меньшим, чем без гибрида. Трансмиссия гибрида, монтируемого вместе с двигателем, показана на рис. 83, б.

На рис. 84, а и б показан автомобиль с другим, дифференцированным расположением маховичной части гибрида.

Маховик в герметичном корпусе и его трансмиссия расположены в задней части автомобиля самостоятельным, упруго подвешенным узлом. Такое расположение предоставляет больше

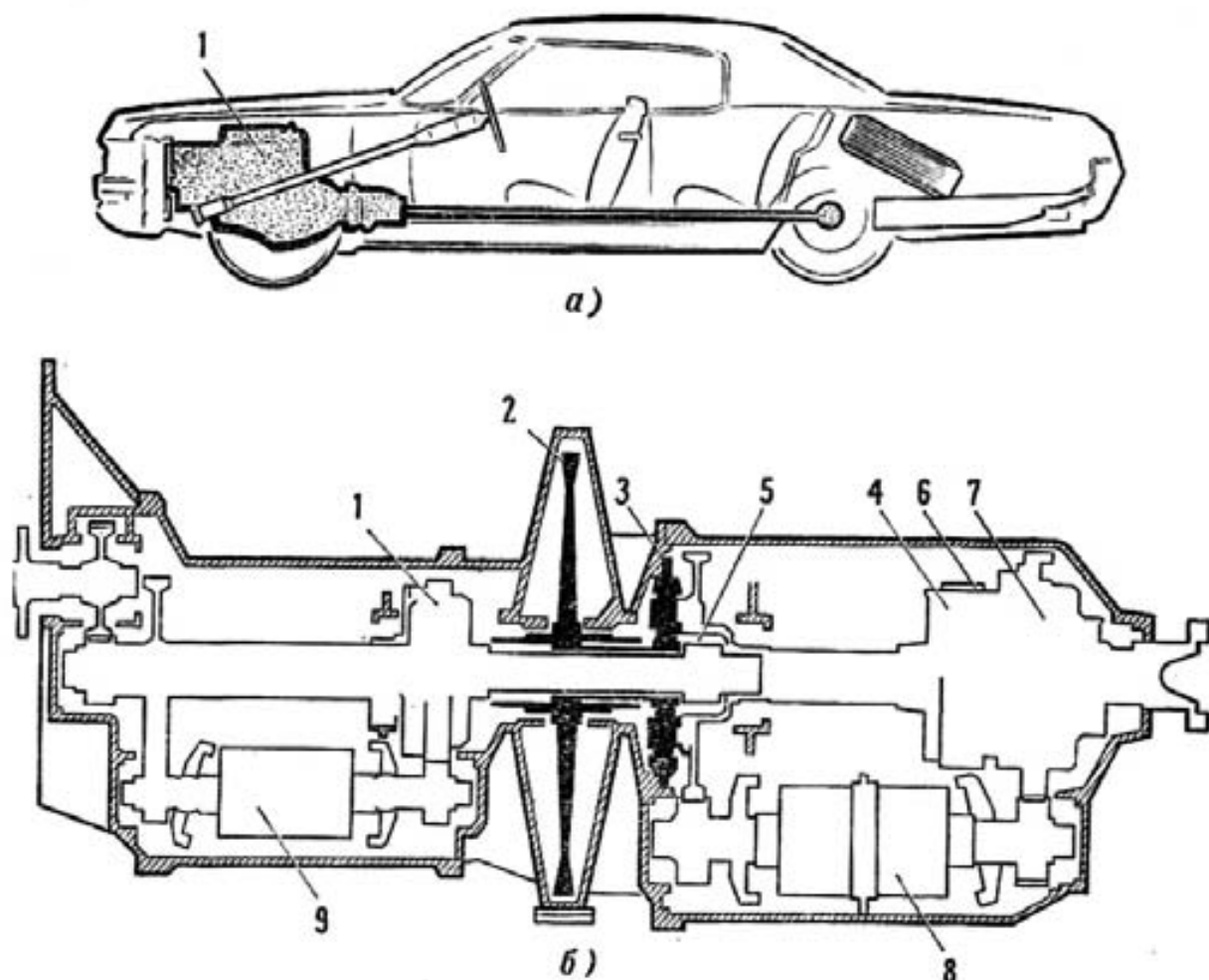


Рис. 83. Автомобиль с гибридным силовым агрегатом, смонтированным задне с двигателем внутреннего сгорания:

а—компоновка маховичной части (1—гибридный силовой агрегат); б—схема расположения маховичной части гибрида (1, 3—планетарные редукторы; 2—маховик; 4—муфта движения; 5—обгонная муфта; 6—муфта реверса; 7—дифференциал; 8—гидростатический узел автомобиля; 9—гидростатический узел двигателя)

места силовому агрегату; схема этого автономного маховичного силового агрегата дана на рис. 84, а.

Аналогично можно компоновать маховичную часть гибрида и на автобусах в зависимости, конечно, от переднего или заднего расположения двигателя.

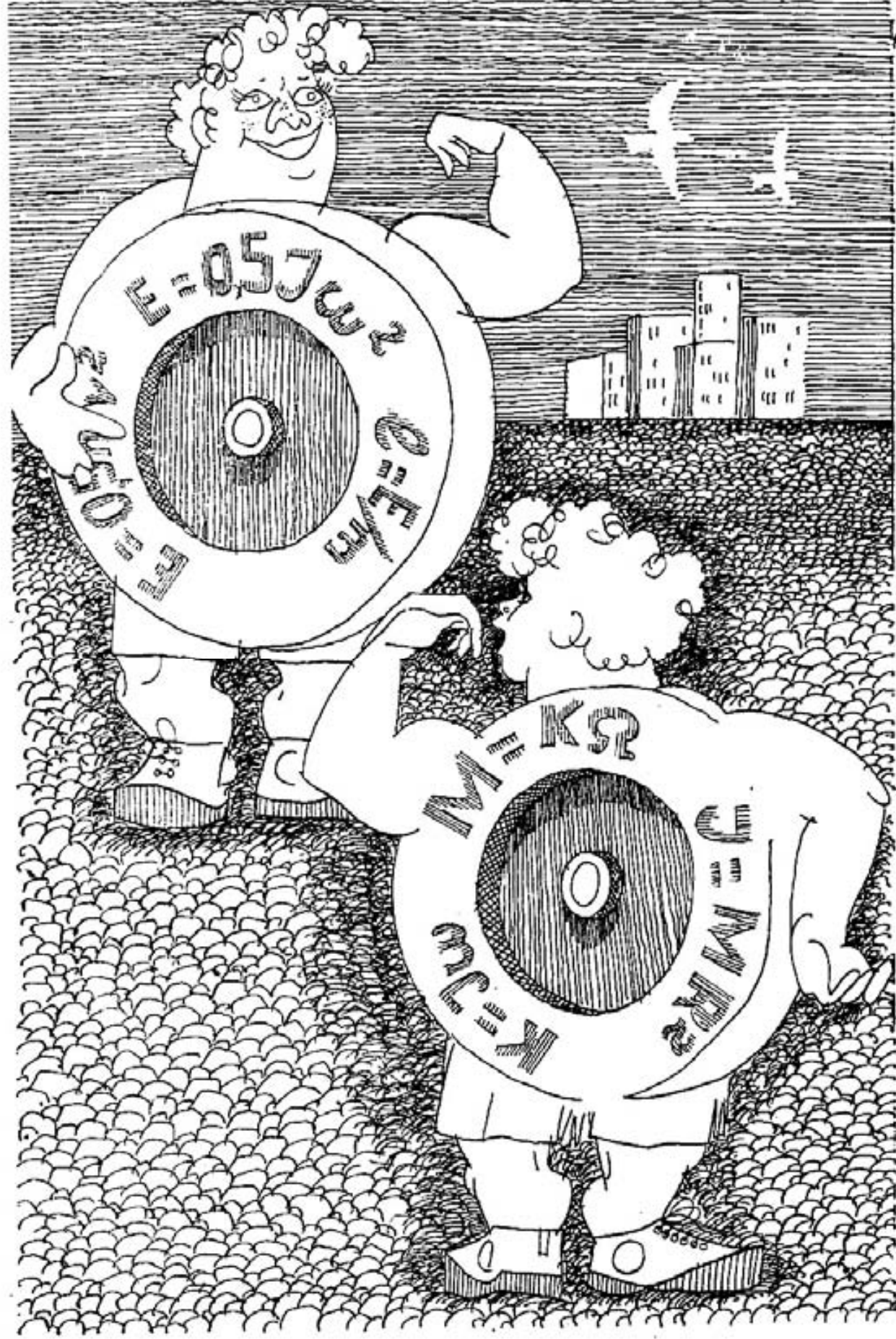
Анализ возможностей аккумулирования механической энергии на автомобилях позволяет сделать следующие выводы:

1) привод рассмотренных автомобилей только от маховика без двигателя, исключая городской автобус, в ближайшее время, по-видимому, невозможен из-за низкой удельной энергии современных маховиков; создание автобуса с приводом от чистого маховика возможно и в настоящее время, если этот автобус будет заряжаться на конечных остановках;

2) приведенные системы гибрида маховик — двигатель внутреннего сгорания применимы не только для автомобилей рас-

кие уровни вредных выделений, чем требуемые стандартом; существенно снижаются уровни выделений и на автобусах, снабженных гибридными агрегатами; экономичность автобуса при этом резко возрастает.

Видимо, мы скоро станем свидетелями широкого применения маховиков для гибридов и рекуперации механической энергии на транспортных машинах и в первую очередь на городском транспорте. За рубежом такие транспортные машины частично уже работают, частично вступают в действие уже в самое ближайшее время. И не удивительно — крупные насыщенные транспортом города там буквально задыхаются от удушья.



Чтобы узнать вещь, нужно её сделать.
Ибо, хотя вы думаете, что знаете её, в
этом не может быть уверенности, пока
вы не попытаетесь её сделать.

СОФОКЛ

ГЛАВА IV

КАК ПОСТРОИТЬ МАХОВИЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ?

Чтобы построить маховичный двигатель, нужно, конечно, владеть всеми теми основами инженерного дела, которые требуются и для создания двигателей других типов. Однако есть и специфические вопросы, знание которых совершенно необходимо для создателей маховичных двигателей. Таких вопросов как минимум три: прочностные расчеты маховиков, их балансировка и учет гироскопического эффекта. Для рассмотрения этих вопросов, особенно прочностных и гироскопических расчетов, необходимы знания математики и механики, как минимум, в объеме ВТУЗа. Однако автор попытался изложить материал максимально доступно, чтобы сделать его понятным для широкого круга читателей, имеющих хотя бы некоторое отношение к технике.

Итак ...

КАК РАССЧИТАТЬ МАХОВИК НА ПРОЧНОСТЬ?

Задача эта для маховичных двигателей, пожалуй, наиболее важная. Все основные показатели этих двигателей в той или иной мере зависят от прочности маховика. И если для других двигателей ошибки в прочностных расчетах могут привести к поломкам деталей и остановке двигателя, то ошибка в прочностном расчете маховиков может оказаться роковой. Поэтому прочностному расчету маховиков должно быть уделено самое пристальное внимание.

Мы здесь рассмотрим расчет на прочность маховиков в виде ободов, а также дисков постоянной толщины и равного сопротивления, стержневых маховиков и маховиков полых, наполненных жидкостью. Кроме того, вниманию читателей предложен простой и наглядный прочностно-энергетический расчет маховиков по коэффициенту формы, который позволяет помимо расчета на



прочность получить еще и энергоемкость маховиков разной формы и выбрать оптимальные варианты. В конце раздела даны некоторые советы и рекомендации по расчету ленточных супермаховиков.

Маховик в виде тонкого обода. Для определения напряжений во вращающемся тонком ободке (кольце) применим известный из механики принцип Даламбера, позволяющий свести динамические процессы (т. е. процессы, связанные с движением тел) к равно-

весию. Для этого, правда, нам приходится добавлять к действующим на тело силам силы инерции.

Рассечем мысленно маховик на две равные части и, убрав одну из них, заменим ее действие на оставшуюся часть силами \bar{F}_1 и \bar{F}_2 , равными между собой (рис. 85).

Что же вызывает возникновение этих сил? Если применять принцип Даламбера и рассматривать маховик как неподвижный, то нам надо, согласно сказанному выше, прикладывать к оставшейся части маховика силу инерции — центробежную силу. Она-то и вызывает силы \bar{F}_1 и \bar{F}_2 , удерживающие полукольцо на месте.

Заменим действие полукольца действием точечной массы, равной массе полукольца и расположенной в центре тяжести (центре масс). Из геометрии известно, что центр тяжести полукольца расположен на расстоянии D/π от центра окружности, где D — диаметр обода. Величина центробежной силы $F_{ц}$ равна, как известно, произведению массы m на квадрат угловой скорости вращения ω и на расстояние этой массы от центра вращения, в данном случае D/π . Итак:

$$F_{ц} = \frac{m\omega^2 D}{\pi} \quad (29)$$

Сила же, разрывающая обод, $F_1 = F_2$, будет в 2 раза меньше, так как $F_{ц}$ «удерживается» двумя равными силами F_1 и F_2 . Учитывая это, а

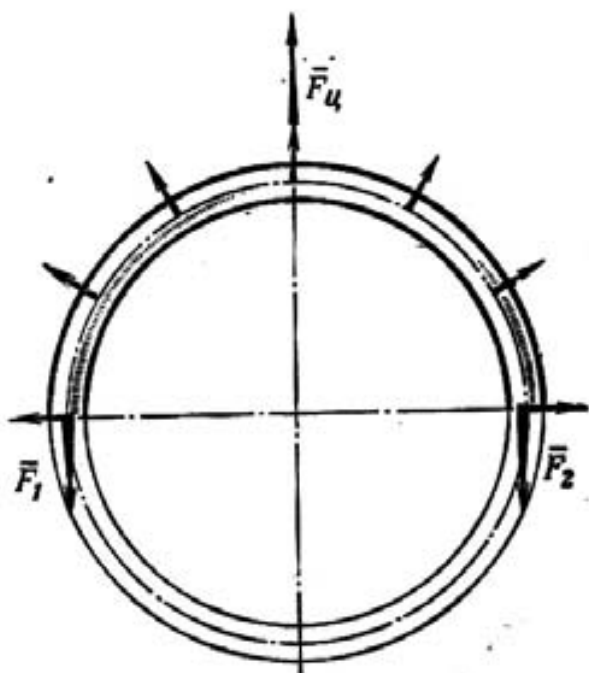


Рис. 85. Полукольцо под действием центробежных сил

также то, что масса полукольца равна

$$m = 0,5\pi D S \rho,$$

где ρ — плотность материала, а напряжение σ равно отношению F к площади поперечного сечения S , имеем

$$\sigma = \frac{\rho \omega^2 D^2}{4}.$$

Выразив окружную скорость v через угловую скорость и диаметр кольца $D: v = \omega D/2$, окончательно получим знакомую из предыдущего формулу

$$\sigma = \zeta v^2. \quad (30)$$

Итак, для ободкового маховика напряжения не зависят от его размеров, а только от плотности материала и окружной скорости.

Маховик в виде стержня постоянного сечения. Рассмотрим вращающийся вокруг поперечной оси стержень. Как и в предыдущем случае, отбросим половину стержня, заменив его действие силой \vec{F} . Центробежная сила инерции $F_{ц}$, равная силе F , составит

$$F_{ц} = 0,5 m \omega^2 r, \quad (31)$$

где r — расстояние от центра вращения до конца стержня или половина длины стержня; m — масса половины стержня, $m = r S \rho$.

Отнеся силу к площади поперечного сечения стержня и учтя сказанное выше, получаем напряжения вдвое меньшие, чем у тонкого кольца (обода):

$$\sigma = 0,5 \zeta v^2. \quad (32)$$

Итак, и для стержневого маховика напряжения не зависят от его размеров, а только от плотности материала и окружной скорости.

Маховик в виде диска постоянной толщины. Вывод формул, определяющих напряжения во вращающихся дисках с отверстием в центре и без него, достаточно сложен, а поэтому рассмотрим эпюры (графические выражения) напряжений в этих маховиках. В дисковых маховиках уже мы не имеем одноосного напряженного состояния, как в тонком ободке или стержне. Здесь действует плоское напряженное состояние, обусловленное окружными σ_t и радиальными σ_r напряжениями. Как показано на рис. 87, где выделен элемент диска, окружные напряжения действуют по касательной, а радиальные — по радиусу окружности, проведенной через выделенный элемент.

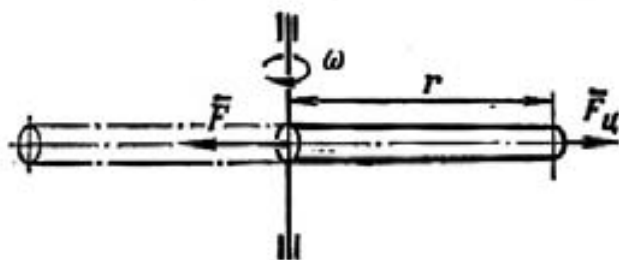


Рис. 86. Стержень супермаховика под действием центробежных сил

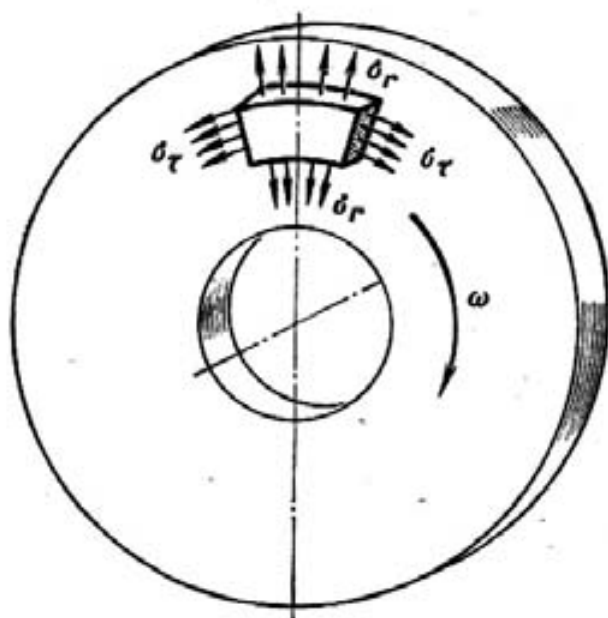


Рис. 87. Вращающийся диск и выделенный из него элемент под действием радиальных и окружных напряжений

Как видно из эпюр (рис. 88 и 89), максимальные (опасные) напряжения в диске без отверстия имеют место в центре, причем окружные напряжения здесь равны радиальным. Для диска же с центральным круглым отверстием действие радиальных напряжений незначительно, а наиболее опасные окружные напряжения возникают на внутренней цилиндрической поверхности отверстия. Максимальные (опасные) значения напряжений для этих двух случаев соответственно равны

$$\sigma_r = \sigma_\tau = Q \frac{3 + \mu}{8} v^2; \quad (33)$$

$$\sigma_\tau = Q \frac{3 + \mu}{4} v^2 \left[1 + l^2 \left(\frac{1 - \mu}{3 + \mu} \right) \right], \quad (34)$$

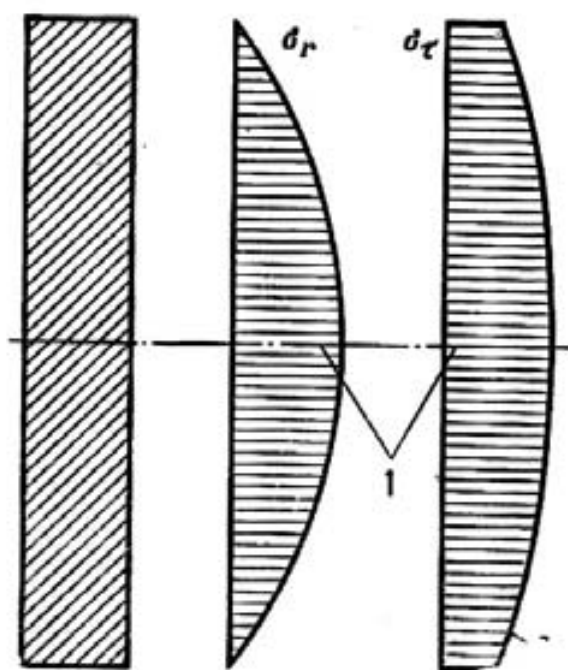


Рис. 88. Эпюры напряжений в диске без отверстия:

1—максимальные напряжения в центре; 2—напряжения на периферии

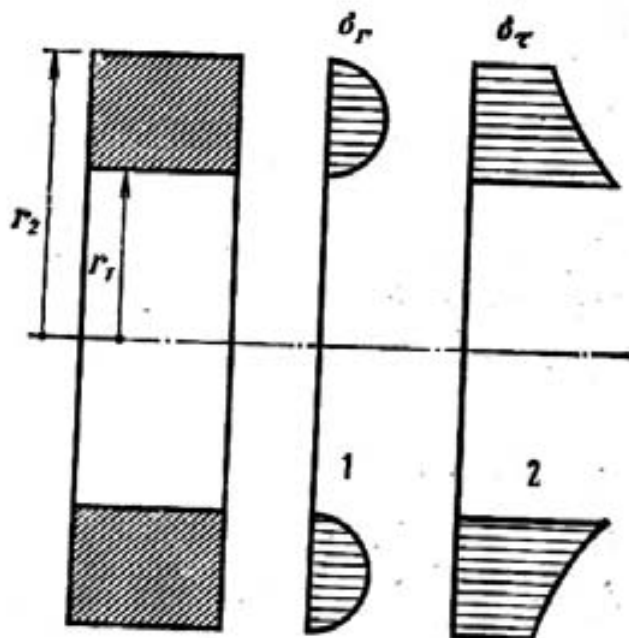
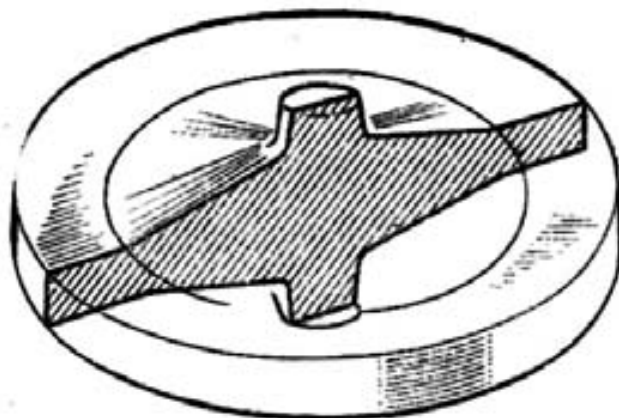


Рис. 89. Эпюры напряжений в диске с отверстием:

1—максимальные радиальные напряжения; 2—максимальные окружные напряжения

Рис. 90. Форма диска или стержня равной прочности



где μ — отношение величины поперечной деформации элемента к продольной, называемое коэффициентом Пуассона (для каждого материала этот коэффициент примерно постоянен и равен для стали, например, 0,3, для резины — 0,47, для парафина он максимален — 0,5); i — отношение диаметра отверстия к наружному диаметру диска.

Как и в предыдущих случаях, напряжения не зависят от размеров маховика и определяются окружной скоростью и свойствами материала (плотностью, коэффициентом Пуассона).

Диск и стержень равной прочности. Эти фигуры характерны тем, что в них напряжения одинаковы по всему сечению, а также тем, что тело маховика, имеющее максимальную толщину в центре, убывает к периферии (рис. 90).

Диск равной прочности обычно характеризуют его толщиной h в зависимости от радиуса r и толщины в центре h_0

$$h = h_0 e^{-\frac{Q\omega^2 r^2}{2\sigma}}. \quad (35)$$

Здесь σ — допускаемые напряжения материала, т. е. те, которые мы выбираем для данного материала в качестве рабочих напряжений; e — основание натуральных логарифмов, $e \approx 2,7183$.

Для стержня равной прочности по такому же закону изменяется его сечение S в зависимости от расстояния от центра r и сечения в центре S_0 :

$$S = S_0 e^{-\frac{Q\omega^2 r^2}{2\sigma}}. \quad (36)$$

Из приведенных выражений видно, что форма диска и стержня равной прочности зависит при постоянных свойствах материала, от окружной скорости $\omega^2 r^2$ и при равенстве ее нулю эти фигуры вырождаются соответственно в диск и стержень постоянного сечения. Кроме того, для создания напряжений σ на самой периферии диска и стержня там необходим хотя бы небольшой ободок или утолщение, что и выполняется для реальных конструкций (см. рис. 90).

При высоких окружных скоростях, даже при больших значениях допускаемых напряжений, отношения между толщинами (или сечениями) диска или стержня равной прочности в центре и на периферии могут стать очень большими. В качестве примера ниже даны значения отношений $\left[\frac{h_0}{h} \text{ или } \frac{S_0}{S} \right]$ для диска

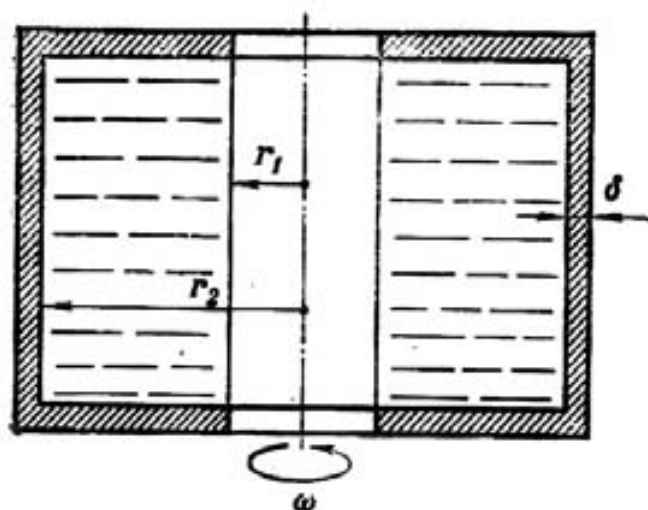


Рис. 91. Схема к расчету полого маховика

и стержня равной прочности, выполненных из стали с достаточно большим допускаемым напряжением на растяжение $\sigma = 25\,000 \text{ Н/см}^2$ в зависимости от окружной скорости:

Окружная скорость, м/с 200 400 600 800

$\frac{h_0}{h}$ или $\frac{S_0}{S}$ 1,9 12,9 310 27 500

Столь быстрое возрастание отношений $\left[\frac{h_0}{h} \text{ и } \frac{S_0}{S} \right]$ и является фактическим ограничителем повышения окружной скорости маховиков в виде диска и стержня равной прочности.

Маховик в виде полого цилиндра с жидкостью. Для создания маховика с переменным моментом инерции многими изобретателями предлагалась конструкция, представляющая полый цилиндр, заполняемый жидкостью (например, водой или ртутью). Несмотря на множество недостатков таких маховиков, они принципиально применимы при малых угловых скоростях¹. Создание высокопрочных армированных оболочек расширяет возможности применения этих маховиков. Кроме того, на подобном принципе основан ряд второстепенных устройств для инерционных аккумуляторов (например, динамических уплотнений).

Ниже дан расчет напряжений в цилиндрической стенке вращающегося барабана, наполненного жидкостью (рис. 91). Ввиду того, что угловая скорость барабана ω весьма велика, можно принять поверхности равного давления в жидкости цилиндрическими.

Давление жидкости по образующей цилиндра равно

$$p = \frac{\rho_0}{2} (r_2^2 - r_1^2) \omega^2,$$

где r_1 и r_2 — соответственно радиусы цилиндрических поверхностей жидкости и стенки барабана; ρ_0 — плотность жидкости.

К давлению жидкости следует прибавить распределенную нагрузку от сил инерции интенсивностью q :

$$q = \rho r_2^2 \omega^2,$$

где δ — толщина стенки барабана.

¹ Н. В. Гулиа, Л. Е. Литвинцев, Э. Я. Слоним. Авторское свидетельство № 286605. «Бюллетень изобретений и товарных знаков» № 34, 1970 г.

Суммарное давление

$$p_0 = p + q = \frac{q_0}{2} (r_2^2 - r_1^2) \omega^2 + q r_2^2 \omega^2. \quad (37)$$

В этом случае напряжение σ_r в меридиональном сечении барабана

$$\sigma_r = \frac{p_0 r_2}{\delta} = \frac{q_0 (r_2^2 - r_1^2) r_2 \omega^2}{2\delta} + q \omega^2 r_2^2. \quad (38)$$

Напряжение в нормальном сечении

$$\sigma_n = \frac{P}{2\pi r_2 \delta} = \frac{q_0 \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)^2}{8\delta r_2}, \quad (39)$$

где P — равнодействующая сил давления на крышку барабана;

$$P = \frac{\pi q_0}{4} (r_2^2 - r_1^2)^2 \omega^2.$$

Следует учесть, что наибольшие отклонения от реальных значений будут наблюдаться в зонах, прилежащих к местам присоединения крышек, что является следствием приближенности расчета.

Прочно-энергетический расчет маховиков по коэффициенту формы. Из рассмотрения напряженного состояния и энергии маховиков разных форм при вращении можно сделать вывод, что для ободов, дисков и стержней (из материала с изотропными прочностными свойствами) зависимость удельной энергоемкости e от удельной прочности $\frac{\sigma}{\rho} = \chi$ материала маховика имеет вид

$$e = k\chi, \quad (40)$$

где χ — отношение допускаемых напряжений к плотности данного материала (удельная прочность); k — коэффициент формы маховика, характеризующий ее эффективность (критерий эффективности формы).

Чем больше значение k , тем больше удельная энергоемкость маховика при данных напряжениях. Приведенное выражение приближенно справедливо и для супермаховиков, если считать напряжения в них близкими к одноосным.

Определение коэффициента формы k показывает, что для наиболее употребительных форм маховика он имеет следующие значения:

1) диск постоянной толщины без отверстия

$$k = \frac{2}{3 + \mu} \approx 0,6, \quad (41)$$

где $\mu \approx 0,3$;

2) обод с отношением внутреннего диаметра к внешнему, равным i

$$\kappa = \frac{1 + i^2}{(3 + \mu) \left[1 + i^2 \frac{1 - \mu}{3 + \mu} \right]} ; \quad (42)$$

при $i=0$, т. е. для диска с весьма малым отверстием

$$\kappa = \frac{1}{3 + \mu} \approx 0,3$$

или точно вдвое меньше, чем у диска без отверстия; при $i \approx 1$, т. е. для тонкого обода, $\kappa = 0,5$ и от μ не зависит;

3) диск равной прочности, форма которого определяется по выражению

$$h = h_0 e^{-\frac{\rho \omega^2 r^2}{2\sigma}} ;$$

характерно, что форма диска равной прочности при $v=0$ вырождается в диск постоянной толщины с $\kappa=0,6$; при бесконечно большой окружной скорости, как показал анализ, значение κ максимально: $\kappa=1$; при этом κ практически принимает это значение уже при окружных скоростях 400—500 м/с, на которых эти диски обычно и эксплуатируются;

4) стержень равной прочности также является формой переменной, зависящей для данного материала от окружной скорости

$$S = S_0 e^{-\frac{\rho \omega^2 r^2}{2\sigma}} ;$$

при $v=0$ эта форма вырождается в стержень постоянного сечения; при бесконечно большой окружной скорости $\kappa=0,6$. Эти значения соответствуют диску с весьма малым отверстием и тонкому ободу.

Коэффициенты формы κ маховиков, по данным автора и по данным фирмы «Локхид», приведены ниже:

	По данным автора	По данным фирмы «Локхид»
Диск с весьма малым центральным отверстием	0,3	0,305
Стержень (отдельное волокно)	0,3	0,333
Стержень равной прочности	0,5	—
Толстый обод ($i=0,8$)	0,44	0,438
Тонкий обод ($i=1$)	0,5	0,5
Диск без отверстия	0,6	0,606
Конический диск	—	0,806
Диск равной прочности $\frac{h_0}{h} = 5,48$	—	0,807
Диск равной прочности при бесконечно большой окружности скорости	1,0	—

Итак, наименее эффективными формами для маховиков являются диски с малыми центральными отверстиями и стержни по-

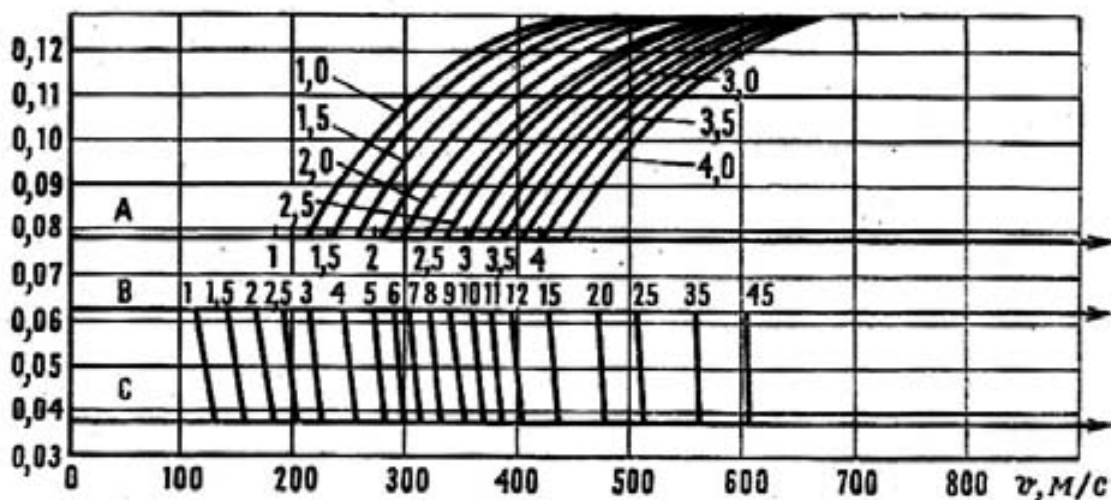


Рис. 92. Диаграмма для подбора и расчета маховиков

стоянной толщины ($\kappa=0,3$); затем идут стержни равной прочности и тонкие ободы ($\kappa=0,5$); далее идет диск без отверстия ($\kappa=0,6$) и диск равной прочности ($\kappa=1$).

Следовательно, супермаховики всех трех типов — стержневые, постоянного, переменного сечения и ободковые, несмотря на различие форм, одинаковы по рациональности, т. е. накапливают одинаковые количества энергии на единицу веса при равных напряжениях.

Для прочностно-энергетического расчета маховиков упомянутых форм может служить диаграмма $v - \kappa$, построенная для стальных тел вращения (рис. 92).

По оси ординат отложена величина относительного коэффициента формы для стали $\kappa' = \kappa / \rho$ ($\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$), κ' имеет размерность в $\text{м}^4 / (\text{кН} \cdot \text{с}^2)$; по оси абсцисс — окружная скорость маховика v , м/с. Три шкалы A, B, C характеризуют напряжения в сотнях МН/м² соответственно для дисков постоянной толщины без отверстия, тонких ободов при $i \approx 1$ и дисков с малым центральным отверстием $i \approx 0$. Линии, соединяющие шкалы B и C, характеризуют промежуточные значения i ($0 < i < 1$). Семейство кривых в верхней части диаграммы отражает напряжения в дисках равной прочности, также в сотнях МН/м².

Расчет может проводиться в следующей последовательности. Из точки допускаемого значения окружной скорости, обычно лимитируемой при конструировании инерционных аккумуляторов, восстанавливается перпендикуляр. Точки пересечения его с линиями на диаграмме непосредственно дают значения максимальных напряжений в маховиках соответствующих форм. Ординаты этих точек указывают на значения κ' для этих форм. Произведение $\kappa' \sigma$ дает значение удельной энергоемкости e маховика этой формы. Та форма, для которой величина e будет максимальна, является оптимальной для данной окружной скорости.

Следует иметь в виду, что при скоростях до 100—150 м/с маховики можно эксплуатировать в воздушной среде атмосферного давления, при 150—250 м/с — в среде с пониженными вентиляционными потерями (водород, гелий, разреженный воздух), а при больших скоростях обязательно помещение в вакуум (форвакуум).

По приведенной диаграмме можно рассчитать и маховики, изготовленные из других материалов, причем напряжения в маховике будут во столько раз меньше, во сколько раз новый материал легче стали, а при равных напряжениях во столько же раз будет больше удельная энергоемкость.

По диаграмме можно проводить и другие расчеты, задаваясь, например, величинами допускаемых напряжений, формой и пр.

Пример 1. Требуется определить оптимальную форму маховика и массу для аккумуляции энергии $5 \cdot 10^5$ Дж. Даны два материала: сталь с допускаемыми напряжениями $12 \cdot 10^4$ Кн/м² (1200 кгс/см²) и 10^5 Кн/м² ($10\,000$ кгс/см²). Допускаемая окружная скорость 300 м/с.

Восстанавливаем перпендикуляр из точки, соответствующей значению $v=300$ м/с. Он пересекает шкалу B при $\sigma=7 \cdot 10^5$ Кн/м² и $\kappa'=0,063$, а шкалу A при $\sigma=2,5 \cdot 10^5$ Кн/м² и $\kappa'=0,0763$, линии дисков равной прочности при $\sigma=10^5$ Кн/м² и $\kappa'=0,11$; $\sigma=1,5 \cdot 10^5$ Кн/м² и $\kappa'=0,1$; $\sigma=2 \cdot 10^5$ Кн/м² и $\kappa'=0,08$. Первому материалу соответствует лишь одна форма — диск равной прочности при $\sigma=10^5$ Кн/м², $\kappa'=0,11$; все остальные требуют материала большей прочности. Удельная энергоемкость такого маховика $e=1,1 \cdot 10^4$ Дж/кг. Масса маховика 45 кг. Форму диска определяют подстановкой в формулу (35) $v=\omega r=300$ м/с и $\sigma=10^5$ Кн/м². Диаметр маховика и h_0 в центре выбирают конструктивно.

Второму материалу соответствуют все полученные формы, так как он достаточно прочен; максимальное же значение $e=\kappa'\sigma$ соответствует ободу (шкале B) при $\sigma=7 \cdot 10^5$ Кн/м², $\kappa'=0,063$ и $e=4,4 \cdot 10^4$ Дж/кг. Масса маховика 11,3 кг. Форма — тонкий обод.

Пример 2. Найти допускаемую окружную скорость для маховика в форме тонкого обода для двух материалов: стали и стеклопластика при равных допускаемых напряжениях $5 \cdot 10^5$ Кн/м². Определить массу маховика для накопления $5 \cdot 10^5$ Дж энергии.

Для определения параметров первого маховика опускаем перпендикуляр из точки, соответствующей значению $5 \cdot 10^5$ Кн/м² на шкале B и получаем примерно $v=270$ м/с. Удельная энергоемкость этого маховика находится без построений:

$$e=\kappa'\sigma=0,063 \cdot 5 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2, \text{ или } 3,15 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг. Масса маховика } 16 \text{ кг.}$$

Стеклопластик примерно в 3 раза легче стали и напряжениям $5 \cdot 10^5$ Кн/м² в стеклопластике соответствовали бы напряжения $15 \cdot 10^5$ Кн/м² для стали. Окружная скорость для таких напряжений по диаграмме примерно равна 420 м/с. Удельная энергоемкость втрое выше, чем у стального маховика — $9,5 \cdot 10^4$ Дж/кг. Масса маховика 5,4 кг.

Рекомендации к расчету, ленточных супермаховиков. Здесь сразу же надо заметить, что расчет супермаховиков, навитых из ленты, а тем более волокна, очень сложен и элементарными методами его произвести нельзя. Можно лишь дать рекомендации к их расчету; например, обод, навитый из ленты на центр без натяжения со склейкой витков одного с другим, нужно рассчитывать как серию концентрических колец, вставленных одно в другое с зазором для клея. При этом необходимо вычислить упругие деформации колец как по диаметру, так и по толщине

при вращении и найти зазоры между ними. Затем, найдя максимальный межвитковый зазор, возникающий при вращении, определить минимальную толщину слоя клея исходя из того, чтобы он не разрушился при возникновении этого зазора. Производится расчет обычными методами сопротивления материалов.

Есть также супермаховики, где лента навивается на центр с натягом теоретически без склейки, и за счет этого натяга обеспечивается плотная посадка витков одного на другой. Здесь натяг зависит от многих факторов, в том числе от конфигурации центра и может быть для равнопрочного центра приближенно определен как половинный от натяга обычного обода — кольца при максимальной частоте вращения. Кольцо это, разумеется, должно быть в точности равным по сечению отдельной ленте.

Последний виток ленты может крепиться на ободке склейкой возможно более прочным клеем, например, БФ-2, БФ-4 или циан-акриловым, причем поверх последнего витка ленты желательна навивка одного-двух слоев весьма прочной тонкой проволоки, превосходящей по прочности саму ленту. Проволока может быть навита также со склейкой, причем начало и конец ее закрепляются на щеках центра, как на катушке. Эта армировка проволокой повышает надежность крепления последнего витка ленты. Вращение такого маховика обязательно должно быть в направлении навивки ленты. Центр желательно изготовлять из легкого материала с малым модулем упругости, например дюрала.

Избежать расслоения ленты можно и другим способом, подкладывая под часть внутренних витков, или под весь обод балласт — массивные, например свинцовые, подкладки в виде секторов, лент или пластмассовое кольцо, насыщенное свинцовым порошком. При вращении маховика балласт под действием центробежных сил прижимает внутренние витки к внешним, препятствуя расслоению обода.

Несмотря на невысокий коэффициент формы k ленточного маховика (находящийся между значениями k для тонкого обода и диска с малым отверстием), этот маховик выигрывает благодаря высокой прочности ленты по сравнению с монолитными материалами, а также снижению коэффициента запаса прочности. Этот коэффициент, принимаемый для монолитных маховиков ввиду большой опасности их разрыва достаточно высоким, около 3—3,5, может быть снижен для «безопасных» ленточных маховиков до 1,5 и даже ниже.

Вследствие повышения прочности и снижения коэффициента запаса ленточные маховики выигрывают в удельной энергоемкости по сравнению с монолитными из того же материала почти на порядок¹.

¹ Расчет ленточных маховиков разработан лабораторией общей динамики машин Государственного института машиноведения (автор канд. техн. наук М. Ю. Очан) и изложен в отчетах этой лаборатории.

Итак, зная, как рассчитывается маховик на прочность, мы можем гарантировать, что он не разорвется или на крайний случай разорвется безопасно. Но бывают, к сожалению, случаи, когда даже очень прочный, но неотбалансированный маховик разбивает или срывает свои опоры и причиняет массу хлопот. Чтобы этого не случилось, надо знать...

КАК ОТБАЛАНСИРОВАТЬ МАХОВИК?

Наличие тяжелого быстровертающегося маховика в инерционном аккумуляторе требует проведения тщательной балансировки, так как в случае неуравновешенности маховика могут наступить опасные вибрации. Несмотря на то, что в некоторых конструкциях инерционных аккумуляторов (например, конструкции А. Г. Уфимцева) предусмотрены гибкие опоры, даже здесь неуравновешенность нежелательна, поскольку она приводит к дополнительным потерям энергии и может вызвать резонансные явления.

Рассмотрим равномерное вращение с угловой скоростью ω твердого тела вокруг какой-нибудь оси. Центробежная сила инерции массы m этого тела, как известно, равна

$$F_{ц} = m\omega^2 r, \quad (43)$$

где r — расстояние от оси вращения до центра массы тела.

Для реальных частот вращения маховиков инерционных аккумуляторов даже сравнительно малая неуравновешенность может вызвать большую центробежную силу. Например, для массы 100 г, расположенной на расстоянии 0,5 м от оси вращения, центробежная сила при 5000 об/мин составляет около 15 кН, 10 000 об/мин — около 60 кН, 20 000 об/мин — около 240 кН. Отсюда видно, как тщательно должны быть отбалансированы маховики инерционных аккумуляторов, вращающиеся с весьма высокой скоростью, для того чтобы не могли возникнуть опасные по величине центробежные силы.

В процессе изготовления маховика вследствие неизбежных технологических погрешностей, неоднородности материала это условие нарушается, и маховик приобретает неуравновешенность.

Неуравновешенность бывает трех видов: статическая, динамическая и комбинированная. В случае статической неуравновешенности все неуравновешенные массы можно заменить одной приведенной массой m , центр которой смещен относительно



оси вращения на расстояние q (рис. 93, а). При вращении неуравновешенного маховика центробежная сила приведенной массы, постоянная по абсолютной величине и переменная по направлению, действует на опоры маховика, вызывая их колебания. Статическую неуравновешенность можно обнаружить без сообщения маховику вращательного движения. Она характерна для таких деталей, размер которых вдоль оси вращения мал по сравнению с поперечными размерами, например, дисков и др.

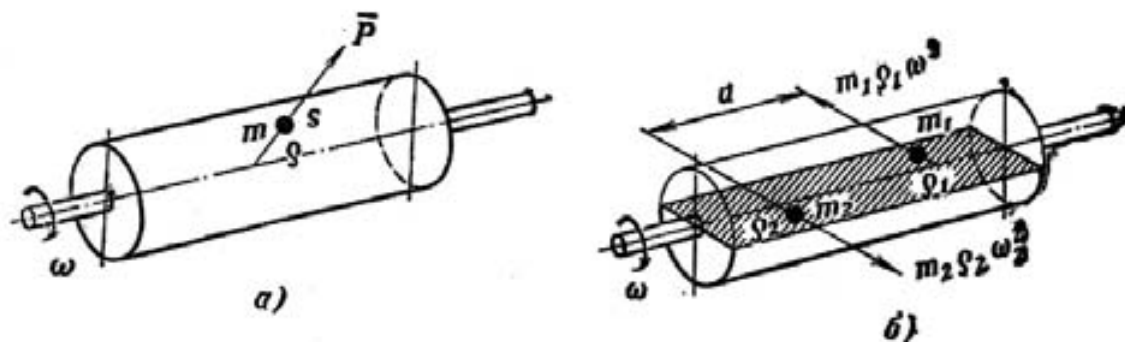


Рис. 93. Виды неуравновешенности маховиков

В случае динамической неуравновешенности неуравновешенные массы можно привести к двум массам, лежащим в одной диаметральной плоскости. Статические моменты этих масс относительно оси вращения в случае чистой динамической неуравновешенности равны между собой (рис. 93, б).

При вращении маховика центробежные силы этих приведенных масс образуют пару, момент которой, постоянный по абсолютной величине, непрерывно меняет свое направление. Эта пара сил также действует на подшипники, вызывая их колебания. В соответствии с обозначениями на рис. 93, б момент этой пары

$$M = m_1 q_1 a \omega^2. \quad (44)$$

Как видно из приведенного, момент пары увеличивается с ростом угловой скорости и становится равным 0 при $\omega = 0$. Вследствие этого динамическую неуравновешенность можно обнаружить только при вращении детали. В чистом виде динамическая неуравновешенность маловероятна.

Одновременное наличие статической и динамической неуравновешенности создает так называемую комбинированную (смешанную) неуравновешенность. Центробежные силы неуравновешенных масс приводятся в этом случае к силе P и паре $(F_1 F_2)$, причем сила и пара не находятся в одной плоскости (рис. 94). Такая неуравновешенность чаще всего встречается на практике. Систему, состоящую из силы и пары, можно привести к двум скрещивающимся силам, расположенным в произвольных плоскостях, перпендикулярных к оси вращения тела. Разложим силу P на две параллельные ей P_1 и P_2 , лежащие в произвольно выб-

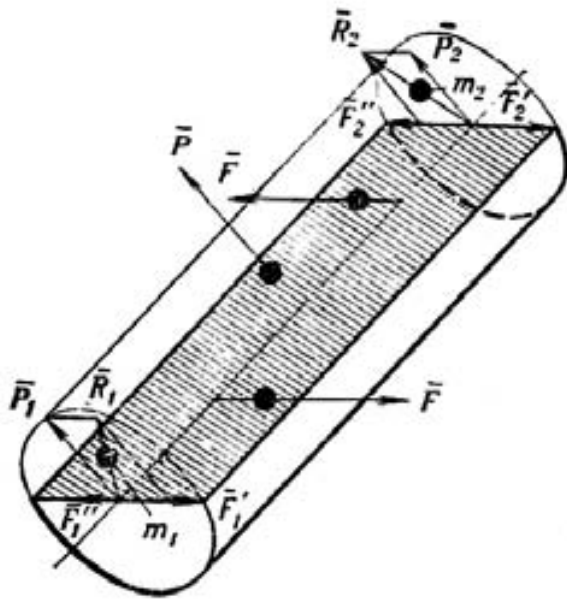


Рис. 94. Комбинированная неуравновешенность маховиков

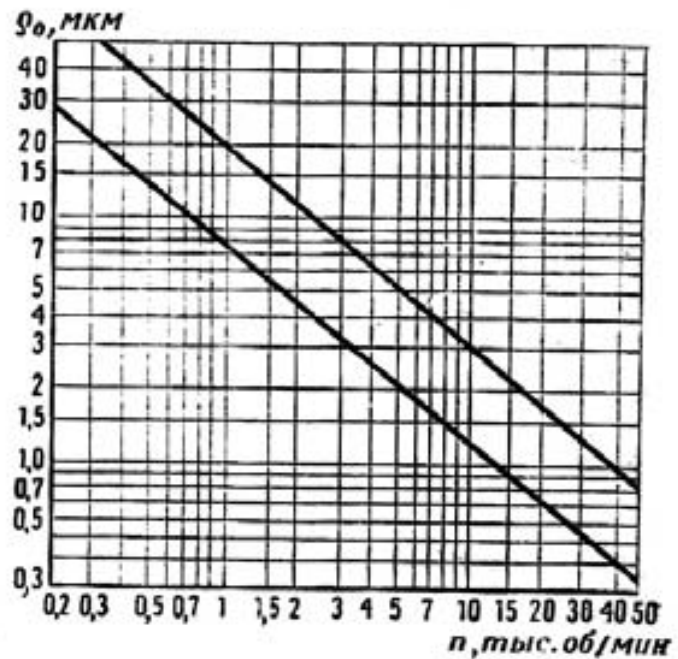


Рис. 95. График для определения допускаемого смещения центра тяжести маховика в зависимости от угловой скорости

ранных плоскостях. Разложим также каждую из сил пары на составляющие $F_1' F_2'$ и $F_1'' F_2''$. В результате мы получим в первой из выбранных плоскостей сходящуюся систему сил $P_1 F_1' F_1''$, а в другой плоскости — систему $P_2 F_2' F_2''$. Заменяв каждую систему сил одной равнодействующей, получим две силы R_1 и R_2 , лежащие в тех же плоскостях. Следовательно, при комбинированной неуравновешенности все неуравновешенные массы можно заменить двумя массами m_1 и m_2 , лежащими в произвольно выбранных плоскостях.

Смешанная неуравновешенность характерна для таких деталей, размеры которых вдоль оси вращения достаточно велики.

Для устранения неуравновешенности либо подбираются дополнительные массы (уравновешивающие грузы), либо, наоборот, снимается часть массы уравновешиваемой детали. Это устранение неуравновешенности детали называется балансировкой статической или динамической, в зависимости от того, какой вид неуравновешенности устраняется.

Современные высокоскоростные маховики обычно имеют дискообразную форму с диаметром, значительно превышающим их толщину. Из опыта уравновешивания известно, что при отношении толщины детали к ее диаметру D менее 0,2 динамической неуравновешенностью можно пренебречь и проводить только статическую балансировку. Однако точность статического уравновешивания не всегда оказывается достаточной, и тогда применяется динамическое, обеспечивающее более высокую точность уравновешивания.

Центробежную силу, вызываемую неуравновешенностью, обычно определяют по выражению

$$P < KG,$$

где K — коэффициент, выбираемый в результате анализа условий работы; G — масса тела.

Рекомендации различных авторов по выбору коэффициента K весьма разноречивы, причем значение его колеблется от 0,01 до 0,5. Такое расхождение объясняется тем, что каждый из авторов учитывал специфические условия работы отдельных машин. При этом, чем массивнее вращающийся ротор по сравнению с машиной, тем большую точность уравнивания необходимо обеспечить, поскольку массивный ротор воздействует не только на несущие подшипники, но и на всю машину или узел, вызывая их вибрацию.

На рис. 95 дан ориентировочный график для определения среднего допускаемого смещения центра тяжести q_0 в зависимости от частоты вращения. При этом для более легких маховиков в тяжелых, грубых механизмах можно принимать верхний предел, а для массивных маховиков легковесных точных машин — нижний предел. Уточнение допуска на неуравновешенность должно производиться путем исследования машины в рабочем состоянии, измерения вибраций и сопоставления их с допускаемыми по ГОСТу. Например, согласно ГОСТ 5908—51 установлены следующие предельные нормы амплитуды вибраций в зависимости от частоты вращения: 1500 об/мин — 60 мкм, 3000 об/мин — 40 мкм, 5000 об/мин — 30 мкм.

ТАБЛИЦА 6

Приспособления	Точность для деталей, мкм		
	тяжелых (до 10 т)	средних (до 1500 кг)	легких (до 250 кг)
Параллельный стенд	80	30	10
Роликовые	80	50	30
Качающиеся роликовые	—	25	15
Дисковые	—	25	15
Однодисковые	—	20	10
Балансировочные весы	—	10	5
Специальные	—	10	5

В табл. 6 приведены значения точности уравнивания на приспособлениях для статического балансирования.

Ниже даны значения точности уравнивания (в мкм) на приспособлениях для динамического балансирования:

Станки на качающейся опоре	20—30
Опоры со спиральными пружинами	7—12
Свободно лежащая балка	3—10
Маятниковая подвеска	3—10

Станки рамной конструкции	3—10
Стробоскопические устройства и станки	8—6
Маятниковые станки	3—6
Маятниковая опора	2—4
Электронные станки	0,4—1

На чертежах в технических условиях допуск на неуровненность обычно определяется моментом $M=q_0G$.

Исходя из этих данных, можно подобрать приспособление для балансировки маховика.

Анализ приспособлений для статической балансировки показывает следующее. Параллельные стенды наряду с простотой имеют достаточно высокую точность. Им следует отдавать предпочтение в тех случаях, когда обе шейки вала имеют одинаковые диаметры и выполнены достаточно точно. Роликовые приспособления можно рекомендовать для тяжелых деталей. Их точность в данном случае такая же, как и у параллельных стендов, но они более удобны, поскольку не требуют тщательной выверки и легко переносятся к месту работы. Преимуществами дисковых приспособлений являются большая точность уравнивания, удобство применения, простота конструкции. Балансировочные весы — наиболее точные приспособления. Агрегатированные со станками для корректирования дебаланса они весьма производительны и могут использоваться в крупносерийном производстве.

Анализ станков для динамической балансировки свидетельствует, что их точность в основном не намного превосходит точность совершенных статических устройств. При этом они сложнее последних и обслуживание их затруднительно. Следовательно, если допускается допустимая точность балансирования, целесообразнее применять статические устройства. Исключение составляют случаи, когда обязательно требуется динамическая балансировка:

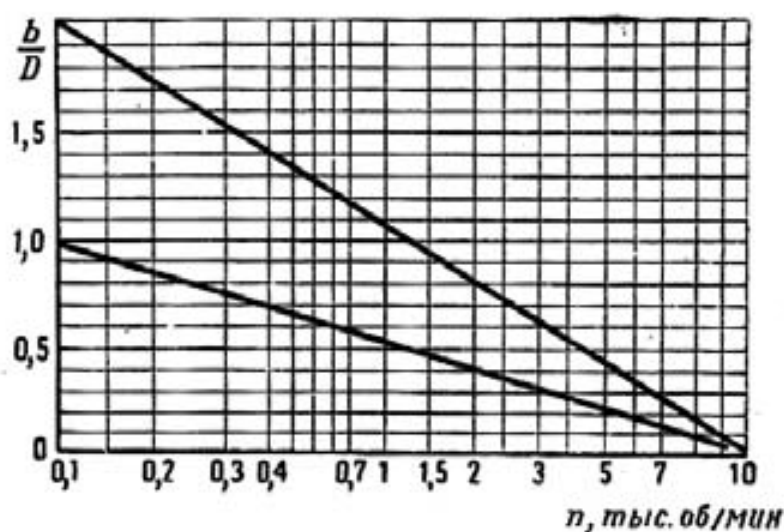
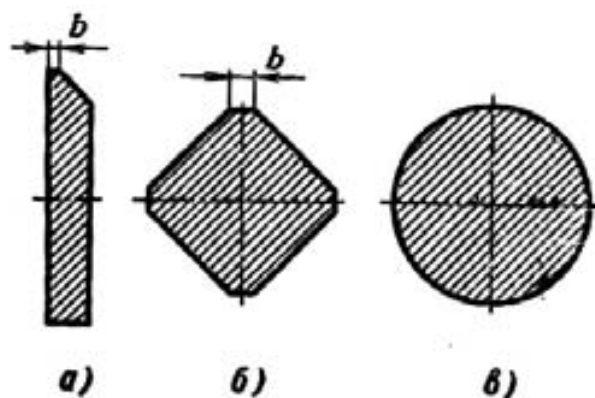


Рис. 96. Области применения статической балансировки

Рис. 97. Профили сечения направляющих в параллельных стендах:

а—плоский нож; б—призматическая направляющая; в—круглая направляющая



1) большая толщина маховика вызывает динамическую неуравновешенность; на графике (рис. 96) приведены прямые, ограничивающие область применения статического балансирования в зависимости от отношения $\frac{b}{D}$ и частоты вращения детали n ; верхний и нижний пределы определяют аналогично рис. 95; маховики с высоким отношением $\frac{b}{D}$ в основном низкоскоростные и вращаются в воздушной среде;

2) требуется высокая точность балансировки; в этом случае целесообразнее всего использовать наиболее совершенные устройства для динамической балансировки, так как точность остальных близка к точности статических устройств;

3) балансировку нужно осуществлять на самой машине; такая необходимость часто возникает в результате износа ротора, замены отдельных его элементов при ремонте, остаточных деформаций и других причин; в таких случаях динамическую балансировку следует проводить с помощью особых приборов.

Ниже рассмотрены основные устройства для статической и динамической балансировки применительно к маховикам инерционных аккумуляторов.

Параллельные стенды. Как отмечено выше, это наиболее простые приспособления для статической балансировки. Параллельные стенды представляют собой две горизонтальные направляющие, закрепленные на основании. Профили сечения направляющих, наиболее часто встречающиеся на практике, показаны на рис. 97: а — плоский нож, имеющий на верхней части шлифованную полосу, по которой перекатываются валы детали; б — призматическая направляющая со срезанными углами, причем ширина образующихся при срезе полос различна, что дает возможность использовать направляющую для балансировки деталей разного веса, в зависимости от которого и устанавливается ширина полосы; в — направляющая круглого сечения.

Направляющие на рис. 97, а довольно просты, жестки. Основным их недостатком является постоянная ширина полосы, что ограничивает диапазон массы балансируемых деталей.

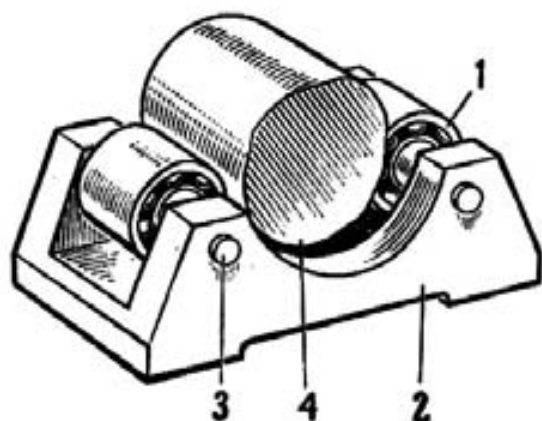


Рис. 98. Несущий элемент роликового стенда:

1—ролики; 2—станина; 3—оси роликов; 4—ось маховика

Направляющие на рис. 97, б более универсальны, но имеют меньшую жесткость, чем первые. Они применяются для балансирования деталей небольшого веса.

Ширина полосы, по которой происходит перекачивание, зависит от массы детали. На практике обычно придерживаются следующей зависимости: для деталей массой до 3 кг ширина полосы 0,3 мм, 30 кг — 3,0 мм, 300 кг — 10 мм, 2000 кг — 30,0 мм.

Направляющие круглого сечения (см. рис. 97, в) применяют в основном для деталей массой не более 40—50 кг. При диаметре направляющих 50—60 мм закаленные шейки валов деталей почти не повреждаются. Круглые направляющие легко обрабатываются; при повреждении их поверхности они могут быть по-

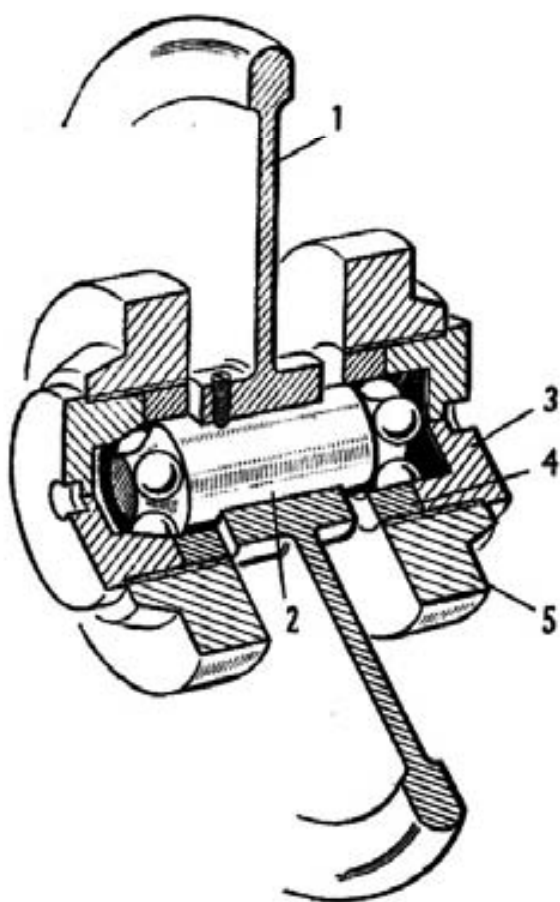


Рис. 99. Несущее звено дискового стенда:

1—диск; 2—ось; 3 и 4—поджимные втулки; 5—обойма

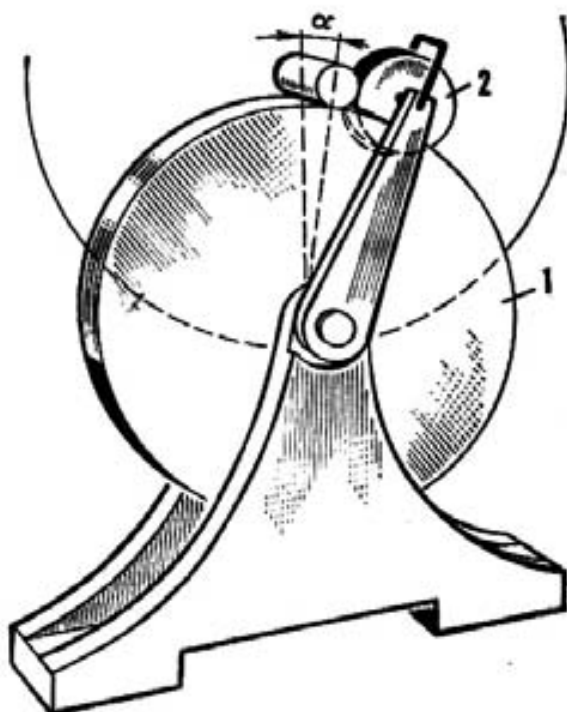
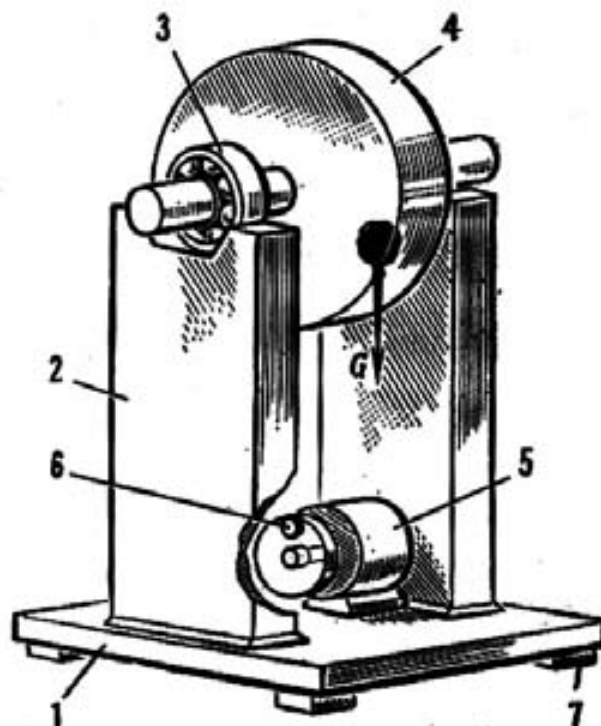


Рис. 100. Приспособление с разными дисками:

1—большой (несущий) диск; 2—малый (фиксирующий) диск

Рис. 101. Вибростенд:

1—основание; 2—стойки; 3—подшипники; 4—маховик; 5—электромотор; 6—неуравновешенная масса; 7—амортизаторы



вернуты на небольшой угол, и поврежденные места исключаются из зоны контакта.

Параллельные стелды не-применимы в случае разных диаметров валов балансируемых деталей. Даже при одинаковом номинальном диаметре этих валов возможно значительное понижение точности балансировки из-за большого допуска на диаметр. В этих случаях можно использовать роликовые и дисковые приспособления.

Роликовые и дисковые приспособления. По существу эти приспособления отличаются одно от другого лишь разным отношением внешнего диаметра к диаметру окружности качения шариков в подшипнике. Дисковые приспособления более точны, так как вследствие большого внешнего диаметра и малого диаметра подшипника усилия перекачивания незначительны.

Несущий элемент роликового приспособления (рис. 98) состоит из шарикоподшипников 1, установленных на основании 2 с помощью осей 3. Вал 4 балансируемой детали помещен между подшипниками.

Точность балансировки на роликовых приспособлениях ниже, чем на параллельных стелдах.

Несущее звено дискового приспособления (рис. 99) состоит из диска 1, укрепленного на оси 2, имеющей кольцевые канавки для качения шариков. Наружное кольцо подшипника с помощью поджимных втулок 3 и 4, ввинчивающихся в обойму 5, позволяет точно отрегулировать зазор в подшипнике с целью получения минимального сопротивления.

Наиболее точны дисковые приспособления, в которых основная нагрузка от массы детали воспринимается одним диском 1 большого диаметра (рис. 100), а второй диск 2 меньшего диаметра лишь поддерживает вал детали, предохраняя его от ска-тывания.

Дисковые приспособления применяют преимущественно для деталей массой до 100 кг.

Вибростенд. Очень часто приходится производить балансирование маховиков непосредственно в своих шарикоподшипниках.

В этом случае целесообразно применение устройства с принудительной вибрацией, дающее очень хорошие результаты. Точность уравнивания здесь соизмерима с точностью балансировочных весов. При этом устройство значительно проще и позволяет уравнивание деталей, изготовленных заодно с валом.

Приспособление (рис. 101) состоит из основания 1 со стойками 2, на которые устанавливают деталь с надетыми на ее ось подшипниками 3. Смазку, особенно густую, целесообразно

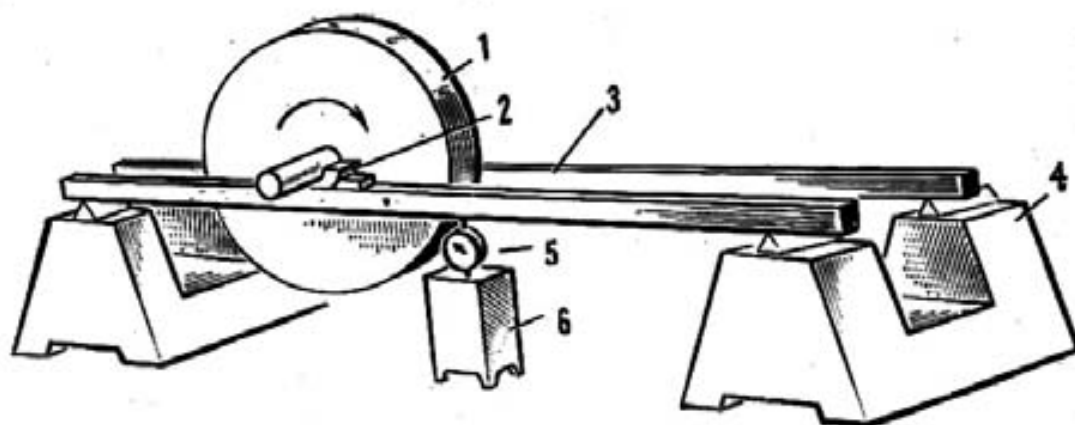


Рис. 102. Стенд для динамического балансирования:

1—маховик; 2—подшипник; 3—упругая балка; 4—опора; 5—индикатор; 6—стойка индикатора

с подшипников снять. Стенд подвергается принудительной вибрации с помощью электромотора 5, имеющего на валу неуравновешенную массу 6. Под основание целесообразно подложить резиновые амортизаторы 7.

Под действием вибрации деталь 4 давит на подшипник с переменной силой. При ускорениях вибрации, близких к g , момент трения в подшипниках в отдельные мгновения может стать весьма малым.

Для статической балансировки маховиков описанный метод наиболее удобен и дает вполне удовлетворительные результаты.

Простые приспособления для динамической балансировки. Во многих случаях необходимо динамическое балансирование маховиков. Особенно сильная динамическая неуравновешенность может возникнуть в составных маховиках, которые после сборки уже не проходят механической обработки.

Наиболее простым и доступным способом динамической балансировки в условиях экспериментального производства является уравнивание с использованием в качестве упругих элементов балок нормального сечения (рис. 102) — двутавров, швеллеров, полос и др.

Деталь 1, подлежащая уравниванию, устанавливается в подшипниках 2 на двух балках 3, лежащих на опорах 4. Затем

деталь тем или иным способом раскручивается до угловой скорости, незначительно превышающей круговую частоту собственных колебаний устройства. По мере сбавления оборотов колебания балки увеличиваются, достигая резонансных значений. Амплитуда резонансных колебаний измеряется индикатором 5.

Частоту собственных колебаний балки с деталью можно примерно определить путем сообщения устройству легкого толчка. Число оборотов в секунду разогнанной детали должно несколько превышать частоту колебаний балки, которую целесообразно выбирать около 5 Гц для средних деталей и меньшую для тяжелых.

Зафиксировав одну из балок, например, с помощью подкладок или винтового домкрата, замеряют амплитуду колебаний второй балки. Разделив торец балансируемой детали на 6—8 частей и пронумеровав их, устанавливают поочередно на каждом делении пробный груз и измеряют амплитуду резонансных колебаний при каждой установке пробного груза. Массу пробного груза G_n рекомендуется приблизительно выбирать по формуле

$$G_n = \frac{GA}{4R}, \quad (45)$$

где G — масса детали, кг; R — радиус установки пробных грузов, мм; A — амплитуда зарезонансных колебаний балки при угловой скорости детали, вдвое превышающей резонансную.

Определив такие точки установки пробного груза, которым соответствуют минимальное и максимальное значения колебаний, определяют массу уравнивающего груза G_y по формуле

$$G_y = 2G_n \frac{A_1}{A_{\max} - A_{\min}}, \quad (46)$$

где A_1 — амплитуда колебаний балки до установки пробного груза; A_{\max} и A_{\min} — соответственно амплитуды максимальных и минимальных колебаний балки с пробными грузами.

Если при установке уравнивающего груза не достигается значительное уменьшение колебаний, то массу уравнивающего груза и радиус его установки уточняют опытным путем. Аналогично поступают при уравнивании другого торца детали.

Грузы при небольшой частоте вращения детали целесообразно изготавливать из пластилина.

Детали приводят во вращение с помощью различных фрикционных устройств либо кулачковых муфт.

Уравнивание шарами. На рис. 103 дана схема уравнивания с помощью шаров. При вращении детали с угловой скоростью, значительно превышающей резонансную, и при закреплении ее в точке O центр второго торца будет вращаться вокруг оси, проходящей через неподвижную точку O и центр

массы детали с приспособлением. Геометрический центр цилиндра 1, насаженного на свободный торец детали, будет вращаться также вокруг этой оси. Шары 2 под действием центробежной силы будут стремиться занять устойчивое положение, наиболее удаленное от центра вращения. Однако это положение вновь вызовет неуравновешенность, правда, в другом направлении. В результате быстро затухающих колебаний шары примут положение, соответствующее уравновешенности детали.

Головка с шарами для балансирования показана на рис. 104. На торец детали 1 с помощью конусной разрезной втулки и гайки 2 насаживается корпус головки 4, в котором шары 5 (как правило, два или три) фиксируются конусом 6 под давлением пружины 3. Штифт 7 предохраняет конус от углового смещения относительно корпуса. Кнопка 8 служит для освобождения шаров при уравнивании. По окончании процесса уравнивания кнопка отпускается, и положение шаров фиксируется.

Уравнивание с помощью шаровой головки производится автоматически: его особенно целесообразно применять в тех случаях, когда необходимо время от времени исправлять балансировку, причем головку можно вмонтировать непосредственно в деталь. При съемке же головки и определении уравнивающих грузов можно допустить ошибку; кроме того, необходимо проведение корректировки грузов с помощью двух дополнительных пусков станка.

Балансировка маховика в самой машине. Часто возникает необходимость динамической балансировки маховика в самой машине при угловой скорости, соответствующей рабочему режиму. Это происходит в основном в результате нарушения уравновешенности при температурных деформациях, смещении отдельных элементов механизма в реальных условиях, а также вследствие неравномерного износа или проведения текущего ремонта.

Динамическая балансировка в машинах существенно отличается от этой же операции на специальных устройствах. При балансировке в реальной машине с опорами неопределенной жесткости плоскость и ось колебания маховика также неопределенны.

Методы динамической балансировки в машине основаны на подборе уравнивающих грузов в каждой плоскости раздельно — так, как это делается на балансировочных машинах. Однако часто взаимное влияние опор таково, что эти методы не

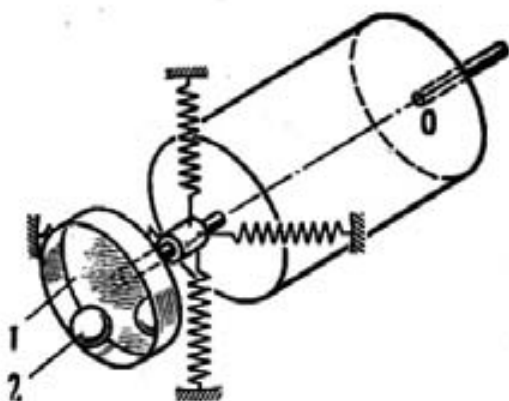


Рис. 103. Схема уравнивания шарами:

1—шаровая головка; 2—шары

дают желаемых результатов сразу и требуют ряда повторных испытаний.

Методы балансировки зависят от применяемой аппаратуры, из которой наиболее совершенными являются балансировочные аппараты, позволяющие определять амплитуды и фазы колебаний для обеих опор. Наиболее употребительным балансировочным прибором является резонансно-стробоскопический прибор Н. В. Колесника (виброскоп).

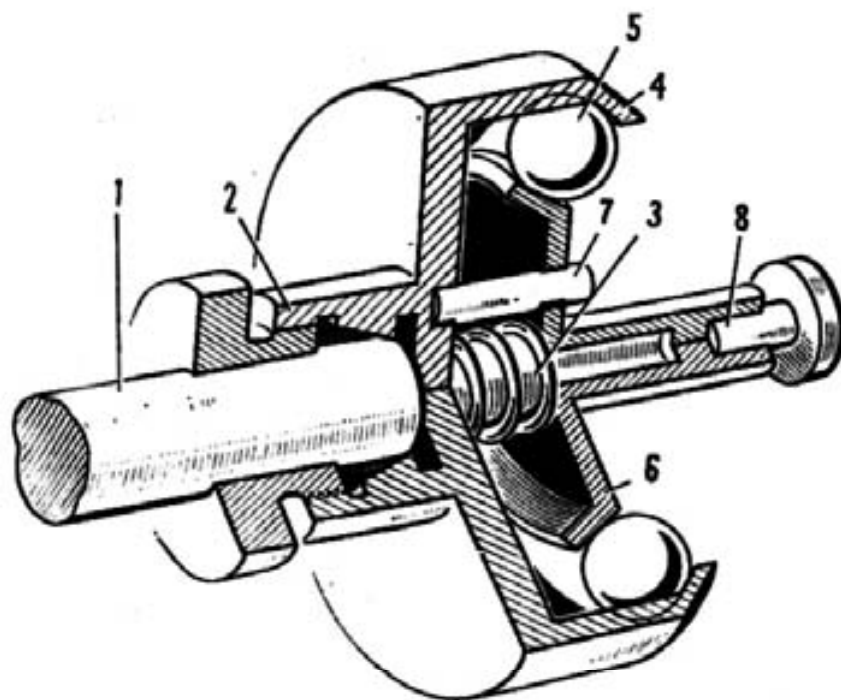


Рис. 104. Балансировочная головка с шарами:

1—деталь (маховик); 2—гайка; 3—пружина; 4—корпус головки; 5—шары; 6—конус; 7—штифт; 8—кнопка

Схема прибора дана на рис. 105, а. Чувствительная часть его представляет собой плоскую пружину 5, нижним концом закрепленную в корпусе прибора и несущую на верхнем конце небольшой грузик в виде пластинчатого указателя, окрашенного белой краской. Вращением маховичка 4 гайка 7 перемещается, изменяя собственную частоту пружины 5 с грузиком и настраивая ее на резонанс. Колебания передаются пружине через заделку. Амплитуда резонансных колебаний пружины определяется по веерообразной тени на шкале 3. В пределах линейных колебаний можно считать, что амплитуда, измеренная виброскопом, пропорциональна амплитуде колебания опор. Частота настройки устанавливается по вертикальной шкале 6. Подвижной контакт 2 служит для определения фазы колебаний. Угол контакта устанавливается поворотом маховичка 1.

Измерение фазы колебаний пояснено на схеме рис. 105, б. Резонансные колебания пружины 1 ограничиваются установкой

контакта 2. Соприкосновение контакта с пружиной вызывает вспышку безынерционной газосветной лампы. Так как колебания происходят синхронно с вращением вала уравниваемой детали, то частота вспышек равна числу оборотов вала в секунду.

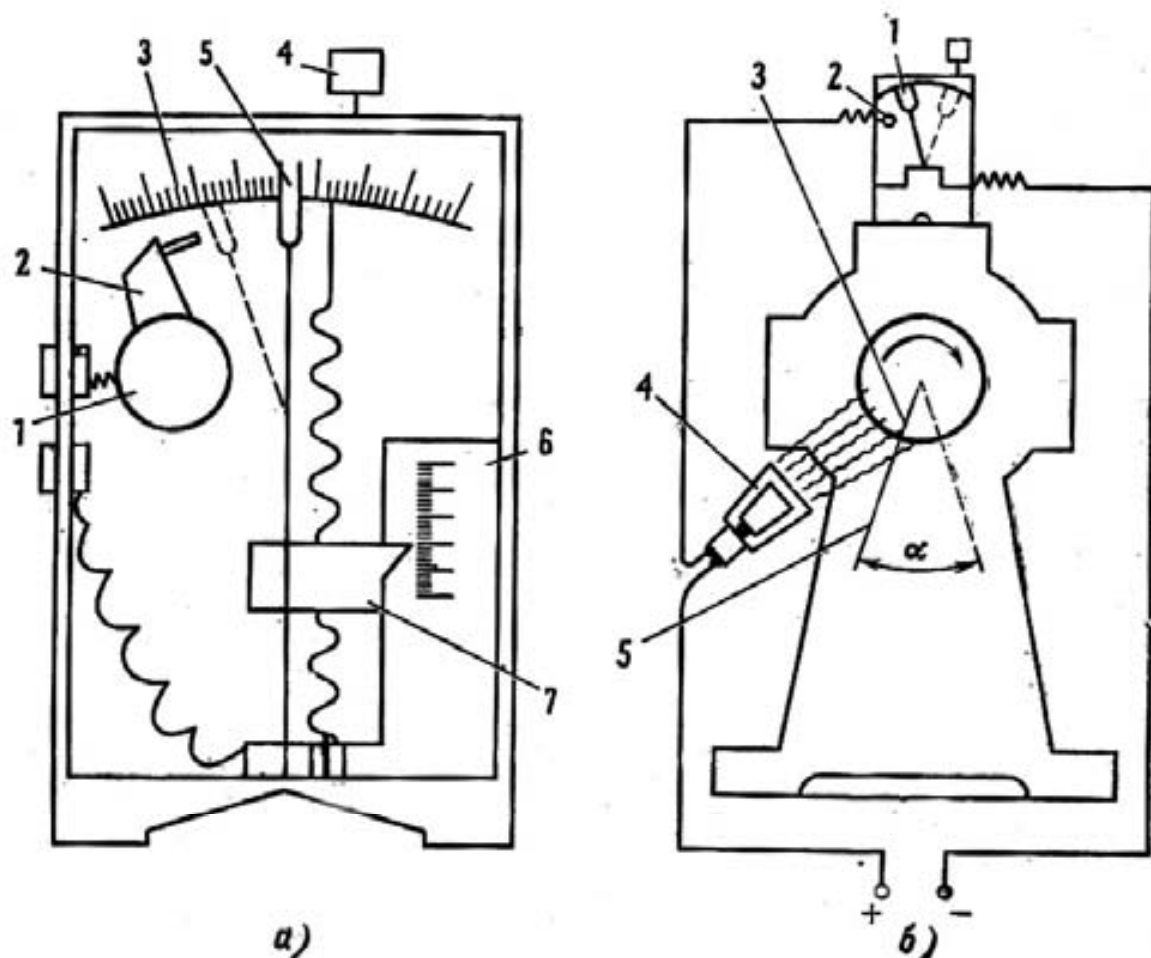


Рис. 105. Виброскоп Н. В. Колесника:

а—схема прибора (1 и 4—маховички; 2—контакт; 3—шкала; 5—пружина; 6—вертикальная шкала; 7—гайка); б—схема, поясняющая измерение фазы колебаний (1—пружина; 2—контакт; 3—риска; 4—стробоскопическая лампа; 5—черта ориентира)

Если на торце вала нанести ориентир, например, радиальную риску 3, то, освещая торец вспыхивающей лампой 4, можно зафиксировать стробоскопическое изображение ориентира чертой 5, определяющей собой положения фазы. При изменении фазы меняется и положение ориентира на некоторый угол α , характеризующий происшедший сдвиг фазы колебаний.

Для подбора пробного груза при балансировке в машине автор прибора Н. В. Колесник рекомендует подбирать его массу так, чтобы центробежная сила груза не превышала 10—20% статической нагрузки на подшипник. В случае колебаний опор на режиме, близком к резонансному, масса груза может быть уменьшена.

Быстровращающиеся маховики подвержены действию гироскопического эффекта. Этот эффект может играть как положительную роль, способствуя стабилизации положения машины, так и вредную, вызывая дополнительные нагрузки на несущие подшипники и конструкцию в целом. В связи с этим при конструировании маховичных двигателей для движущихся агрегатов на гироскопические воздействия должно быть обращено самое серьезное внимание. Итак...

ЧТО ТАКОЕ «ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ»?

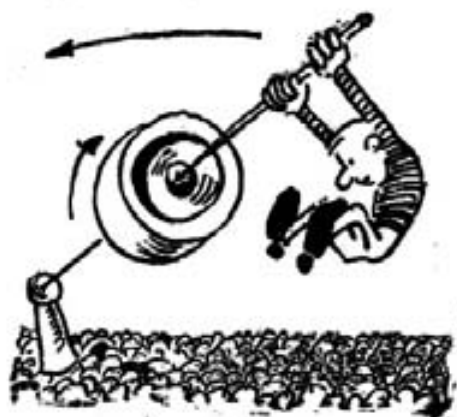
Действие гироскопического эффекта обычно связывают с устойчивостью вращающегося волчка. Удивительная устойчивость, сообщаемая волчку быстрым вращением, уже давно привлекала внимание пытливых умов. Еще около 200 лет тому назад в английском флоте была сделана попытка использовать это свойство быстро вращающегося волчка для создания на корабле устойчивого «искусственного горизонта», могущего заменить в туманную погоду нужный мореплавателю для астрономических наблюдений видимый горизонт.

В настоящее время гироскопические приборы приобретают все большее значение в различных областях техники. Военная и военно-морская техника оснащена целым рядом приборов, основанных на принципе гироскопа. Особенно широкое применение получил гироскоп в авиации.

В чем же причина удивительного поведения быстро вращающегося волчка? Чем объясняются вообще те замечательные явления, которые наблюдаются при быстром вращении тел и которые мы объединяем под названием гироскопических явлений.

Рассмотрим маховик, быстро вращающийся вокруг оси z' (рис. 106). Предположим, что вся масса маховика сосредоточена в его ободе на окружности радиуса R , на которой она распределена равномерно. Вращение вокруг оси z' принято называть собственным вращением гироскопа, а скорость этого вращения ω — собственной угловой скоростью. Вращение вокруг каждой из двух других осей называют прецессией, а скорость этого вращения — угловой скоростью прецессии.

Если маховик прецессирует относительно оси x' с постоянной угловой скоростью ω рад/с, то линейная скорость материальной частицы обода, находящейся в данный момент на оси $+x'$, не имеет составляющей, параллельной оси z' . Через четверть обода данная частица пересечет ось $+y'$. В этот момент составляющая ее ско-



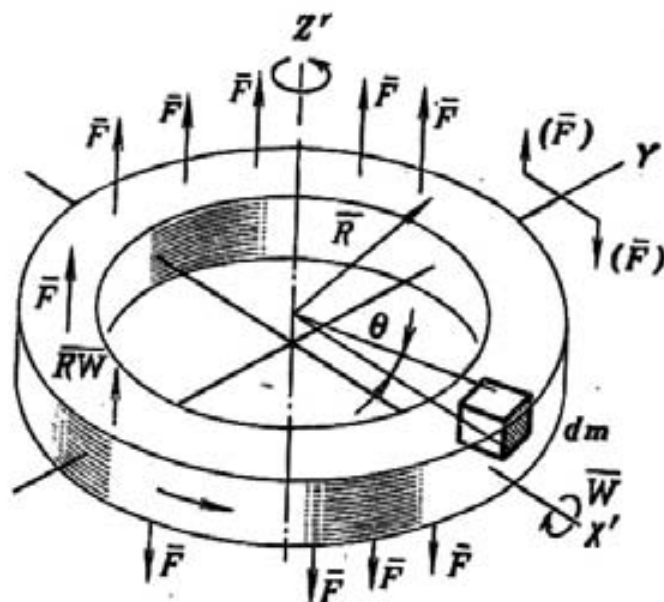


Рис. 106. Схема сил, вызывающих прецессию

рости, параллельная оси z' и обусловленная прецессией, будет равна $-R\omega$. Когда та же частица будет пересекать ось $-x'$, составляющая ее линейной скорости, обусловленная прецессией, снова обратится в ноль. Затем, когда частица достигнет оси $-y'$, эта составляющая возрастет в противоположном направлении до

$+R\omega$. За следующую четверть оборота она будет уменьшаться и в момент завершения цикла, т. е. когда частица достигнет оси $+x'$, снова станет равной нулю. Для создания ускорений, которые вызовут эти изменения скорости, на обод маховика должны действовать силы, параллельные оси z' .

Таким образом, во время прецессии относительно оси x' , совершающейся по часовой стрелке, если смотреть со стороны $+x'$, количество движения каждой материальной частицы обода при изменении ее полярного угла θ от -90° до $+90^\circ$ (при движении частицы в направлении $+\theta$ через 0) изменяется в направлении, которое совпадает с отрицательным направлением оси z' . При изменении угла θ от $+90^\circ$ до -90° (в направлении $+\theta$ через 180°) количество движения изменяется в направлении, совпадающем с положительным направлением оси z' . Для таких изменений количества движения необходимы силы, эквивалентные моменту, действующему относительно оси z' . Так как положительный момент приводит к прецессионному движению, его называют прецессионным или гироскопическим моментом. Величину этого момента можно определить следующим образом.

Каждой материальной частице массы маховика dm_1 с полярным углом θ соответствует другая частица равной массы dm_2 с полярным углом $\theta+90^\circ$. Момент dL_{12} , необходимый для создания движения этой пары частиц (dm_1 и dm_2) с требуемым ускорением, определим по формуле

$$dL_{12} = 2R^2\omega\omega (dm_1 \cos^2 \theta + dm_2 \sin^2 \theta) = 2R^2\omega\omega dm.$$

Так как вся масса M маховика складывается из массы указанных спаренных частиц, то полный прецессионный момент

$$L = R^2\omega\omega M. \quad (47)$$

Это уравнение выражает основной закон прецессии.

Гироскоп в карданном подвесе. Рассмотрим гироскоп в карданном подвесе (рис. 107). Воспользуемся основным законом прецессии, чтоб выяснить, как будет прецессировать такой гироскоп при действии на него внешнего момента. На рис. 107 ось z совпадает с осью собственного вращения маховика (ротора гироскопа), ось x — с осью вращения внутренней рамки подвеса и ось y — с осью вращения наружной рамки подвеса.

Внешний момент, действующий относительно оси вращения какой-либо из рамок карданова подвеса (наружной или внутренней), не может изменить скорость собственного вращения гироскопа, а следовательно, и величину H или кинетический момент маховика, равный $MR^2\omega$. Однако такой момент вызывает прецессию гироскопа относительно оси вращения другой рамки карданова подвеса. Скорость прецессии ϖ по величине равна внешнему моменту L , деленному на кинетический момент H , т. е.

$$\varpi = \frac{L}{H}. \quad (48)$$

Заметим, однако, что эта формула справедлива лишь в том случае, если векторы H , L и ось прецессии взаимно перпендикулярны.

Рассмотрим, что произойдет с гироскопом в кардановом подвесе с внутренней рамкой, отклоненной на угол Φ от своего нормального положения, при котором она перпендикулярна к наружной рамке, если к узлу внутренней рамки с ротором приложить со стороны наружной рамки момент L , направленный по оси x . При этом на наружную рамку будет действовать реактивный момент, равный по величине, но противоположный по направлению моменту L . Он нагрузит ее подшипники радиальными силами, лежащими в плоскости $y-z$.

В данном случае целесообразно представить вектор кинетического момента H в виде суммы двух векторов, равных его

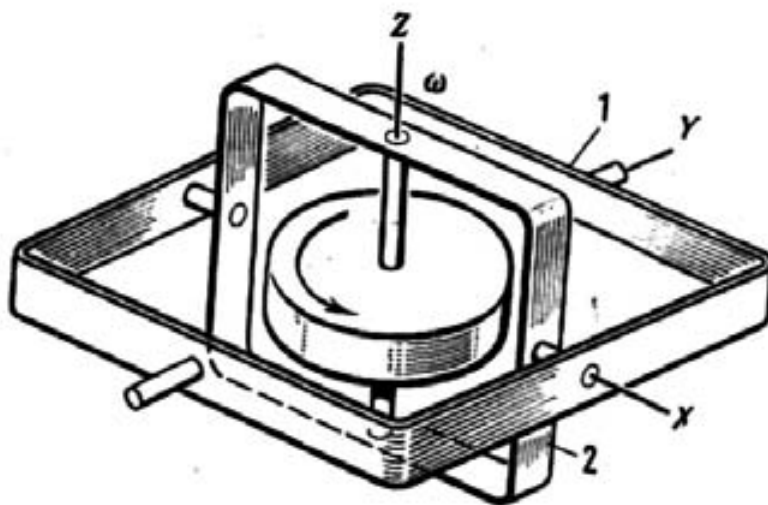


Рис. 107. Гироскоп в кардановом подвесе (1 и 2—наружная и внутренняя рамки)

составляющим по осям y и z . Составляющая H по оси y равна $-H \sin \Phi$, а его составляющая по оси z равна $H \cos \Phi$. В результате действия момента $-H \sin \Phi$ подшипники наружной рамки будут нагружаться радиальными силами, лежащими в плоскости $x-y$. В результате действия момента на составляющую $H \cos \Phi$ гироскоп согласно основному закону прецессии будет прецессировать вокруг оси y со скоростью

$$\omega_y = \frac{L}{H \cos \Phi} . \quad (49)$$

Подобным же образом момент, приложенный к наружной рамке по оси y , действуя на составляющую $H \cos \Phi$, вызывает прецессию гироскопа относительно оси x со скоростью

$$\omega_x = -\frac{L}{H \cos \Phi} . \quad (50)$$

В этом случае вектор момента \vec{L} параллелен составляющей $H \sin \Phi$ кинетического момента и поэтому не может изменить ее направление. Если реактивный момент обозначить через L_r , то для предотвращения поворота наружной рамки величина $L_r \cos \Phi$ должна быть равна L . Вертикальная составляющая $L_r \sin \Phi$ будет восприниматься подшипниками наружной рамки.

Рассмотрим явления, возникающие при изменении скорости собственного вращения гироскопа. Обозначим: L_m — момент, порождаемый гиromотором при разгоне ротора; L_y — составляющая L_m по оси y наружной рамки карданова подвеса; L_z — составляющая L_m по оси z , воспринимаемая подшипниками наружной рамки карданова подвеса.

Используем выражение

$$L = L_y = L_m \sin \Phi . \quad (51)$$

Подставив уравнение (51) в уравнение (50), получим

$$\omega_x = -\frac{L_m \sin \Phi}{H \cos \Phi} \quad (52)$$

или

$$\omega_x = -\frac{L_m \operatorname{tg} \Phi}{H} . \quad (53)$$

Уравнение (53) показывает, что скорость прецессии, создаваемая моментом гиromотора при разгоне ротора, прямо пропорциональна тангенсу угла отклонения внутренней рамки от ее нормального положения.

Нутация. Колебательное движение оси гироскопа (или его нутация) обусловлено переходом энергии вращательного движения от одной оси кардана подвеса к другой его оси. Оно может существовать неограниченно долго, пока не будет погашено силами трения в подшипниках карданова подвеса или под действием какого-либо другого процесса, способствующего рассеянию энер-

гии. Чтобы амплитуда нутации была минимальной, частота нутации должна быть высокой. Высокая частота нутации наблюдается в тех случаях, когда численное значение кинетического момента H велико по сравнению со значениями моментов инерции подвеса с ротором относительно осей подвеса.

Частота нутации равна

$$i_n = \frac{1}{2\pi} \frac{H}{\sqrt{J_x J_y}}, \quad (54)$$

где J_x и J_y — моменты инерции маховика относительно осей x и y .

Для понимания явления нутации может быть полезным следующее объяснение. Приложим относительно оси y мгновенный момент L_1 . Этот момент заставит гироскоп прецессировать вокруг оси x с угловой скоростью ω_1 , которая будет нарастать от нуля. При этом вследствие инерции ротора и внутренней рамки карданова подвеса появится реактивный момент L_2 , действующий в направлении, противоположном направлению прецессии. Момент L_2 вызовет прецессию относительно оси y с нарастающей от нуля скоростью ω_2 . Из-за инерции рамок подвеса и ротора появится реактивный момент L_3 , который вызовет прецессию относительно оси x со скоростью ω_3 , противоположной по направлению скорости ω_1 . В результате всех этих явлений конец оси собственного вращения будет описывать эллипс, а сама ось — эллиптический конус. Размеры эллипса зависят от величины моментов инерции J_x и J_y , кинетического H и приложенного моментов.

При запуске гироскопа явление нутации создает порой немалые затруднения. В начале запуска кинетический момент гироскопа H еще мал вследствие того, что незначительна скорость собственного вращения, а величина момента L_m максимальная. Угол Φ при запуске обычно не равен нулю. Все это обуславливает значительную амплитуду и небольшую частоту возникающих при запуске нутационных колебаний оси собственного вращения. По мере увеличения скорости собственного вращения величина H растет, вследствие чего, как видно из формулы (54), повышается частота нутации. Когда частота нутации достигает значения, равного резонансной частоте конструкции карданова подвеса, возникают механические вибрации, которые могут вывести установку из строя, если это не было учтено при конструировании гироскопа.

Стабилизационные свойства гироскопа. Рассмотрим двухстепенный гироскоп, используемый в стабилизированных платформах (рис. 108).

Двухстепенный гироскоп может поворачиваться вокруг выходной оси; относительно входной оси он удерживается в заданном положении системой автоматической коррекции. Двухстепенный гироскоп вместе с платформой обеспечивает стабилиза-

цию относительно одной оси. Применяв два или три двухстепенных гироскопа, можно осуществить стабилизацию платформы относительно двух или трех взаимно перпендикулярных осей.

Рассмотрим, как стабилизируется платформа. Стабилизация относительно осей внутренней и наружной рамок осуществляется гироскопами, у которых ось вращения рамки (ось прецессии) перпендикулярна к плоскости платформы (на рис. 109 это левый и правый гироскопы на переднем плане), и сервомоторами внутренней и наружной рамок. Платформа показана в положении, когда ось собственного вращения левого гироскопа параллельна оси внутренней рамки, а правого — оси наружной рамки.

Предположим, что по оси наружной рамки действует возмущающий момент. Согласно закону прецессии он не может повернуть платформу, а вызовет прецессию левого гироскопа относительно платформы; правый гироскоп не прореагирует на этот момент. Прецессируя, гироскоп будет отклоняться от своего нормального положения, вследствие чего его датчик угла начнет выдавать сигнал. Этот сигнал через преобразователь координат (о нем будет сказано ниже) и усилитель подается на сервомотор наружной рамки, который начинает прикладывать к ней момент, противоположный возмущающему моменту и все возрастающий по мере возрастания угла прецессии. Когда момент сервомотора уравнивает возмущающий момент, прецессия прекратится. В таком состоянии система будет оставаться до тех пор, пока действует возмущающий момент. Важно, чтобы указанное равновесие наступало при достаточно малом угле отклонения гироскопа от его нормального положения.

Таким образом, возмущающий момент вызывает лишь прецессию гироскопа и не вызывает движения самой платформы. Однако следует заметить, что в наших рассуждениях мы не учитывали нутацию. В действительности же при приложении к платформе внешнего момента одновременно с прецессией возникнут и нутационные колебания

относительно осей подвеса. Амплитуда и частота этих колебаний определяются кинетическим моментом гироскопа, моментами инерции платформы со всеми ее элементами относительно осей подвеса и динамическими параметрами сис-

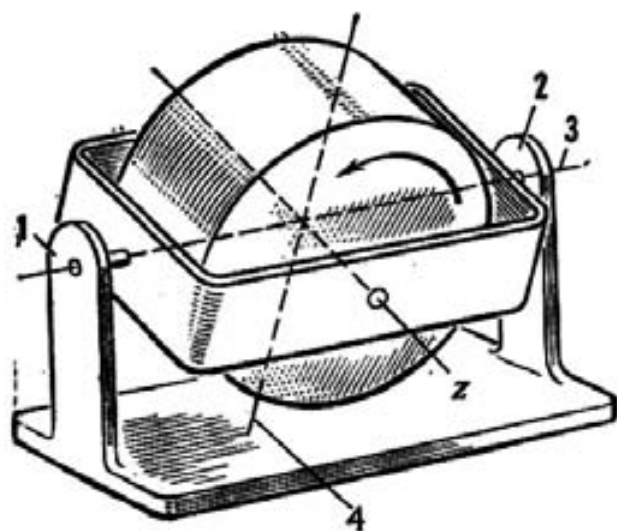


Рис. 108. Схема гироскопа для стабилизации платформы:

1—место установки датчика момента; 2—место установки датчика угла; 3—выходная ось; 4—входная ось

темы стабилизации. При этом амплитуда колебаний зависит еще и от величины приложенного внешнего момента. Если указанные параметры выбраны правильно, а в случае необходимости приняты еще и некоторые специальные меры, то нутационные колебания платформы будут практически неощутимы. С исчезновением внешнего момента под действием момента сервомотора гироскоп вернется в нормальное положение, при котором сиг-

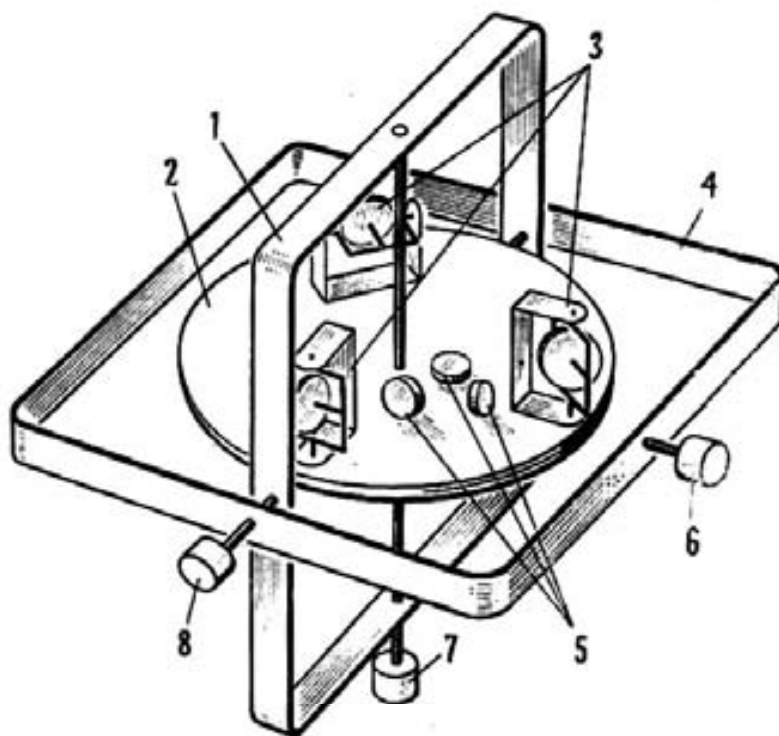


Рис. 109. Схема платформы, стабилизированной относительно Земли:

1—внутренняя рамка; 2—платформа; 3—двухступенные гироскопы; 4—наружная рамка; 5—акселерометры; 6—сервомотор креновой рамки; 7—сервомотор азимутальной оси; 8—сервомотор тангажной рамки

нал датчика угла, а следовательно, и момент сервомотора обратятся в ноль. Таким образом, платформа стабилизируется путем компенсации возмущающего момента моментом сервомотора. В течение времени, когда момент сервомотора меньше возмущающего момента, избыток последнего компенсируется гироскопическим моментом, развиваемым прецессирующим гироскопом.

Если возмущающий момент будет действовать по оси внутренней рамки, то он вызовет прецессию правого гироскопа, который в этом случае аналогично предыдущему приведет в действие сервомотор внутренней рамки. Значит, при положении платформы, показанном на рис. 109, левый гироскоп должен управлять сервомотором наружной рамки, а правый — сервомотором внутренней рамки.

Повернем корпус платформы в азимуте на некоторый угол, не кратный 90° . Теперь оси собственного вращения указанных гироскопов уже не будут параллельны осям внутренней и наружных рамок. Поэтому возмущающий момент, действующий по любой из этих осей, вызовет прецессию сразу обоих гироскопов. И, следовательно, если сохранить прежнюю схему управления, то будут включены оба сервомотора, в то время как должен работать только тот, по оси которого действует возмущающий момент. В этом случае требуется определить, по какой оси действует возмущающий момент, на какой сервомотор подать управляющий сигнал и каким он должен быть по величине и знаку. Если же возмущающие моменты действуют одновременно по обеим осям, то необходимо установить, каким должен быть управляющий сигнал для каждого сервомотора. Автоматическое решение этого вопроса обеспечивается так называемым преобразователем координат, который представляет собой поворотный трансформатор, используемый в качестве фазовращателя.

Прецессию левого и правого гироскопов вызывают только моменты, направленные по их взаимно перпендикулярным осям (см. рис. 108 и 109), связанным с платформой. Поэтому прецессия гироскопов, а следовательно, и сигналы их датчиков угла характеризуют моменты, действующие на платформу по этим двум связанным с ней осям. Преобразователь координат воспринимает азимутное положение платформы относительно корпуса прибора. Он обеспечивает преобразование указанных моментов к осям внутренней и наружной рамок для любого азимутального положения платформы относительно корпуса прибора. Это достигается путем соответствующего изменения сигналов датчиков угла гироскопов.

На рис. 109 преобразователь координат расположен на внутренней рамке справа от сервомотора. Его статор жестко связан с внутренней рамкой, а ротор получает вращение от платформы 2 через пару шестерен при ее поворотах относительно внутренней рамки.

Стабилизация платформы относительно азимутной оси осуществляется третьим гироскопом и сервомотором платформы, установленным на внутренней рамке (внизу). Входная ось данного гироскопа всегда параллельна азимутальной оси платформы, поэтому он реагирует только на моменты, действующие на платформу относительно ее азимутальной оси.

Рассмотренный способ стабилизации называется силовой гироскопической стабилизацией. Стабилизирующий момент, создаваемый гироскопом, представляет собой гироскопический момент, возникающий при прецессии гироскопа и направленный перпендикулярно к осям прецессии и собственного вращения. Он равен по величине и противоположен по направлению внешнему моменту, действующему на платформу и вызывающе-

му прецессию гироскопа. Гироскопический момент, а следовательно, и стабилизирующее действие на платформу непосредственно самого гироскопа существует только до тех пор, пока существует прецессия. Когда момент сервомотора становится равным по величине возмущающему моменту, прецессия прек-

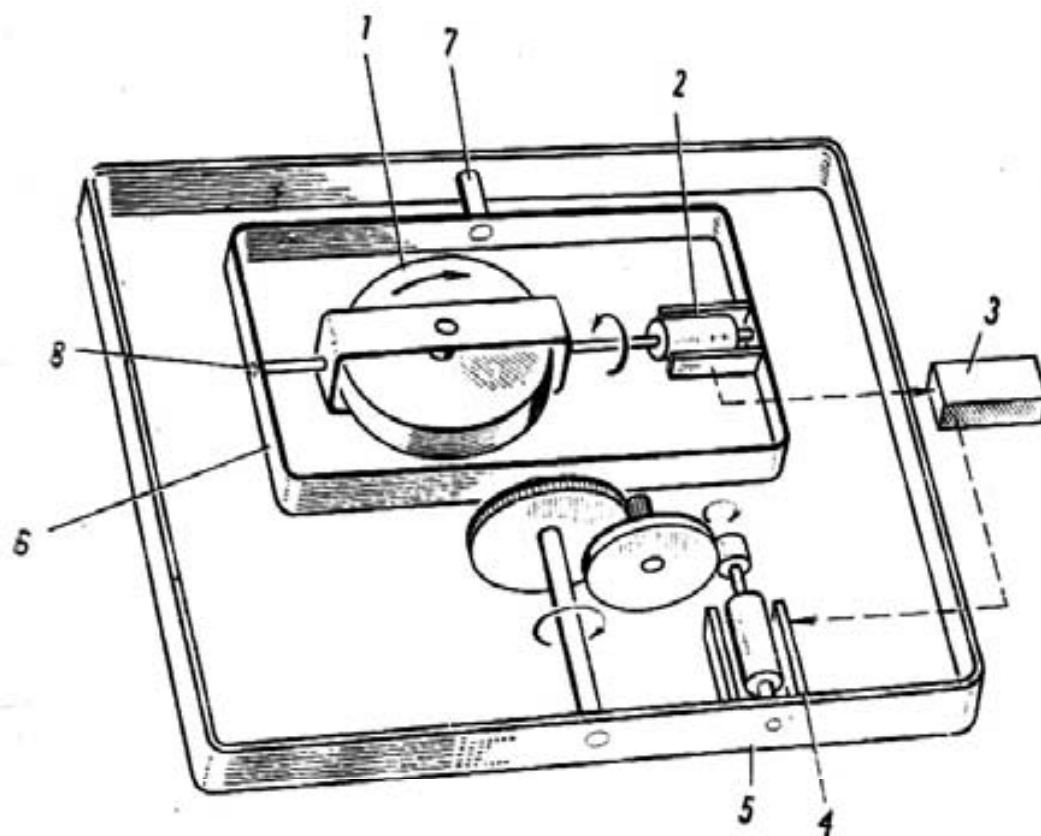


Рис. 110. Схема одноосной стабилизированной платформы:
1—гироскоп; 2—датчик угла; 3—сервоусилитель; 4—сервомотор; 5—корпус; 6—платформа; 7—ось платформы; 8—выходная ось гироскопа

ращается. С этого момента стабилизация платформы осуществляется только сервомотором.

Схема одноосной стабилизированной платформы приведена на рис. 110.

Стабилизирующие свойства инерционных аккумуляторов используются в так называемых однорельсовых экипажах. Равновесие этих экипажей поддерживается помещенным в них стабилизирующим гироскопическим устройством. Это свойство гироскопов было применено для стабилизации двухколесного экипажа в 1914 г. П. Шиловским, а еще ранее англичанином Бреннаном для его монорельсового вагона.

Этот вагон (рис. 111) перевозил по территории выставки до 40 человек, причем сохранял равновесие не только на ходу, но и на стоянках.

В настоящее время разработан ряд конструкций двухколесных автомобилей с гироскопической стабилизацией. Двухко-

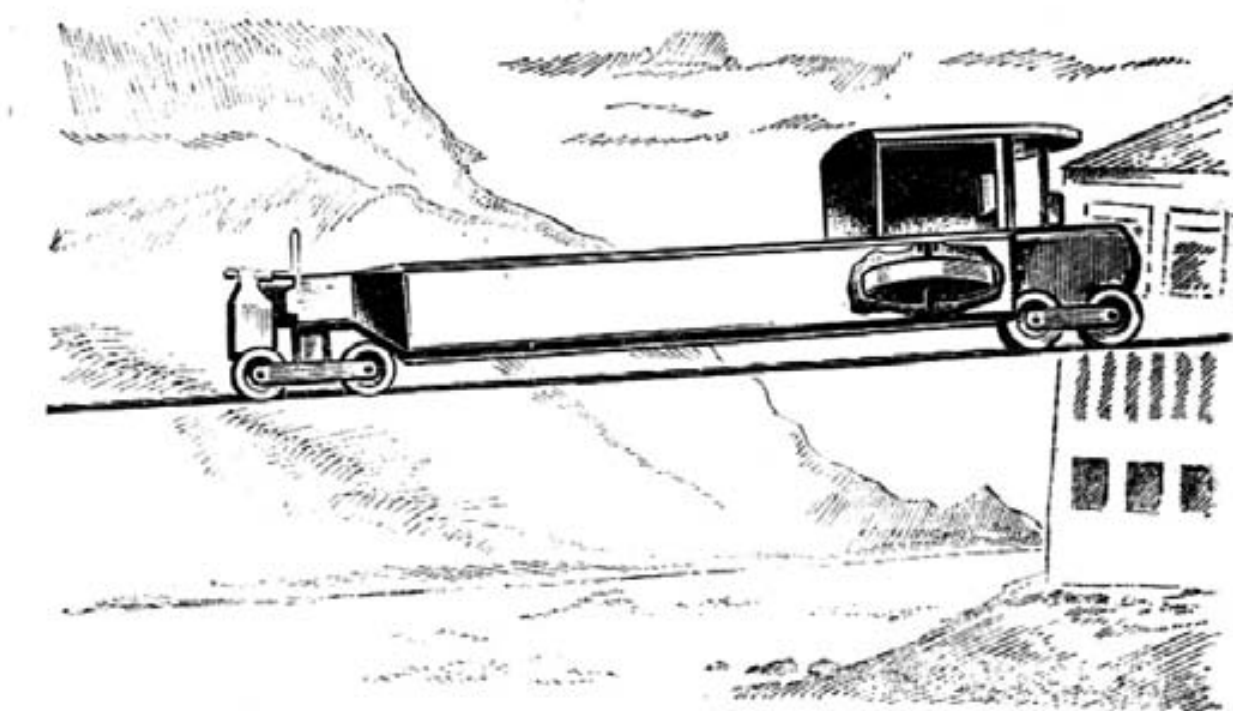


Рис. 111. Однорельсовый экипаж Бреннана

лесные автомобили имеют ряд преимуществ по сравнению с четырехколесными.

Гироскопические нагрузки в мобильных машинах. Как было отмечено, гироскопический эффект играет и отрицательную роль, создавая дополнительные нагрузки на несущие элементы конструкции, могущие вызвать их разрушение. Между тем, помимо специальных маховичных двигателей на всех транспортных средствах, в том числе и на автомобилях, обязательно имеются вращающиеся маховые массы — детали двигателя, турбины, маховики, колеса. При угловых перемещениях движущейся машины, вследствие гироскопического эффекта на опоры этих деталей действуют дополнительные усилия, достигающие иногда весьма больших значений.

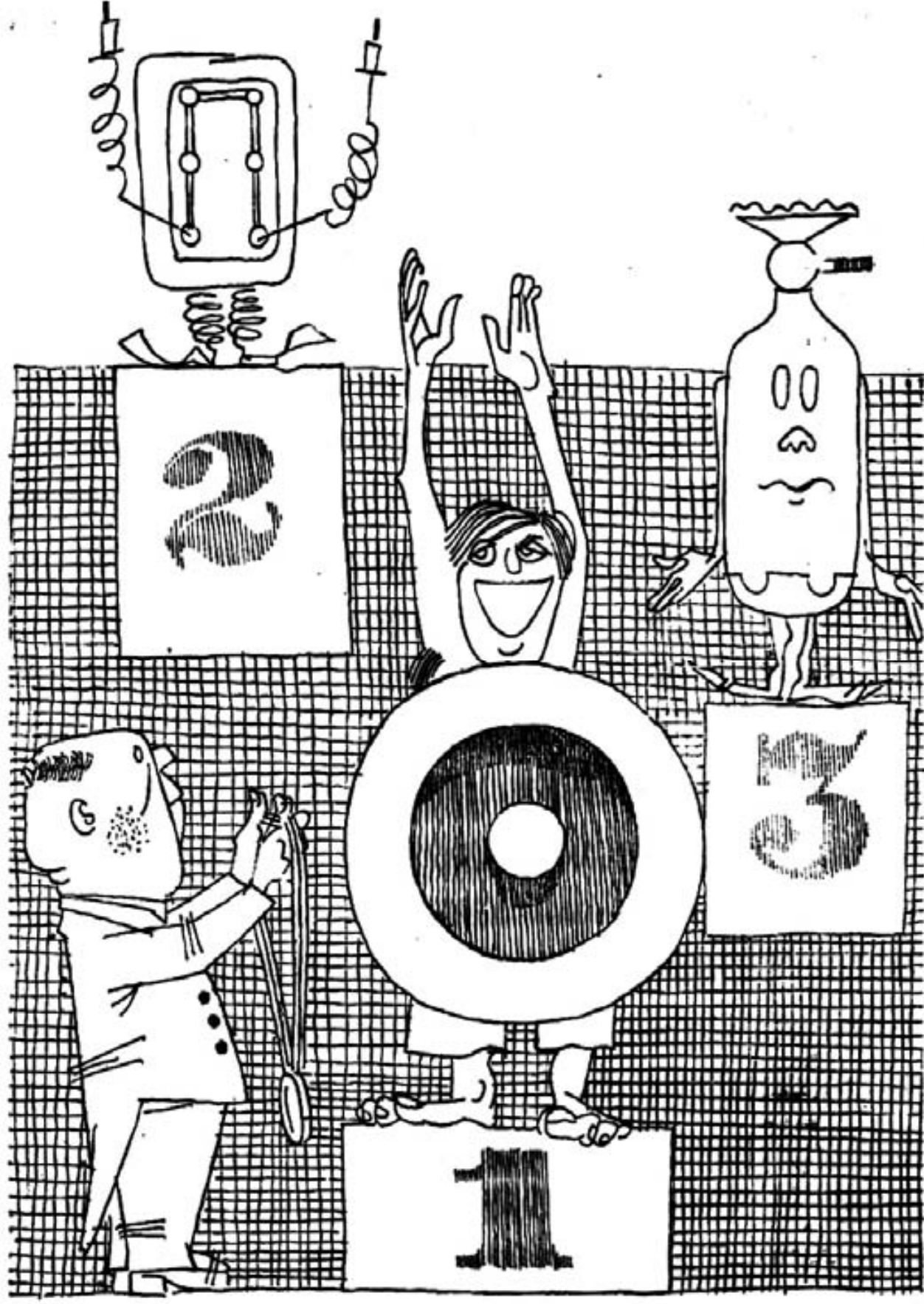
Измерение величин гироскопических усилий и исследование их влияния на опоры подшипников могут дать материал как для их прочностного расчета, так и для определения влияния гироскопического момента на устойчивость движения той или иной машины. Подобные исследования широко проводятся также на водном и воздушном транспорте, где скорости угловых перемещений особенно велики.

Исследования угловых скоростей перемещения для автомобилей проведены фирмой «Кларк» (Англия) с помощью специального прибора, разработанного М. Плинтом. Прибор этот состоит из гироскопа, подвешенного в раме с вертикальной осью вращения и прецессирующего под действием колебаний экипажа. Движения прецессии передаются на самописец, записываю-

щий отклонения оси гироскопа на двух лентах, движущихся во взаимно перпендикулярных направлениях.

Исследования угловой скорости колебаний автобуса, движущегося со скоростью 40 км/ч, позволили, установить, что максимальные поперечные колебания экипажа происходили с угловой скоростью около $8 \cdot 10^{-2}$ рад/с. При этом максимальная скорость совместных (продольных и поперечных) колебаний составляла около $8,8 \cdot 10^{-2}$ рад/с. По этим данным можно судить о том, что продольные колебания (галомирование) экипажа совершались с меньшей угловой скоростью. Частота колебаний была порядка 1,5—2 Гц.

Таким образом, умело используя стабилизационные свойства вращающегося маховика, сводя к минимуму вредные воздействия гироскопического эффекта, можно конструировать рациональные варианты маховичных двигателей для той или иной машины.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МАХОВИЧНЫЙ И ДРУГИЕ

Наступило время подвести итоговую черту и определить место под солнцем для маховичных двигателей.

Сравнивать маховичный двигатель с другими двигателями трудно — ведь он работает, используя аккумулированную энергию. Значит, сравнивать его надо с другими двигателями и силовыми агрегатами, также использующими для своей работы предварительно накопленную энергию.

В технике существует большое разнообразие аккумуляторов энергии. Из электрических можно назвать электростатические (конденсаторные), электродинамические (индуктивные), электрохимические аккумуляторы. Механические включают в себя пружинные, резиновые, пневматические, пневмо- и пружинно-гидравлические аккумуляторы, аккумуляторы энергии в виде поднятого груза и, наконец, маховичные или инерционные аккумуляторы. Есть еще и тепловые аккумуляторы, накапливающие, кстати, огромную энергию в единице массы, и выделяющие ее в виде тепловой.

Мы здесь не будем относить к аккумуляторам устройства, работающие как на естественном, так и на искусственном горючем, в том числе и водороде в смеси с воздухом, так как они относятся в основном к двигателям. Что можно сказать обо всех этих аккумуляторах?

Каждый из них хорош в своем и имеет свою «коронную» область применения. Конденсаторные аккумуляторы накапливают не столь значительные величины энергии. В обычных условиях и индуктивные электрические аккумуляторы могут накопить не так уж много энергии. Например, по известным данным конденсаторные аккумуляторы накапливают на единицу объема, а грубо, и на единицу массы в 2 раза меньше энергии, чем индуктивные. Аккумулирующая же способность маховиков в тысячи раз больше, чем у тех и других. Однако, когда требуется накопить

небольшие количества энергии и выделить их в виде электрической, то конденсаторы и катушки индуктивности (дроссели) могут оказаться эффективнее. Трудно, по-видимому, представить в электронных схемах вместо привычных дросселей и конденсаторов маховики с генераторами; однако маховичные генераторы большой мощности гораздо эффективнее, чем батарея конденсаторов или дросселей такой же мощности. Следует заметить, что индуктивные аккумуляторы могут накопить значительные количества энергии и достаточно долго сохранять ее в условиях сверхпроводимости при весьма низких температурах.

Из механических аккумуляторов в качестве двигателей могут быть использованы практически все, правда, с разной эффективностью. Пружинные аккумуляторы, например, широко применяют в качестве двигателей для часов, игрушек, различных приборов. В старину их применяли даже в самоходных каретах для торжественных выездов королей в некоторых европейских странах. Внутри такой кареты, правда, находились два здоровенных работника, постоянно заводивших пружину. Пружинные двигатели, как об этом уже говорилось, накапливают в единице массы небольшие количества энергии, в тысячи раз меньшие, чем маховики из того же материала. Такие же показатели имеют и пружинно-гидравлические аккумуляторы с той разницей, что энергия, накопленная в пружине, выделяется с напором жидкости (масла). Работу в этом случае производит гидродвигатель того или иного типа.

Тепловые аккумуляторы, действие наиболее эффективных из которых основано на плавлении гидридов некоторых металлов (например, лития) с поглощением тепла и выделением этого тепла при отвердевании гидрида, могут, как было отмечено, накопить в единице массы огромную энергию — до $3 \cdot 10^6$ Дж/кг. В настоящее время по удельной энергоемкости, пожалуй, ни одному аккумулятору не под силу тягаться с тепловым. Но превращение тепловой энергии этих аккумуляторов в механическую представляет собой до того сложный и малопродуктивный процесс (например, с помощью паровых машин или термоэлементов и электродвигателей), что как двигатели аккумуляторы этого типа непригодны.

Внимательный читатель вероятно заметит, что в «черном описке» аккумуляторов, помещенном выше, не было электрохимических, пневматических (в том числе и пневмогидравлических), а также маховичных аккумуляторов. Это сделано не случайно.

Именно эти аккумуляторы могут (по крайней мере сегодня) активно применяться в качестве двигателей машин достаточно широкого назначения. Общая черта, характерная для аккумуляторов этих трех типов — высокая удельная энергоемкость. Полезная энергия, накапливаемая современными аккумуляторами этих трех типов, — сотни тысяч джоулей энергии в килограмме

массы аккумулятора. Однако, чтобы использовать ее в качестве механической, электрохимическому и пневматическому аккумулятору или попросту баллону со сжатым газом необходим двигатель — электрический или пневматический (или гидравлический для гидропневматических аккумуляторов, использующий энергию, накопленную в сжатом газе посредством напора жид-

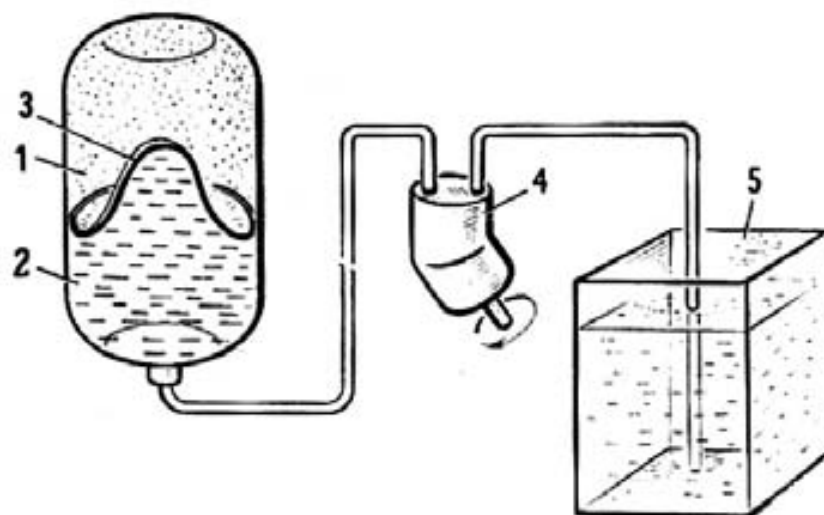


Рис. 112. Гидропневматический силовой агрегат с гидропневмоаккумулятором:

1—газовая полость; 2—жидкость; 3—эластичная перегородка; 4—обратимая гидромашина; 5—бак

кости, рис. 112). Маховику же обычно никакой двигатель не нужен — выделение энергии происходит путем вращения вала самого маховика. В этом безусловное преимущество маховичного аккумулятора или двигателя на его основе.

Когда же речь заходит о сроках сохранения (консервации) энергии, на первый план выступают пневматические аккумуляторы — энергию сжатого газа можно хранить многие годы. Электрохимические аккумуляторы здесь уступают им, а маховики, несмотря на то что лабораторные образцы позволяли хранение энергии недели и месяцы, должны, пожалуй, отступить на третий план.

Но при рассмотрении такого показателя, как удельная мощность, маховики опять «вырываются» на первое место, причем с огромным запасом. Нет двигателя или аккумулятора, способного развивать столь большие мощности, как маховик. Мощность, развиваемая маховиком, практически безгранична и лимитируется только возможностями трансмиссии. Второе место здесь принадлежит пневмоаккумуляторам, третье — электрохимическим аккумуляторам, имеющим, как известно, невысокую удельную мощность. Так же обстоят дела и с продолжительностью зарядки, зависящей от удельной мощности аккумулятора. Современный маховичный двигатель имеет лучшие показатели

и по надежности, долговечности, к. п. д., влиянию воздействия температур. Однако, когда требуется выделить энергию в виде электрической или жидкостного напора, электрические или пневматические аккумуляторы иногда могут иметь преимущества.

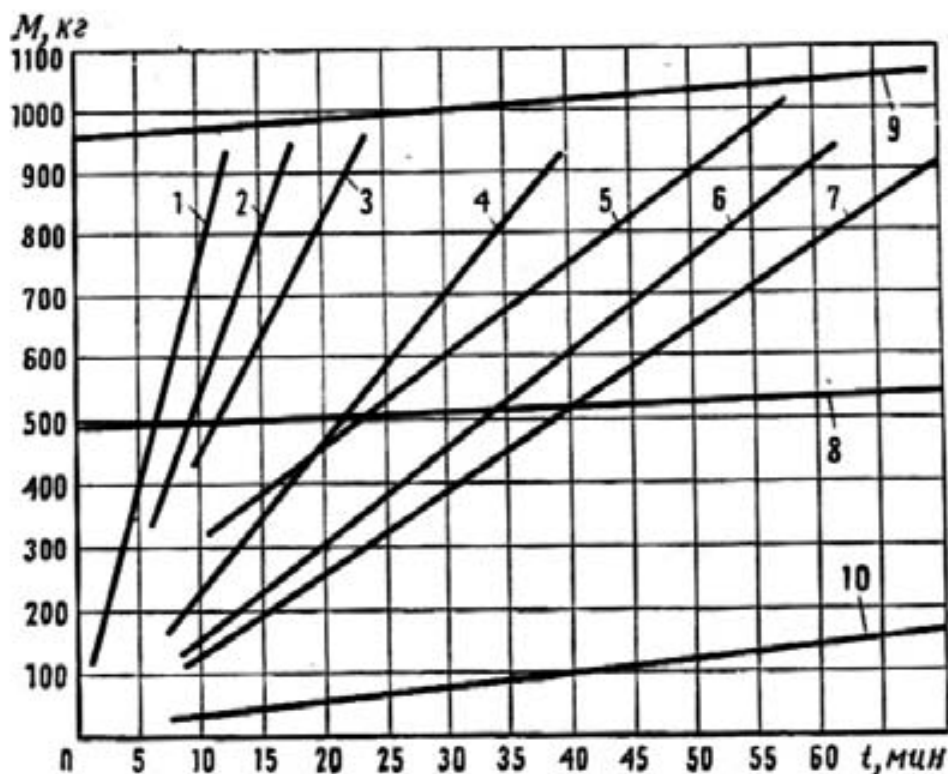


Рис. 113. Сравнительные данные по массам различных энергетических установок мощностью 45 кВт:

1—маховик фирмы Кларк; 2—кислотный аккумулятор; 3—щелочной аккумулятор; 4—ленточный маховик; 5—серебряно-цинковый аккумулятор с двигателем, газовые аккумуляторы; 6—проволочный маховик; 7—маховик из ориентированного стеклопластика; 8—дизель с топливом; 9—топливные элементы; 10—маховик из кварцевой нити $[\sigma]=6 \text{ кН/мм}^2$

Здесь все определяется конкретными условиями работы машины, использующей тот или иной аккумулятор.

Немаловажное значение имеет способность того или иного двигателя или аккумулятора рекуперировать энергию машины. Здесь первенство принадлежит маховику, хотя пневматические и электромеханические аккумуляторы также способны рекуперировать энергию.

У аккумуляторов всех трех типов есть большие перспективы роста полезных показателей и в первую очередь удельной энергоемкости. Наибольшие перспективы, как отмечено выше, имеют маховики. Это связано в первую очередь с созданием супермаховиков из сверхпрочных нитевидных материалов, причем уже созданы материалы, с применением которых перспективные супермаховики по удельной энергоемкости более чем в 2

раза опережают перспективные электроаккумуляторы. Хорошие перспективы роста энергоемкости и у электрохимических аккумуляторов, которые и сейчас имеют достаточно высокие пока-

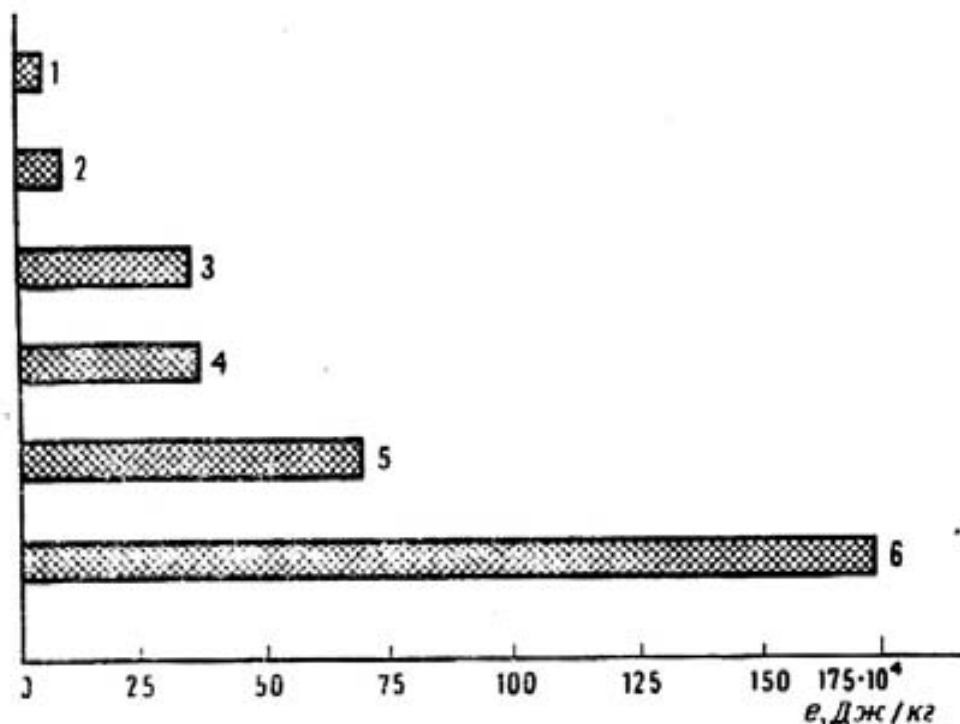


Рис. 114. Сравнительные данные удельной энергоемкости аккумуляторов энергии (по Д. В. Рабенхорсту):

1—стальной обод; 2—кислотный аккумулятор; 3—супермаховик из современных материалов; 4—цинково-воздушный аккумулятор; 5—натриево-воздушный аккумулятор; 6—перспективный супермаховик

затели. Перспективы пневматических аккумуляторов более скромны и зависят они в основном от создания сверхпрочных и легких баллонов из тех же нитевидных материалов.

Сравнительные данные по массам различных энергетических установок мощностью 45 кВт в зависимости от продолжительности работы приведены на рис. 113, а ориентировочные данные по энергоемкости некоторых аккумуляторов (с использованием материалов Д. В. Рабенхорста) — на рис. 114.

Эти данные однозначно свидетельствуют о высокой перспективности маховичных двигателей.

И несомненно, что многие машины уже недалекого будущего поведет простой, надежный, экономичный и не загрязняющий окружающую среду маховичный двигатель!



ЧТО ЧИТАТЬ ПО МАХОВИЧНЫМ ДВИГАТЕЛЯМ?

Вопросы расчетов и конструирования маховичных аккумуляторов и двигателей, а также материалы их исследований можно найти в книге Н. В. Гулиа «Инерционные аккумуляторы энергии». Издательство Воронежского Государственного университета, 1973 г.

Применение маховичных двигателей на автомобилях отражено в книге того же автора «Инерционные двигатели для автомобилей». М., «Транспорт», 1974 г.

Вопросы прочности вращающихся дисков хорошо изложены в книгах С. Д. Пономарева и др. «Расчеты на прочность в машиностроении». Т. 3, М., 1953; М. И. Яновского «Конструирование и расчеты на прочность деталей паровых турбин», М., 1947; М. М. Кобрин «Прочность вращающихся дисков», М., 1965.

По вопросу внутренних потерь вращающихся маховиков и маховичного электропривода можно рекомендовать книги Б. А. Делекторского и П. Н. Орлова «Электромеханические расчеты гидродвигателей», М., 1970, а также Л. Б. Гейлера «Электропривод в тяжелом машиностроении», М., 1958.

Гироскопические явления, возникающие в маховичных двигателях, можно подробно изучить, пользуясь книгой Б. И. Кудревича «Теория гироскопических приборов». Т. 1 и 2, М., 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	7
Глава I. ФИЗИКА О МАХОВИКАХ	17
Жизнь в движении	18
Форма и содержание	22
Маховик — свинцовый или алюминиевый?	28
Бомба, взрывающаяся безопасно	30
«Супер» — это отлично!	35
Маховик — понятие растяжимое	39
Аккумуляторы «упругой» энергии	41
Извечный вопрос — к. п. д.	45
О будущем, о перспективах	58
Глава II. МАХОВИКИ В МАШИНАХ	63
Маховик в роли камикадзе	63
Из катапульты — самолетом!	65
«Прыгающий Гиро»	67
Удачных стартов!	69
Удар! Еще удар!	71
Эх, прокачу!	72
Инерционная сварка	72
В помощь землекопу	73
Удесятенная мощность	75
Действие ... без противодействия	77
Маховичные творения «поэта техники»	78
Заманчиво, но, увы, нереально	81
Глава III. МАХОВИК В ТРАНСПОРТЕ	87
Самобеглая тележка — маховоз	87
Транспорт пороховых складов	90
Швейцарское чудо	95
	171

	Стр.
В союзе с троллейбусом	98
Маховичные миниавтомобили	103
Рекуперация — это экономичность!	108
Спасительные гибриды	118
Глава IV. КАК ПОСТРОИТЬ МАХОВИЧНЫЙ ДВИ- ГАТЕЛЬ?	129
Как рассчитать маховик на прочность? . . .	129
Как отбалансировать маховик?	140
Что такое «гироскопический эффект»? . . .	153
Заключение. МАХОВИЧНЫЙ И ДРУГИЕ	165
Что читать по маховичным двигателям? . .	170

Нурбей Владимирович ГУЛИА
МАХОВИЧНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Редактор издательства *Н. П. Ошеров*
Технический редактор *Т. И. Андреева*
Корректор *Н. И. Шарунина*
График *А. Я. Коризунов*
Художник *Л. С. Вендров*

Сдано в набор 31/V 1976 г.
Подписано в печать 8/X 1976 г. Т—16474
Формат 60×90^{1/16} Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 11,0 Уч.-изд. л. 11,0
Тираж 14200 экз. Заказ 933 Цена 34 коп.

Издательство «Машиностроение» 107885,
Москва Б-78, 1-й Басманный пер., 3.

Московская типография № 8
Союзполиграфпрома
при Государственном комитете
Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли.
Хохловский пер., 7.