

Энергосбережение в машиностроении

*Е.А. Дмитриева, Д.С. Блинов, д.т.н., В.А. Верещака, к.т.н
(ООО «МЕРЦИС», г. Москва)*

Для того, чтобы Россия смогла приблизиться по уровню жизни к передовым промышленно-развитым странам, необходимо сосредоточиться на решении целого ряда проблем, что приведет к развитию нашей экономики. Одной из важнейших проблем является энергосбережение. Это глобальная проблема, которой необходимо постоянно заниматься во всех отраслях жизнедеятельности человека, а в российских условиях дополнительные сложности создаются специфическим мировоззрением граждан страны.

Для достаточно быстрого и ощутимого получения эффекта в энергосбережении следует обоснованно выбрать приоритетные отрасли экономики. Эти отрасли должны находиться под постоянным контролем, и в них надо вкладывать капиталовложения, соразмерные эффекту, который может быть получен в данных отраслях.

Безусловно, эффективное развитие **машиностроения неосуществимо без всесторонней проработки вопросов энергосбережения**. Цель машиностроения – производство конкурентоспособной экономической продукции с минимально возможной себестоимостью.

При этом машиностроение с позиций энергосбережения надо рассматривать в более широком аспекте. *Во-первых, машиностроение это производство машин и других изделий, в том числе и машин, относящихся к средствам производства. Для экономии энергии при производстве машин и других изделий машиностроительного профиля технология их изготовления должна быть эффективной или, как говорят, «современной».* «Современная технология» должна учитывать целый ряд зачастую противоречивых требований и обеспечивать производство машин и изделий с заданными точностью и надежностью, а также эксплуатационными и другими параметрами. К указанным требованиям относятся: высокие производительность и экономичность технологических процессов, их широкая автоматизация и сведение к минимуму доли ручного труда, стремление к безотходному производству, безопасность, экологичность и многое другое. Разработка «современной технологии» под конкретную продукцию является сложнейшей многовариантной задачей. Кроме того, между продукцией и технологией ее изготовления существуют жесткие причинно-следственные связи, используя которые детали и узлы производимой продукции отрабатывают на технологичность.

Во-вторых, продукцией машиностроения являются средства производства, которые используются в качестве технологического оборудования для «современных технологий». К ним относятся: станки, машины для литья и сварки, кузнечнопрессовое оборудование, инструмент, оснастка, транспортные средства и роботы, устройства управления и контроля и т.д. Технологическое оборудование должно проектироваться таким образом, чтобы полностью удовлетворять соответствующим технологиям по точности, быстродействию, надежности, долговечности и другим параметрам. Оно по возможности должно иметь меньшие габариты, так как для его установки нужны производственные площади. **Технологическое оборудование должно быть экономичным (энергосберегающим), так как оно используется в высокопроизводительных технологических процессах, то есть, в течение рабочей смены практически все время работает.** Что касается стоимости технологического оборудования, то она, как правило, не получается низкой, так как приоритетными являются другие требования к оборудованию. Поэтому для достижения высокого качества изготавливаемой продукции осознанно идут на большие экономические издержки, если они себя оправдывают при разложении этой стоимости на тысячи, а иногда и на миллионы единиц выпускаемых изделий.

В-третьих, продукцией машиностроения являются непосредственно машины и другие изделия. Особо следует отметить, что почти все материальные ценности человечество производит с помощью машин. Машин оказывают нам очень многие услуги, например, транспортные. Отсюда следует, что количество окружающих нас машин исключительно велико, равно как и число их конструкций и конструктивных исполнений. **Для работы машин нужна энергия, экономия которой является одной из важнейших задач, стоящих перед машиностроителями при проектировании.**

При этом технологические процессы, технологическое оборудование и изготавливаемая на нем продукция не должны быть статичными во времени. Для поддержания конкурентоспособного уровня продукции по результатам ее эксплуатации необходимо дорабатывать и модернизировать продукцию, а следовательно, вносить изменения в технологические процессы и оборудование.

Если сравнить количество изготавливаемого технологического оборудования с количеством производимых машин, то количество последних будет значительно больше количества единиц технологического оборудования. В стоимостном выражении эта разница несколько снизится, но все равно суммарная стоимость машин будет существенно превосходить суммарную стоимость технологического оборудования. Следовательно,

наибольший эффект по энергосбережению заложен в конструкциях машин и других изделий машиностроительного профиля.

Многие машины имеют сложную конструкцию и состоят из корпусных деталей, агрегатов, механизмов, узлов и т.д., то есть, имеют сложную структурную схему. Другие машины имеют простую структурную схему. В любом случае, **машину можно условно разделить на отдельные приводы, каждый из которых, в общем случае, состоит из двигателя, передаточного механизма и исполнительного механизма**, совершающего полезную работу. Если за одно и то же время отнести полезную работу к работе, затраченной двигателем, то мы получим η – КПД (коэффициент полезного действия) привода, который равен

$$\eta = \eta_{\text{пм}} \cdot \eta_{\text{им}}, \quad (1)$$

где: $\eta_{\text{пм}}$ – КПД передаточного механизма;

$\eta_{\text{им}}$ – КПД исполнительного механизма.

В машинах преобладают электромеханические приводы. В них двигатель преобразует электрическую энергию в механическую, передаточный механизм передает механическую энергию от двигателя к исполнительному механизму, как правило, с изменением силовых и кинематических параметров, а исполнительный механизм совершает полезную работу. Иногда передаточный механизм преобразует один вид движения в другой, чаще всего вращательное движение преобразуется в поступательное. Есть приводы, в которых передаточный механизм отсутствует, и двигатель напрямую соединен с исполнительным механизмом.

Для экономии энергии КПД привода η должен быть максимально возможным, а следовательно, максимально возможными должны быть $\eta_{\text{пм}}$ и $\eta_{\text{им}}$ (см. формулу (1)). При этом количество конструкций исполнительных механизмов чрезвычайно велико, а количество типовых конструкций передаточных механизмов ограничено. Поэтому типовые схемы передаточных механизмов в большинстве случаев отработаны, в том числе и с позиции энергосбережения, а сами передаточные механизмы унифицированы; многие из них стандартизованы, и эти механизмы применяются в самых различных машинах и других устройствах. Отсюда следует, что **при разработке машин наибольший эффект в энергосбережении может быть получен при проектировании исполнительных механизмов машин.**

Однако цель данной статьи – показать, что и в очень узкой нише, отводимой под передаточные механизмы, также есть резервы по экономии энергии. Передаточный механизм является промежуточным связующим звеном привода, и с позиций энергосбережения иметь низкий КПД этого механизма просто недопустимо.

Передаточные механизмы бывают одноступенчатыми (с одной механической передачей) и многоступенчатыми (с несколькими механическими передачами). **Механические передачи**, каждая из которых имеет входное и выходное звено, **можно условно разделить на три группы**. *В механических передачах первой группы входное и выходное звенья совершают вращательное движение.* К передачам первой группы относятся: зубчатые передачи, в том числе с цилиндрическими и коническими зубчатыми колесами, планетарные, волновые и другие; червячные передачи; цепные передачи; ременные передачи; передачи с зубчатым ремнем и т.д. В машинах механические передачи первой группы применяются чаще всего; количество типовых конструкций этих передач достаточно велико, что позволяет выбрать наиболее целесообразную конструкцию передачи в составе передаточного механизма для конкретного привода. КПД механических передач первой группы, за исключением передач с перекрещивающимися осями, высокий, и практически все резервы по его повышению исчерпаны.

В механических передачах второй группы входное звено совершает вращательное движение, а выходное - поступательное. Среди этих передач доминируют винтовые передачи, а другие используются редко. Винтовые передачи делятся на две подгруппы:

- передачи, в которых реализуется трение скольжения, КПД этих передач составляет около 0,4;
- передачи, в которых, в основном, реализуется трение качения, КПД этих передач составляет 0,8 – 0,9.

К механическим передачам третьей группы относятся передачи, которые по сочетанию видов движения входного и выходного звеньев не относятся к механическим передачам первой и второй группы. Количество конструкций таких передач невелико, и применяются они редко.

Из обзора механических передач следует, что надо выполнить более детальный анализ винтовых передач, которые относятся к передачам второй группы, преобразующим вращательное движение в поступательное. Основанием для анализа этой группы передач является тот факт, что КПД для двух подгрупп этих передач различается в два раза.

Передачи винт-гайка скольжения относятся к передачам, в которых реализуется трение скольжения. Эти передачи, состоящие только из винта и гайки (см. рис. 1а), известны уже на протяжении нескольких столетий, но и в наше время они успешно применяются во многих машинах и изделиях благодаря своим преимуществам. К ним относятся: простота конструкции и низкая себестоимость; высокая нагрузочная способность при малых габаритах; большой выигрыш в силе; возможность получения

медленного, плавного движения гайки или винта; возможность получения точного перемещения гайки или винта; наличие отлаженной технологии, оборудования, оснастки и инструмента для изготовления винта и гайки.

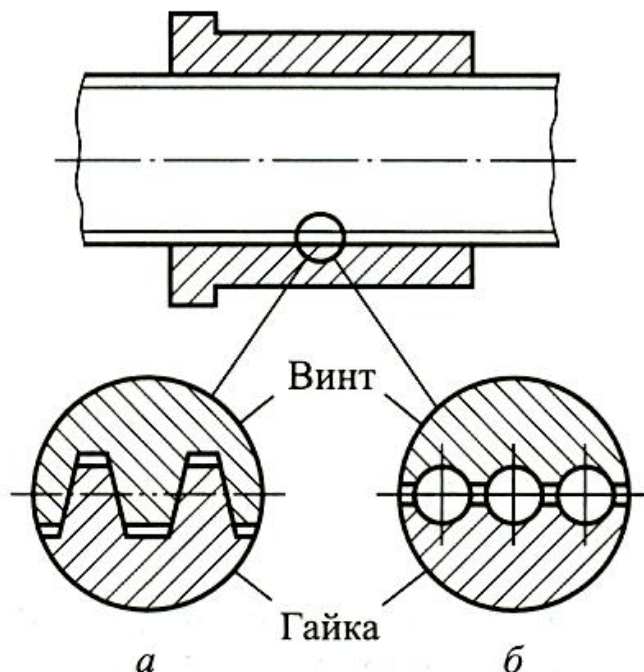


Рис. 1. Винтовая передача: а – винт-гайка скольжения, б – шариковинтовая.

Основным недостатком передач вида винт-гайка скольжения является высокая скорость относительного движения между сопрягаемыми витками резьбы винта и гайки. Это приводит к большим потерям на трение и низкому КПД, ограничению скоростей и ускорений выходного звена, необходимости использования дорогостоящих материалов для изготовления гаек, негативным температурным явлениям, быстрому изнашиванию резьбы и, как следствие, к снижению эксплуатационных параметров механизма.

В винтовых передачах качения между винтом и гайкой установлены промежуточные детали. В шариковинтовых передачах (ШВП) промежуточными деталями являются шарики (см. рис. 1б), а в роликовинтовых передачах – резьбовые ролики. Роликовинтовые передачи имеют целый ряд конструктивных исполнений, что является преимуществом, так как это позволяет делать выбор наиболее рациональной конструкции передачи для заданного привода и условий эксплуатации. Для силовых приводов чаще всего используются планетарные роликовинтовые передачи (ПРВП), см. рис. 2.

ПРВП состоит из многозаходных винта 1 и гайки 4, однозаходных резьбовых роликов 2, шейки которых входят с зазором в отверстия сепараторов 3, расположенных с двух торцов гайки.

Чтобы гайка относительно винта имела одну степень свободы, ролики дополнительно связывают с гайкой с помощью зубчатых зацеплений. Для этого на концах

каждого ролика непосредственно по резьбе нарезают наружные зубья, которые зацепляются с внутренними зубьями втулок 5, закрепленных в гайке. Осевое перемещение сепараторов ограничивается с помощью разрезных пружинных колец 6.

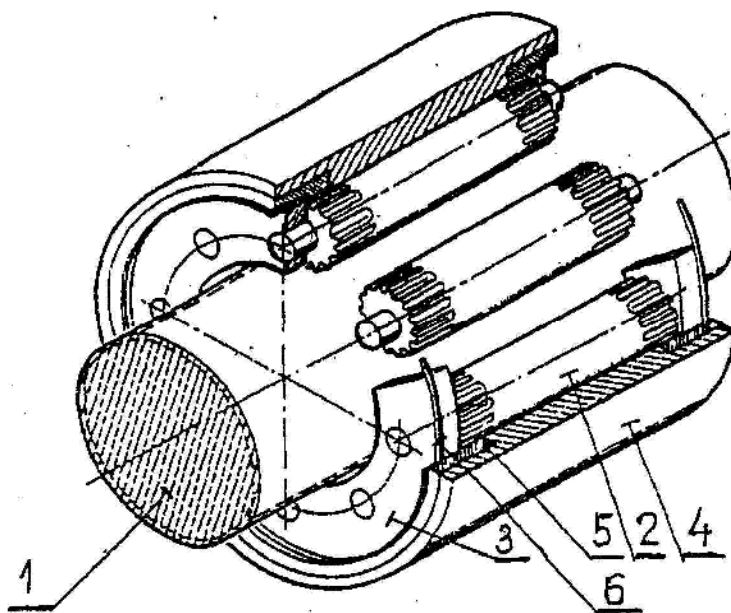


Рис. 2. Планетарный роликовинтовой механизм.

Следует отметить, что в настоящее время в промышленно-развитых странах ШВП серийно не производят, так как они заменены более перспективными ПРВП, которые превосходят ШВП по большинству важнейших параметров. Это установлено экспериментами и подтверждено опытом эксплуатации. Поэтому в качестве винтовых передач качения будем ориентироваться на ПРВП.

Основываясь на данные из каталога фирмы Exlar Corporation (США), в таблице 1 приведем сравнительные параметры передачи винт-гайка скольжения и ПРВП.

Таблица 1.

Параметры	Винт-гайка скольжения	ПРВП	Значимость параметра
Стоимость изготовления	низкая	высокая	важнейший
Нагрузочная способность	высокая	очень высокая	важнейший
Линейная скорость гайки	низкая	очень высокая	важнейший
Линейное ускорение гайки	низкое	очень высокое	важнейший
Осевая жесткость	очень высокая	очень высокая	важнейший
Стойкость к ударным нагрузкам	очень высокая	очень высокая	важнейший
КПД	около 0,4	0,8 – 0,9	важнейший
Обслуживание	простое	простое	важный

Установка и настройка	очень простые	очень простые	важный
Управление позиционированием гайки	очень простое	очень простое	важный
Точность позиционирования гайки	высокая	очень высокая	важнейший
Воздействие на окружающую среду	незначительное	незначительное	важный
Ресурс	низкий	очень высокий	важнейший

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует, что **передачи винт-гайка скольжения превосходят ПРВП только по одному из важнейших параметров – стоимости изготовления. По остальным важнейшим параметрам, за исключением осевой жесткости и стойкости к ударным нагрузкам, ПРВП превосходят передачи винт-гайка скольжения или даже существенно превосходят.** Что касается сопоставления параметров, обозначенных в таблице как «важные», то ПРВП и передачи винт-гайка скольжения равнозначны.

Высокая стоимость изготовления ПРВП объясняется необходимостью высокоточной обработки на поверхностях винта и гайки, имеющих высокую твердость, многозаходной резьбы, для чего используются специальные дорогостоящие многокоординатные станки с ЧПУ. Кроме того, на роликах нарезается высокоточная резьба со специальным фасонным профилем витков. Уменьшить стоимость изготовления ПРВП можно на специализированном производстве при серийном изготовлении передач, которые унифицированы и стандартизованы.

Наибольшая доля технологических издержек при производстве ПРВП идет на изготовление гайки, поэтому в МГТУ им.Н.Э.Баумана были разработаны и запатентованы безгаечные роликовинтовые передачи (БРВП) /1, 2/. В БРВП нет резьбовой гайки, они уступают ПРВП по нагрузочной способности и некоторым другим важнейшим параметрам, но дешевле ПРВП примерно на 1/3.

В итоге получилось, что выбор винтовой передачи для заданного привода ограничен тремя конструкциями: передачей винт-гайка скольжения, ПРВП и БРВП. Если передача винт-гайка скольжения не подходит по нагрузочной способности или быстродействию, то выбирать приходится ПРВП или БРВП, которые являются винтовыми передачами качения, то есть обеспечивают высокий КПД.

Если передача винт-гайка скольжения не обеспечивает заданный ресурс, то можно достичь его за счет плановых ремонтно-восстановительных работ. В этом случае, а также, если передача винт-гайка скольжения обеспечивает все важнейшие параметры, то выбирать приходится из трех перечисленных выше передач.

Отметим особенности мышления конструкторов и их начальников, включая самых высоких, которые выработались за годы советской власти и являются очень

устойчивыми и в настоящее время. Главный тезис – больше выпускаемой продукции и ниже ее стоимость. Тезис, в принципе, правильный, но он был доведен до абсурда, так как во имя этого тезиса в жертву приносили качество продукции, ее экономичность и оснащенность, внешний вид и многое другое. Низкое качество продукции обсуждали Аркадий Райкин и тележурнал «Фитиль», по поводу качества продукции издавались директивные документы партии и правительства, но проблему повышения качества продукции решить так и не удалось. Отсюда не решался вопрос о технологическом оборудовании, которое способно производить качественную продукцию. К этому следует добавить оторванность СССР и других стран социалистического лагеря от промышленно-развитых стран мира.

В СССР, производя токарные станки, в погоне за количеством оснащали их зачастую только трехкулачковым патроном и задним вращающимся центром. Стоимость оснастки составляло около 1% от стоимости станка. Зарубежные фирмы, производящие токарные станки, продавали их значительно более оснащенными и предлагали еще на заказ дополнительную специальную оснастку, чтобы расширить технологические возможности станков. При этом стоимость оснастки иногда превышала половину стоимости станка.

Ценообразование в СССР было искусственным и не отражало реального состояния дел. Цена электроэнергии для предприятий была неоправданно низкой, поэтому заниматься ее экономией не имело смысла. Известно / 3 /, что в червячных передачах при увеличении количества заходов червяка повышается КПД этих передач, но естественно повышается и их стоимость. Поэтому в западных странах, ориентирующихся на экономию энергии, число заходов червяка иногда превышало десять. В СССР государственный стандарт установил максимально возможное количество заходов червяка, которое равно четырем, то есть для экономии электроэнергии был поставлен надежный заслон во имя снижения стоимости изготовления. И таких примеров можно привести достаточно много.

Выбор для заданного привода предпочтительной конструкции винтовой передачи должен основываться не на привычные тезисы и лозунги, а на экономические расчеты. При этом важнейшими параметрами должны быть стоимость передачи и экономия энергии.

Рассмотрим следующий пример¹. *Задан электромеханический привод, для которого подходят: передача винт-гайка скольжения, ПРВП и БРВП. Мощность на выходном звене винтовой передачи $P_{\text{вых}} = 3,5$ кВт. Ресурс привода составляет 12 лет, в течение которых привод находится в работе примерно 10% времени.*

¹ В основу данного примера положена разработка реального привода с ПРВП.

Определим мощность на входном звене передачи $P_{ВХ}$ в кВт, приняв КПД: для передач винт-гайка скольжения $\eta_{ПМ} = 0,4$; для ПРВП $\eta_{ПМ} = 0,85$; для БРВП $\eta_{ПМ} = 0,85$

$$P_{ВХ} = P_{ВЫХ} / \eta_{ПМ} \quad (2)$$

Исходные и расчетные данные для удобства сравнения будем заносить в таблицу 2.

Определим мощность в кВт, которая расходуется винтовой передачей

$$\Delta P = P_{ВХ} - P_{ВЫХ} \quad (3)$$

Определим ресурс работы винтовой передачи в часах за 12 лет, с учетом 10% загрузки передачи в день (коэффициент суточной загрузки равен 0,1)

$$t_{\Sigma} = 12 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,1 \approx 10\,500 \text{ часов} \quad (4)$$

Определим суммарное количество электроэнергии в кВт × ч, которое требуется винтовой передаче для работы в течение ресурса

$$E_{\Sigma} = \Delta P \cdot t_{\Sigma} \quad (5)$$

Определим стоимость изготовления передач $C_{ИЗГ}$ в условиях серийного производства. Ориентировочно стоимость изготовления: передачи винт-гайка скольжения составляет около 6 000 рублей; ПРВП – 60 000 рублей; БРВП – 40 000 рублей, так как стоимость изготовления БРВП примерно на 1 / 3 дешевле стоимости изготовления ПРВП.

Определим расчетный тариф на электроэнергию (стоимость 1 кВт × ч) для промышленных предприятий в 2011 году. В России тарифы на электроэнергию для населения и для промышленности различны, различны они и для различных субъектов РФ. По данным департамента топливно-энергетического хозяйства Москвы в 2011 году тариф для промышленных предприятий Москвы составит 3 рубля за 1 кВт · ч (см. сайт Интернета). Анализ тарифов на электроэнергию в ряде субъектов РФ показал, что он изменяется в интервале от 1,4 до 3,5 рубля за 1 кВт · ч (см. сайты Интернета). По прогнозу указанного выше департамента электроэнергия будет дорожать из года в год. Примем для расчетов тариф

$$T_{ЭЛ.ЭН} = 2 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}. \quad (6)$$

Определим стоимость электроэнергии, которую надо заплатить за работу винтовой передачи в течение ресурса

$$C_{ЭЛ.ЭН} = E_{\Sigma} \cdot T_{ЭЛ.ЭН} \quad (7)$$

Определим суммарную стоимость, состоящую из стоимости изготовления винтовой передачи и стоимость электроэнергии, которую надо заплатить за работу передачи в течение ресурса

$$C_{\Sigma} = C_{ИЗГ} + C_{ЭЛ.ЭН} \quad (8)$$

Таблица 2

Расчетный параметр	Передача винт-гайка скольжения	Передачи качения	
		ПРВП	БРВП
Мощность на выходном звене винтовой передачи $P_{\text{ВЫХ}}$, кВт	3,5	3,5	3,5
Мощность на входном звене винтовой передачи $P_{\text{ВХ}}$, кВт	8,75	4.12	4.12
Мощность, которая расходуемая винтовой передачей ΔP , кВт	5,25	0,62	0,62
Ресурс винтовой передачи, ч	10 500	10 500	10 500
Количество электроэнергии, расходуемой винтовой передачей за ресурс, кВт · ч	55 125	6 510	6 510
Стоимость изготовления винтовой передачи $C_{\text{изг}}$, руб.	6 000	60 000	40 000
Стоимость электроэнергии, расходуемой винтовой передачей за ресурс $C_{\text{эл.эн}}$, руб	110 250	13 020	13 020
Суммарная стоимость изготовления винтовой передачи и электроэнергии, расходуемой передачей за ресурс C_{Σ} , руб	116 250	73 020	53 020

Сравнивая суммарную стоимость C_{Σ} для всех представленных передач, очевидным является эффективность использования передач качения ПРВП и БРВП, даже с заниженным тарифом на электроэнергию и предположением, что ее стоимость не будет повышаться за время эксплуатации привода, то есть в течение 12 лет. Следует также обратить внимание на мощность на входном звене представленных передач. Если входной вал передачи соединяется с валом электродвигателя, то мощность последнего равна почти 9 кВт для передачи винт-гайка скольжения и чуть более 4 кВт для ПРВП и БРВП. Двигатель мощностью 4 кВт имеет меньшие стоимость, габариты и вес, чем двигатель мощностью 9 кВт, что является дополнительным достоинством при выборе для заданного привода передачи качения ПРВП или БРВП.

Чтобы ПРВП и БРВП можно было использовать в различных приводах, необходимо освоить централизованное серийное изготовление этих передач в России. Следует отметить большую заинтересованность в ПРВП и БРВП оборонной и авиационной отраслей и аэрокосмической отрасли, учитывая, что для этих отраслей покупка передач у зарубежных фирм недопустима. Эффект по экономии электроэнергии при использовании винтовых передач качения очевиден, и средства, затраченные на освоение производства этих передач, очень быстро окупятся.

Контроль продукции машиностроения с позиций энергосбережения. Изделия машиностроения необходимо унифицировать и стандартизировать, что сулит большой экономический эффект, при проектировании машин, их производстве и ремонте. Однако

эти мероприятия не позволяют получить продукцию, обеспечивающую требуемое качество, так как являются документами на бумаге. В ряде ГОСТов представлены параметры качества, которым должна соответствовать продукция. Другие ГОСТы регламентируют конструкцию, размеры и другие параметры деталей, узлов, приспособлений и т.д. Из этих стандартных элементов и оригинальных деталей и узлов проектируется машина в целом. Отсюда есть возможность выбора различных стандартных и оригинальных элементов, а как показал, рассмотренный выше пример, один и тот же привод можно оснастить различными по конструкции передачами, все из которых могут быть стандартизованы, но обеспечивают различную совокупность параметров.

Наиболее действенным с позиций качества и энергосбережения мероприятием может быть сертификация продукции машиностроения, так как она позволяет контролировать производителей на соответствие требованиям технических регламентов, стандартов, сводов правил и т.д. Контроль возложен на независимые аккредитованные органы, имеющие испытательные лаборатории, в которых должны работать высококвалифицированные сотрудники, способные оценить всю совокупность параметров продукции.

ВЫВОДЫ

1. Энергосбережение является одной из важнейших проблем, которую надо решить для развития экономики и повышения жизненного уровня населения.
2. Одной из приоритетных отраслей экономики является машиностроение, в которое заложен очень большой потенциал по экономии электроэнергии.
3. Проектирование изделий машиностроения является сложной, многовариантной задачей. Выбор рационального варианта изделия должен учитывать совокупность различных по значимости параметров, важнейшим из которых является экономия энергии.
4. Выбор рационального варианта изделия должен основываться на экономические расчеты.
5. Большой эффект при экономии энергии может быть получен в подвижных соединениях деталей машин, находящихся под действием нагрузки, за счет перехода от трения скольжения к трению качения.
6. В России необходимо освоить серийное производство высокоэкономичных планетарных роликвинтовых передач и их разновидностей, которыми оснащаются ответственные изделия в различных отраслях.
7. Сертификация продукции должна гарантировать высокое ее качество и экономичность.