



Planetar uzatmalari bilan ta'minlangan elektromexatronik tizimlarining energiya samaradorligi

Nasima A. Maksudova

dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; nasimamaksudova4@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-6174-0763>

Dolzarbliyi: jahoning barcha mamlakatlarida uskunalar va ishlab chiqarish jarayonlarining energiya samaradorligini oshirish iqtisodiyotni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlaridan biriga aylandi. Zamona viy sanoatda iste'mol qilinadigan elektr energiyasining 60% gacha mexatronik elektr haydovchi tizimlaridan kelib chiqadi, bu esa energiya samaradorligini oshirish imkoniyatlarini tegishli tahlil qilish imkonini beradi.

Maqsad: energiya samaradorligi parametrlarini tahlil qilish va mexanik planetar uzatmalar samaradorligini, oshirish uchun mexatronik tizimlarning operatsion va elektr modullarini.

Usullari: tishli planetar mexanizmli elektr yuritmali mexatronik tizimlar nazariyasi va qiyosiy tahlil usullaridan foydalaniлади; elektromexatronik tizimdagи bir qismli planetar uzatmaning samaradorligini hisoblash tahlil qilinadi.

Natijalar: yuqori energiya samaradorligi uchun tishli planetar uzatmalarini va elektromexatronik modullardan foydalananish spiral viteslardan afzalroqdir.

Kalit so'zlar: elektr haydovchi, mexatronik tizim, energiya samaradorligi, samaradorlik, planetar uzatma, hisoblash.

Энергоэффективность электромехатронных систем с планетарными передачами

Насима А. Максудова

доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; nasimamaksudova4@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-6174-0763>

Актуальность: повышение энергоэффективности оборудования и производственных процессов во всех странах мира стало одним из приоритетных направлений развития экономики. В современной промышленности до 60% потребляемой электроэнергии приходится на мехатронные электроприводные системы, что делает актуальным анализ возможностей повышения их энергоэффективности.

Цель: анализ параметров энергоэффективности и КПД механических планетарных передач, используемых в электроприводных модулях мехатронных систем для их повышения.

Методы: используются теория электроприводных мехатронных систем с планетарными передачами и методы сравнительного анализа; анализируются расчеты КПД планетарных передач в составе электромехатронных систем.

Результаты: использование планетарных передач в электромехатронных модулях для повышения энергоэффективности предпочтительнее по сравнению с другими видами передач.

Ключевые слова: электропривод, мехатронная система, энергоэффективность, КПД, планетарная передача, расчёт.

Energy efficiency of electromechatronic systems with planetary gears

Nasima A. Maksudova

dots., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; nasimamaksudova4@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-6174-0763>

Relevance: improving the energy efficiency of equipment and production processes in all countries of the world has become one of the priority areas of economic development. In modern industry, up to 60% of the consumed electricity comes from mechatronic electric drive systems, which makes it relevant to analyze the possibilities of increasing their energy efficiency.

Aim: analysis of the parameters of energy efficiency and efficiency of mechanical planetary gears used in electric drive modules of mechatronic systems to improve them.

Methods: the theory of electric drive mechatronic systems with planetary gears and comparative analysis methods are used; calculations of the efficiency of planetary gears as part of electromechatronic systems are analyzed.

Results: the use of planetary gears in electromechatronic modules to improve energy efficiency is preferable compared to other types of gears.

Key words: electric drive, mechatronic system, energy efficiency, efficiency, planetary gear, calculation.



1. Введение (Introduction)

В работе рассматриваются проблемы повышения энергоэффективности сферы энергопотребления в промышленности, в которой расходуется большая доля вырабатываемой электроэнергии. При этом системы с электроприводами (современные электромехатронные модули) потребляют до 60% электроэнергии в промышленности, поэтому наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута за счёт повышения энергоэффективности электроприводных модулей и систем, что позволит обеспечить значительную экономию электроэнергии в промышленности [1,2].

Известно также, что повышение энергоэффективности производства и энергосбережение в любых сферах являются наиболее простыми и безопасными способами замены энергогенерирующих мощностей, так как затраты на экономию 1 кВт мощности обходятся в 4 - 5 раз дешевле, чем стоимость генерации вводимого 1 кВт мощности [3].

Современные электромехатронные системы с электроприводами и механическими передачами в большей мере определяют энергетические, стоимостные, точностные, весогабаритные и другие показатели таких систем. В работе анализируются компоновки и свойства электромехатронных приводов с планетарными передачами, которые отличаются широкими кинематическими возможностями, существенно меньшими габаритами и массой, по сравнению с другими типами зубчатых передач. В связи с этим планетарные передачи находят широкое применение в транспортных машинах, робототехнике, мехатронике; а в энергетике такие системы находят применение в конструкциях ветровых установок, мини ГЭС и др.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Мехатроника и мехатронные системы. Современные электромеханические приводы используют мехатронику - область науки и техники, основанную на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей и вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры). Мехатроника (альтернативное название - механотроника) активно применяется в современном производстве. Она позволяет создавать гибкие производственные комплексы, способные быстро перестраиваться под выпуск различной продукции. Это особенно важно в условиях современного рынка, где требуется быстро реагировать на изменение спроса. Мехатроника - это одно из новейших инженерных направлений в мире, которое, по данным ЮНЕСКО, входит в десятку самых перспективных и востребованных.

Мехатронную систему можно условно разделить на несколько частей:

- силовую, приводную, обеспечивающую мощность системы;
- механическую, обеспечивающую перемещение рабочих органов;
- управляющую, построенную на основе микропроцессоров или логических устройств;
- электронную, обеспечивающую передачу сигнала от датчиков к микропроцессорам и от микропроцессоров к исполнительным механизмам;
- программную, реализующую заданные алгоритмы управления.

Механическая часть приводов считается одной из ветвей мехатроники, где совместно с системами автоматического регулирования (САР) являются составными частями мехатронных систем.

Таким образом термину "мехатроника" можно дать следующее определение – это область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, электротехники, электроники, микропроцессорной техники, различных источников энергии, исполнительных электро-, гидро- и пневмоприводов, а также интеллектуального управления ими, ориентированная на создание и эксплуатацию агрегатов современных автоматизированных производственных систем [4].

Целесообразно рассмотреть ещё одно определение мехатроники, согласно которому мехатроника — область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование, производство и эксплуатацию качественно новых модулей, систем, машин и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями. Данное определение более явно указывает на особый характер связей в мехатронной системе - синергетическое объединение её компонентов. В электромеханических системах её компоненты взаимосвязаны определённым образом; эти связи организованы так, чтобы обеспечить требуемые механические движения при определённых энергозатратах. Необходимо обратить внимание на органическое единство задач, решаемых механикой и электроприводом, что позволяет рассматривать каждый из них в качестве важного и необходимого элемента мехатронной системы [5,6]. Отметим также, что исторически мехатроника развилась из электромеханики и,



опираясь на её достижения, идёт дальше путём системного объединения электромеханических систем с компьютерными устройствами управления, встроенными датчиками и интерфейсами.

Цель мехатроники — создание качественно новых, интеллектуальных мехатронных модулей движения, а на их основе — энергоэффективных интеллектуальных машин и систем.

Обобщённая структура мехатронных систем. В составы мехатронных систем, в качестве изначальных элементов разной физической природы, могут входить электронные, цифровые, механические, электротехнические, гидравлические, пневматические, информационные и другие элементы; их собирают вместе для получения от системы качественно нового результата, которого невозможно достичь от каждого отдельного элемента.

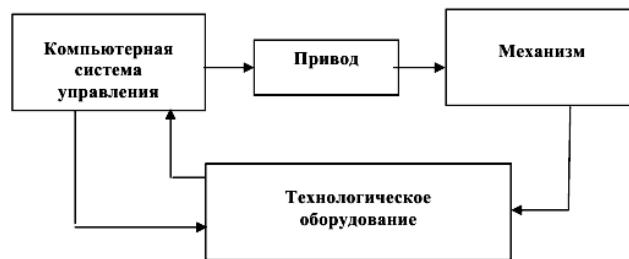


Рис.1. Структура электромехатронной системы [5]

Fig. 1. The structure of the electro-mechatronic system [5]

В наши дни в приводных системах, в соответствующих случаях, имеется тенденция применения мехатронных электроприводов с регулируемой планетарной передачей. Подобные мехатронные приводы имеют планетарную передачу с гидродинамическим регулированием, предназначенную для диапазона мощностей до нескольких мегаватт и частот вращения до 20000 об/мин. Срок службы планетарных передач превышает срок службы частотных преобразователей в 3 раза. Общий коэффициент полезного действия приводной мехатронной системы до 2 % выше, чем у привода с электронным регулированием частоты вращения. Проведённые исследования подтверждают тенденцию модернизации электроприводов в электроэнергетике от нерегулируемых - к дросселированным, с системой управления дросселей и клапанов; далее, к частотному регулированию асинхронных приводных электродвигателей и внедрению мехатронных приводов [6].

Вопросы энергосбережения, обусловленные ростом стоимости энергии относятся и к технологическим машинам с электроприводными мехатронными системами, являющимися одним из основных типов потребителей [1,2,7]. В современных технологических машинах с мехатронными системами большое применение получили зубчатые планетарные механизмы. При этом количество конструкций исполнительных механизмов чрезвычайно велико, а количество типовых конструкций передаточных механизмов ограничено [8].

Планетарные передачи. Планетарными называют механические передачи, имеющие колеса с перемещающимися геометрическими осями (рис.2.). Ведущим в планетарной передаче может быть либо центральное колесо Z_1 , либо водило H . Наиболее распространённая простая однорядная планетарная передача состоит из центрального колеса Z_1 с наружными зубьями (солнечное колесо), неподвижного центрального колеса Z_3 с внутренними зубьями и водила H , на котором закреплены оси планетарных колёс или сателлитов Z_2 .

Сателлиты обкатываются по центральным колёсам и вращаются вокруг своих осей, т.е. совершают движение, подобное движению планет. Водило вместе с сателлитами вращается вокруг центральной оси. Если в планетарной передаче сделать подвижными все звенья, т.е. оба колеса и водило, то такую передачу называют дифференциалом. При помощи дифференциала одно движение можно разложить на два или два сложить в одно.

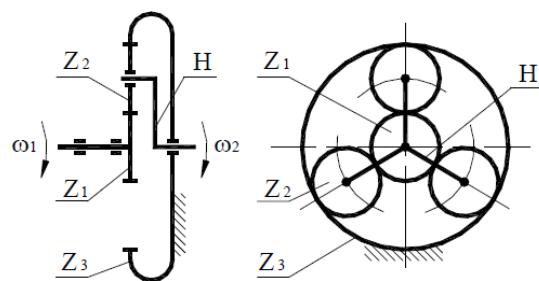


Рис. 2. Планетарная передача
Fig. 2. The planetary gear

Типовые схемы передаточных механизмов в большинстве случаев отработаны, в том числе с позиций энергосбережения и повышения эффективности, а передаточные механизмы унифицированы; многие из них

стандартизированы; такие механизмы применяются в самых различных машинах и механических устройствах. Отсюда следует, что при разработке мехатронных систем наибольший эффект энергосбережения может быть получен при проектировании и эксплуатации исполнительных механизмов машин, так как всегда имеются резервы по экономии энергии, за счёт повышения КПД и уменьшения потерь.

Ниже приводятся некоторые расчёты механической части и КПД (рис.3) мехатронной системы, а также анализ результатов.



Определение КПД планетарного механизма. Рассмотрим соотношение между моментами и силами, действующими на механизмы в целом и на отдельные его звенья.

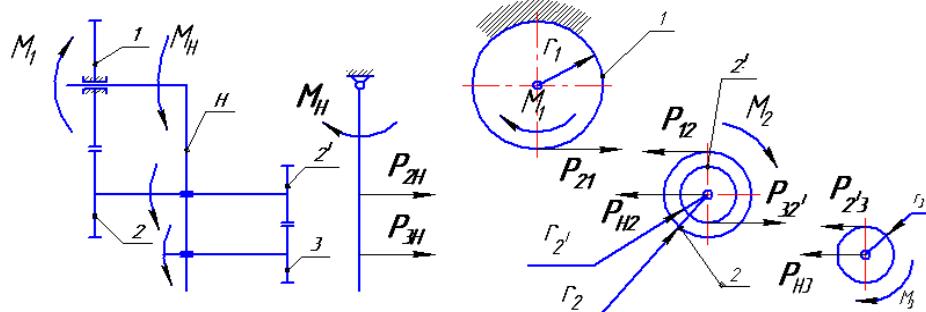


Рис.3. К определению КПД планетарного зубчатого механизма: а) схема механизма; б) отдельные звенья с приложенными к ним силами

Fig. 3. To determine the efficiency of a planetary gear mechanism: a) mechanism diagram; b) individual links with forces applied to them

Обозначим момент на неподвижном колесе 1 через M_1 (реактивный или опорный момент), момент на ведущем водиле Н - через M_H , момент на ведомом колесе 2 - M_2 , колесе 3 - M_3 .

Если пренебречь потерями на трение в зубьях и опорах, можно написать уравнение мощности для всего механизма в форме:

$$M_1 \omega_1 + M_H \cdot \omega_H + M_2 \cdot \omega_2 + M_3 \cdot \omega_3 = 0; \quad (1)$$

В уравнение (1) входит алгебраическая сумма мощностей, подводимых и отводимых от механизма.

Моменты M_1, M_2, M_H, M_3 - так же связаны между собой уравнением равновесия всех внешних моментов:

$$M_1 + M_2 + M_H + M_3 = 0. \quad (2)$$

Моменты, входящие в уравнения (1) и (2) могут быть выражены через окружные усилия на колёсах и радиусы колёс. Рассмотрим в отдельности равновесие каждого из звеньев, входящих в состав механизма и составим схему для каждого звена редуктора в профильной плоскости.

На колесо 1 действует момент M_1 и сила P_{21} от колеса 2. На звено, состоящее из сателлитов 2 и 2' - сила P_{12} от колеса 1, сила $P_{32'}$ от колеса 3 и сила P_{H2} от водила Н. На колесо 3 действует сила P_{23} от колеса 2, P_{H3} от водила Н действует момент M_3 .

Углами наклона реакций в высших парах можно пренебречь ввиду их несущественного влияния на коэффициент полезного действия передачи.

Все указанные силы могут быть выражены через соответствующие моменты и радиусы r_1, r_2, r_2', r_3 колес 1, 2, 2' и 3.

Из уравнения равновесия звеньев 1, Н и 3 получаем:

$$P_{21} = \frac{M_1}{r_1}; \quad (3)$$

$$P_{2H} = \frac{M_H}{r_1 + r_2}; \quad (4)$$

$$P_{3H} = \frac{M_H}{r_1 + r_2 + r_2' + r_3}; \quad (5)$$

$$P_{23} = \frac{M_3}{r_3}. \quad (6)$$

Из уравнения равновесия звена, состоящего из сателлитов, определяем направление и величины сил $P_{32'}$ и P_{H2} :

$$P_{12} \cdot r_2 = P_{32'} \cdot r_{2'} \Rightarrow \text{откуда } P_{32'} = P_{12} \cdot \frac{r_2}{r_{2'}}. \quad (7)$$

$$P_{12} \cdot (r_2 - r_2^1) = P_{H2} \cdot r_2^1 \Rightarrow P_{H2} = \frac{P_{12}(r_2 - r_2^1)}{r_2^1}. \quad (8)$$



Также имеем:

$$P_{12} = -P_{21}; \quad P_{32'} = -P_{23}; \quad P_{H2} = -P_{2H}; \quad P_{H3} = -P_{3H} \quad (9)$$

Рассматриваем формулу передаточного отношения планетарного зубчатого механизма:

$$i_{13}^H = \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_3 - \omega_H} = (-1^2) \cdot \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2^H} = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2}. \quad (10)$$

Из уравнения (7) имеем:

$$\frac{r_2}{r_2'} = \frac{P_{32'}}{P_{12}}.$$

Тогда равенство (10) примет вид: $\frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_3 - \omega_H} = \frac{P_{32'} \cdot r_3}{P_{12} \cdot r_1}$.

Получим:

$$P_{12} \cdot r_1 (\omega_1 - \omega_H) = P_{32'} \cdot r_3 (\omega_3 - \omega_H); \quad (11)$$

т.к. $\omega_1 = 0$, при неподвижном колесе.

$$\text{Имеем:} \quad -P_{12} \cdot r_1 \cdot \omega_H = P_{32'} \cdot r_3 (\omega_3 - \omega_H); \quad (12)$$

т.к.

$$M_3 = P_{32'} \cdot r_3; \quad P_{12} \cdot r_1 = M_1;$$

то имеем:

$$-M_1 \cdot \omega_H = M_3 (\omega_3 - \omega_H); \quad (13)$$

или

$$-N_1^H = N_3^H. \quad (14)$$

Правая и левая части равенства – это мощности в паре колёс (находящихся в зацеплении) механизма, который мы рассматриваем в предположении о неподвижности водила Н.

Таким образом, мощность в зацеплении пары колёс равняется моменту, передаваемому данному колесом, умноженному на угловую скорость этого колеса относительно водила. Мощность в зацеплении характеризует возможные потери в механизме.

Чем больше эта мощность, тем больше потери и тем меньше коэффициент полезного действия. В нашем приводе, ведущим звеном является водило Н. Тогда мощность N_1 на колесе 1 является мощностью сил, производящим сопротивление, а мощность N_H на водиле Н оказывается мощностью движущихся сил и равна:

$$N_H = N_1 + N_T; \quad (15)$$

где N_T – мощность, теряемая на трение в кинематических парах; т.к.:

$$N_1 = 0; N_H = N_T. \quad (16)$$

Таким образом η – КПД механизма при ведущем водиле:

$$\eta_{H1} = \frac{N_1}{N_1 + N_T} = \frac{1}{N_T}; \quad (17)$$

т.к. $N_1 = 0$, то колесо 1 – неподвижно. Здесь $N_T = M_1 (\omega_1 - \omega_H) |\varphi_H|$;

где φ_H – коэффициент потерь в механизме. $\omega_1 \neq 0$; т.к. колесо 1 неподвижно, имеем:

$$N_T = M_1 \cdot \omega_H \cdot \varphi_H.$$

Общий коэффициент полезного действия механизма: $\eta_H = \eta_{12} \cdot \eta_{23}$;

и коэффициент потерь: $\varphi_H = 1 - \eta_H$, то $\eta_H = \frac{1}{1 + (1 - \eta_H) |\varphi_H|}$.

Теперь имеем передаточное отношение $i_{H1} = \frac{1}{i_{1H}} = \frac{1}{1 - i_{13}^H} = \frac{1}{1 - (-1^2) \cdot \frac{z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_2}}$.

Очевидно, что при ведущем водиле КПД планетарной передачи будет больше КПД простой передачи для всех положительных значений: $i_{14} \geq \frac{\eta_{13}}{1 + \eta_{12}}$.

Расчёты показывают, что общий КПД механической планетарной части совместно с электроприводом будет: $\eta = \eta_H \cdot \eta_E = 0,72 \div 0,85$; где η_E – КПД электропривода.

Известно, что в таком случае для многоступенчатой передачи, включающей k последовательно соединенных ступеней, общий КПД равен произведению КПД отдельных ступеней:

$$\eta_{общ} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \cdot \eta_{k-1} \cdot \eta_k.$$



Следовательно, КПД системы, содержащей ряд последовательных компонентов, всегда будет меньше КПД любой из них.

3. Результаты (Results)

Системы с планетарными передачами отвечают ряду требований: высокий КПД, габариты, металлоёмкость (масса), условия эксплуатации, себестоимость, унификация, ремонтопригодность, соответствующие динамические характеристики, уровень шума, энерго- и ресурсосбережение и др. [6].

Энергоэффективность в электромеханических, электромехатронных системах, как правило, сводится к увеличению КПД и снижению потерь мощности (энергии). При проектировании и эксплуатации мехатронных устройств в системах уравнений должны учитываться зависимости, существующие между информацией, массой и энергией, а также результаты мероприятий по повышению энергоэффективности. Вышеприведённые расчёты показали высокий КПД планетарных передач и возможность использования в различных электромехатронных системах. Максимальный КПД планетарных передач $\eta = 0,96-0,99$.

Имеются и другие достоинства планетарных зубчатых передач: • компактность и малая масса; • реализация больших передаточных отношений; • малая нагрузки на опоры; • большого коэффициента полезного действия; • высокая кинематическая точность; • жёсткость и надёжность.

В зависимости от порядка наложения связей на звенья планетарные передачи могут использоваться как для суммирования нескольких вращательных движений, так и для их разделения между несколькими ведомыми валами.

Работы по созданию зубчатых плавно регулируемых передач с зубчатыми колёсами привели к разработке ряда адаптивных зубчатых передач являющихся альтернативой частотного регулирования электроприводов. Конструктивно наиболее простой вариант зубчатой плавно регулируемой передачи можно реализовать на основе планетарных передач. Очевидно, что активное регулирование передаточного отношения этой передачи должно основываться на наличии управляемых элементов (параметров) и механизма управления ими. КПД механизма играет важную роль в проектировании, разработке и эксплуатации технических систем, помогая достигать лучших результатов в эффективности, энергосбережении и надёжности.

4. Обсуждение (Discussion)

Существует большое количество типов планетарных передач. Выбор типа передачи определяется ее назначением. Наиболее широко в машиностроении применяется однорядная планетарная передача. Эта передача имеет минимальные габариты и применяется в силовых и вспомогательных приводах. Для получения больших передаточных отношений в силовых приводах применяют многоступенчатые планетарные передачи, представляющие собой последовательное соединение однорядных планетарных передач [8-9].

Достоинства планетарных передач. 1. Большой КНД, малые габариты и масса (передача вписывается в размеры корончатого колеса). Это объясняется тем, что мощность передается по нескольким потокам, численно равным числу сателлитов, поэтому нагрузка на зубья в каждом зацеплении уменьшается в несколько раз.

2. Благодаря соосности ведущих и ведомых валов эти передачи удобны для компоновки машин.

3. Планетарные передачи работают с меньшим шумом, чем обычные зубчатые, что связано с меньшими размерами колес и замыканием сил в механизме. При симметричном расположении сателлитов силы в передаче взаимно уравновешиваются.

4. Малые нагрузки на опоры, что снижает потери в них, увеличивая КПД.

5. Конструкция передачи позволяет достичь больших передаточных отношений при малом числе колёс и малых габаритах.

Недостатки. 1. Повышенные требования к точности изготовления и монтажа передачи.

2. Изменение и снижение КПД передачи с увеличением передаточного отношения.

5. Заключение (Conclusion)

В настоящее время электромехатронными системами как объектами исследований занимаются многие научные коллективы; в этой сфере необходимо решать широкий круг задач, в числе которых - повышение энергоэффективности таких систем. Необходим системный подход к решению задачи комплексного повышения КПД многокомпонентных мехатронных систем. Необходимо создать и постоянно пополнять базу данных по применению мехатронных систем в



различных направлениях техники, развитие методик кинематических расчетов, выбора типа механических элементов привода, мощности двигателей, повышение энергоэффективности и других параметров мехатронных систем.

Анализ показывает, что в соответствующих случаях наиболее эффективными в качестве рабочего механизма привода электромехатронных систем являются планетарные, со сдвоенными сателлитами.

В сателлитах планетарных механизмов увеличивается КПД по сравнению с обычными механизмами: сначала при движении относительно своего ведила, а затем за счет переносного движения основного ведила.

ЛИТЕРАТУРА

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод /Под ред. И.Я. Браславского. –Москва: ACADEMA. 2004. -202 с.
2. URL: <https://dzen.ru/a/ZsjrDwpKNRs8YFui?ysclid=m4kunhtz4a376323805>. К вопросу энергосбережения в электромеханических системах. [Электронный ресурс]. Опубликовано 14.02.2022.
3. Лезнов Б.С. Технологические основы использования регулируемого электропривода в насосных установках. //Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2012.-№ 5(53).-С.24-25.
4. Электропривод в мехатронных технологиях. /Доклады научн.-практ семинара, 3 февраля 2009 г, -М.:Издательский дом МЭИ. 96 с.
5. Готлиб Б.М. Введение в специальность «Мехатроника и робототехника».–Екатеринбург:УрГУПС, 2012. -134 с.
6. Основы мехатроники и робототехники. /сост. В.А. Савельев. –Гомель. 2018. -51 с.
7. Егоров О.Д. Прикладная механика мехатронных устройств: учебное пособие. -М.: ФГБОУ ВПО МГТУ “Станкин”, -2013. - 229 с.
8. Эффективное управление насосами и компрессорами. Регулируемая планетарная передача Vorecon. [Электронный ресурс]. URL:<https://d2euiryrvxi8z1.cloudfront.net/asset/445934742530/199f80f3e176482d8f5d1bd1413f4ab9> (09.02.2020).
9. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы: учеб. пособие/ - Ростов н/Д: Феникс, 2006. - 320 с.

REFERENCES

1. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. Energy-saving asynchronous electric drive / Edited by I.Ya. Braslavsky. - Moscow: ACADEMA. 2004. - 202 p. (In Russ.).
2. URL: <https://dzen.ru/a/ZsjrDwpKNRs8YFui?ysclid=m4kunhtz4a376323805>. On the issue of energy saving in electromechanical systems. [Electronic resource]. Published 02/14/2022.
3. Leznov B.S. Technological foundations of using an adjustable electric drive in pumping units. // Water purification. Water treatment. Water supply. 2012. - No. 5 (53). - P. 24-25. (In Russ.). (In Russ.).
4. Electric drive in mechatronic technologies. /Reports of the scientific and practical seminar, February 3, 2009, -M.: Publishing house MPEI. 96 p. (In Russ.).
5. Gotlib B.M. Introduction to the specialty "Mechatronics and Robotics". - Ekaterinburg: Ural State Transport University, 2012. -134 p. (In Russ.).
6. Fundamentals of mechatronics and robotics. /compiled by V.A. Saveliev. -Gomel. 2018. -51 p. (In Russ.).
7. Egorov O.D. Applied mechanics of mechatronic devices: a tutorial. -M.: FGBOU HPO MSTU "Stankin", -2013. - 229 p. (In Russ.).
8. Efficient control of pumps and compressors. Adjustable planetary gear Vorecon. [Electronic resource]. URL:<https://d2euiryrvxi8z1.cloudfront.net/asset/445934742530/199f80f3e176482d8f5d1bd1413f4ab9> (02/09/2020). (In Russ.).
9. Karnaughov N.F. Electromechanical and mechatronic systems: textbook / - Rostov n / D: Phoenix, 2006. - 320 p. (In Russ.).