

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АГРЕГАТА ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ТИПА

В.В. Дьячков, А.Л. Шакиров

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Исследована модель дизель-электрического агрегата, содержащая роторный двигатель внутреннего сгорания (ДВС), соединенный посредством рекуператора с электрической машиной. Рекуператор представляет собой систему двух маховиков, связанных шатуном. Показано, что рекуператор обладает свойствами, необходимыми как для штатной работы ДВС, так и для работы электрической машины. Подтверждена возможность получения электроэнергии при помощи электрической машины возвратно-вращательного типа.

Введение

Дизельная электростанция (ДЭС) - энергетическая установка, основной частью которой является дизель-электрический агрегат (ДЭА), содержащий генератор электрического тока, приводимый во вращение дизельным двигателем. Различают стационарные и передвижные ДЭС. В ДЭС, особенно стационарных, широко применяются системы автоматизации. Передвижные ДЭС используются в качестве основного, резервного или аварийного источника электропитания. На транспорте ДЭС применяются в качестве энергетических установок. На ДЭС устанавливают четырехтактные либо двухтактные поршневые дизельные двигатели. В двухтактных двигателях используются системы турбонаддува, включающие центробежный компрессор, приводимый во вращение выхлопными газами. Преимущества ДЭС - высокая экономичность, устойчивая работа, легкий и быстрый запуск. Недостатки - сравнительно небольшие КПД, моторесурс, большие габариты и высокая сложность устройства.

Предлагаемая здесь модель ДЭА состоит из роторного дизельного двигателя возвратно-вращательного типа, соединенного при помощи рекуператора с электрической машиной. Рекуператор представляет собой систему двух маховиков, связанных шатуном. При работе оба маховика совершают возвратно-вращательные движения. Получено аналитическое решение для рекуператора. Эксперименты проводились на действующем макете. Макет представляет собой систему двух связанных шатуном маховиков с установленными на осях маховиков электрическими машинами. Шарниры шатуна имеют возможность установки под любым углом относительно магнитных полюсов якоря. Предусмотрены возможности изменения расстояния между осями маховиков и ступенчатого изменения длины шатуна. Каждый маховик макета снабжен стрелочным измерителем и градусной шкалой.

Методика эксперимента заключалась в видеосъемке работающего макета цифровым фотоаппаратом с частотой 30 кадров в секунду. Проводилась съемка серии видеоклипов с различными расстояниями между осями маховиков и длинами шатуна. С каждого кадра снимались показания углов отклонения обоих маховиков. Исследовались зависимости углов отклонения маховиков от времени, а также проводились осциллографические наблюдения за электрическими импульсами, генерируемыми при работе электрической машины.

Литературный обзор

Двигатели внутреннего сгорания получили широкое распространение благодаря своей компактности, высокой удельной мощности и независимости от внешних источников энергии. В работе [1] приводится описание поршневого четырехтактного карбюраторного двигателя внутреннего сгорания. Двигатель состоит из кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов, а также систем охлаждения, смазки, питания и зажигания. Поршневой двигатель внутреннего сгорания имеет большую массу и сложное устройство вследствие наличия в его составе кривошипно-шатунного механизма с большим количеством колен. Камеры сгорания пространственно отдалены от коленчатого вала, по этой причине газорас-

пределительный механизм имеет сложную, громоздкую и инерционную конструкцию. Двигатель имеет низкий крутящий момент вследствие того, что на протяжении рабочего такта величина момента сил, действующего на колено коленчатого вала со стороны поршня, возрастает от нуля до максимального значения и опять понижается до нуля. Высокая токсичность выхлопных газов в значительной степени обусловлена выгоранием следов масла, остающихся на внутренней поверхности цилиндров. В поршневом двигателе принципиально невозможно осуществление эффективного жидкостного охлаждения поршней, вследствие чего они работают в условиях перегрева. В момент выпуска из цилиндра отработавших газов образуется ударная волна, уровень звука которой необходимо понижать при помощи громоздкого и сложного глушителя. Трения поршней о стенки цилиндров уменьшает КПД и ресурс работы двигателя. Используемый в двигателе четырехтактный цикл приводит к непроизводительному износу деталей и понижению удельной мощности, поскольку на один рабочий такт приходится три холостых такта. Необходимо также отметить высокий уровень вибраций, возникающих при работе двигателя. Эти недостатки имеют неустранимый характер, поскольку их причины кроются в пороках принципиальной схемы поршневого ДВС.

В работе [2] приводятся кривые зависимостей пути, скорости и ускорения поршня кривошипно-шатунного механизма ДВС в зависимости от угла поворота маховика при его вращении с постоянной угловой скоростью (рис. 1).

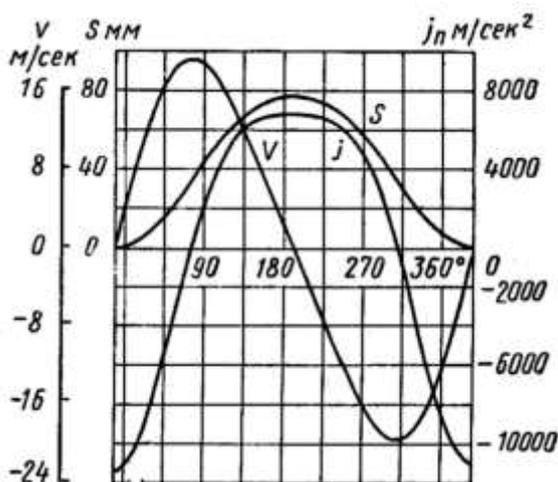


Рис. 1. Путь, скорость и ускорение поршня двигателя К-750 ($n=460$ об/мин)

Из графика для пути S следует, что вблизи “мертвых” точек, т.е., в экстремумах функция имеет незначительную скорость изменения, поршень плавно останавливается и начинает движение в обратную сторону. В эти моменты времени происходит впрыск порции горючего и его воспламенение. В районах точек перегиба функция имеет значительную скорость изменения. В эти моменты горячие газы совершают основную работу по перемещению поршня или же поршень вытесняет отработавшие газы.

В работе [3] приводится описание рекуператора. Рекуператор (рис. 2) представляет собой систему двух маховиков, связанных шатуном. Его работа описывается следующим образом: “Если разогнать правый маховик, то левый (положение а) начнет плавно разгоняться и достигнет (положение б) максимальной частоты вращения. Правый маховик в этот момент, отдав всю кинетическую энергию, останавливается. Вращаясь дальше, левый маховик разгоняет правый (положение в), и тот, остановившись, запустит левый (положение г). То есть, как вы догадались, следующим будет (положение а) и процесс повторится еще и еще раз. На модели разгон и торможение маховиков после легкого толчка повторялись десятки раз. Это свидетельство высокого КПД рекуперации”.

Авторы предлагают использовать это устройство в качестве элемента машины, совершающей возвратно-вращательные движения, в частности, в качестве манипулятора робота. В

работе не предоставлено никаких количественных оценок или экспериментальных данных. При анализе описания поведения первого и второго маховиков можно сделать вывод, что первый подчиняется закону синусов, а второй - закону косинусов.

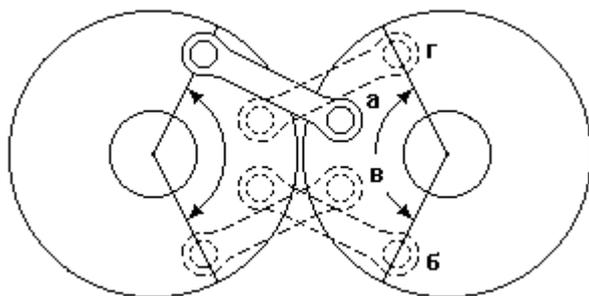


Рис. 2. Схема рекуператора с обозначением рабочих фаз

В патенте РК [4] приводится описание роторного ДВС возвратно-вращательного типа, который содержит камеру с внутренней рабочей поверхностью вращения, на оси симметрии которой на подшипниках расположен ротор в виде цилиндрического вала с плоскими радиальными лопатками. Рабочие поверхности могут представлять собой, например, поверхности цилиндра или сферы. Форма лопатки соответствует образующей рабочей поверхности вращения камеры. В пазах лопаток расположены пластины уплотнения. В камере между лопатками расположены неподвижные перегородки с пластинами уплотнения. Перегородки делят камеру на секции, лопатки делят каждую секцию на полости. На хвостовике вала ротора закреплен маховик, связанный шатуном с дополнительным маховиком. Может производиться изменение расстояния между маховиками. Двигатель включает механизм газораспределения, систему жидкостного охлаждения корпуса и ротора, системы зажигания, питания и смазки. В конструкции двигателя могут широко использоваться новые технологии. ДВС отличается уменьшенным расходом топлива и пониженной токсичностью выхлопных газов, простотой конструкции, большой литровой мощностью, КПД, ресурса, крутящего момента. Также отмечается уменьшение рабочего шума, вибраций, возможность работы двигателя в дизельном режиме и на различных топливах.

Большинство современных энергетических установок наряду с очевидными достоинствами имеют существенные недостатки. В связи с этим необходим поиск новых путей получения экологически чистой дешевой энергии. Предложенная здесь модель ДЭА может быть использована при проектировании установок, предназначенных для выработки электроэнергии.

Физическая модель устройства

Модель дизель-электрического агрегата (рис. 3) содержит роторный двигатель внутреннего сгорания 1, соединенный посредством рекуператора 2 с электрической машиной 3. Двигатель 1 предназначен для работы по дизельному циклу. Устройство рекуператора 2 описано выше (рис. 2). Рекуператор предназначен для реализации циклического процесса в виде возвратно-вращательного движения ротора двигателя в пределах определенного угла, накопления механической энергии, плавного вывода ротора из “мертвых” точек и для передачи энергии электрической машине. Двигатель 1 содержит цилиндрический корпус 4, на оси симметрии которого на подшипниках 5 установлен ротор в виде вала 6 с закрепленными на нем двумя лопатками 7. Пространство, ограниченное внутренними стенками корпуса 4, образует рабочую камеру.

Перегородки делят камеру на две секции. Лопатки 7 имеют скользящий контакт с внутренними рабочими поверхностями корпуса и делят каждую секцию на две полости. Более подробную информацию о двигателе можно получить из работы [4], в которой представлены

различные варианты его исполнения. Электрическая машина 3 содержит обмотки 8 статора и магнитный якорь 9, установленный на валу 10 с возможностью вращения на подшипниках. Электрическая машина может быть оснащена системой запуска двигателя, состоящей из источника питания и схемы управления, которая формирует импульсы электрического тока, синхронизированные с колебаниями рекуператора. В режиме запуска двигателя эти импульсы подаются на обмотки 8 и вызывают пульсации их магнитного поля. Магнитное поле обмоток статора взаимодействует с магнитным полем якоря 9, что приводит к его колебаниям в соответствии со свободными колебаниями рекуператора. Колебания рекуператора передаются на ротор двигателя, этим обеспечивается степень сжатия, необходимая для его запуска. После запуска двигателя в его полостях реализуется обычный рабочий цикл ДВС и он сам становится источником механической энергии, необходимой для работы рекуператора. В режиме генерации якорь 9 электрической машины совершает возвратно-вращательные движения в соответствии с колебаниями рекуператора. При этом магнитное поле якоря пересекает обмотки статора 8, в которых согласно закону электромагнитной индукции возникают импульсы напряжения. Во время прямого хода якоря индуцируются импульсы положительного напряжения, во время обратного хода - отрицательного. Электрическая машина вырабатывает переменный ток, который может быть преобразован в постоянный.

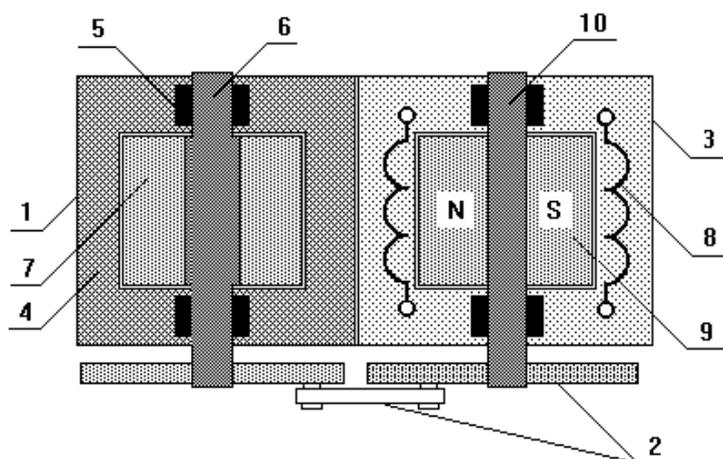


Рис. 3. Фронтальный разрез дизель-электрического агрегата

1 - двигатель; 2 - рекуператор; 3 - электрическая машина; 4 - корпус двигателя; 5 - подшипник; 6 - вал ротора двигателя; 7 - лопатка ротора; 8 - обмотка статора; 9 - магнитный якорь; 10 - вал электрической машины

Решение задачи системы двух маховиков, связанных шатуном

Проведем анализ механических свойств рекуператора (рис. 2). Рассмотрим его идеализированную модель, в которой отсутствуют силы трения, а масса шатуна пренебрежимо мала. Моменты инерции первого и второго маховиков I равны между собой. Расстояние между осью маховика и осью шатуна обозначим \vec{r} (остальные обозначения общепринятые). Момент сил, действующий со стороны шатуна на маховик, равен

$$\vec{M}(t) = [\vec{r}\vec{F}(t)].$$

Переходим к скалярному написанию моментов сил, поскольку все колебания происходят в одной плоскости. Напишем уравнение динамики вращательного движения для маховика

$$M(t) = I \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2}. \quad (1)$$

Из анализа рис. 2 и изучения характера колебаний обоих маховиков ясно, что маховики совершают гармонические колебания, причем колебания имеют сдвиг фаз, равный $\pi/2$.

Предположим теперь, что моменты сил также подчиняются гармонической закономерности, тогда запишем для любого из маховиков

$$M(t) = M_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (2)$$

Подставим уравнение (2) в уравнение (1), проинтегрируем и получим уравнения для угловых скоростей

$$\omega(t) = \int \frac{M(t)}{I} dt = \int \frac{M_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)}{I} dt = \omega_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0) + \omega_0. \quad (3)$$

Получим уравнения для углов поворота маховиков как функцию времени, для этого проинтегрируем уравнение (3)

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \int [\omega_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0) + \omega_0] dt = -\varphi_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0) + \omega_0 t + \varphi_0. \quad (4)$$

Константа ω_0 имеет физический смысл в том случае, когда маховик помимо совершения гармонических колебаний под действием внешнего момента сил совершает дополнительное вращение с постоянной угловой скоростью. Однако в нашем случае этого не наблюдается, поэтому можно приравнять этот член к нулю. Начальный угол мы также можем выбирать произвольно, в том числе принять его равным нулю.

Напишем уравнения для скоростей обоих маховиков при сдвиге фаз между ними $\varphi_0 = \pi/2$.

$$\omega_1(t) = \omega_{\max} \sin \omega t; \quad (5)$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \omega_{\max} \cos \omega t. \quad (6)$$

Напишем уравнения для кинетической энергии рекуператора, т. к. она складывается из энергий ее маховиков

$$T(t) = T_1(t) + T_2(t) = const; \quad (7)$$

$$T(t) = \frac{I\omega_1(t)^2}{2} + \frac{I\omega_2(t)^2}{2} = const. \quad (8)$$

Подставим уравнения (5) и (6) в уравнение (8)

$$T = \frac{I(\omega_{\max} \sin \omega t)^2}{2} + \frac{I(\omega_{\max} \cos \omega t)^2}{2}, \quad (9)$$

тогда можем записать

$$T = \frac{I\omega_{\max}^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t)}{2}. \quad (10)$$

И окончательно

$$T(t) = T_{\max} (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t). \quad (11)$$

График этой зависимости приведен на рис. 4. Из рис. 4 видно, что в процессе работы рекуператора энергия без потерь плавно перетекает от одного маховика к другому, а общая (на графике безразмерная, нормированная на единицу) энергия остается постоянной. КПД рекуперации достигает максимально возможного значения вследствие гармонического характера колебаний маховиков.

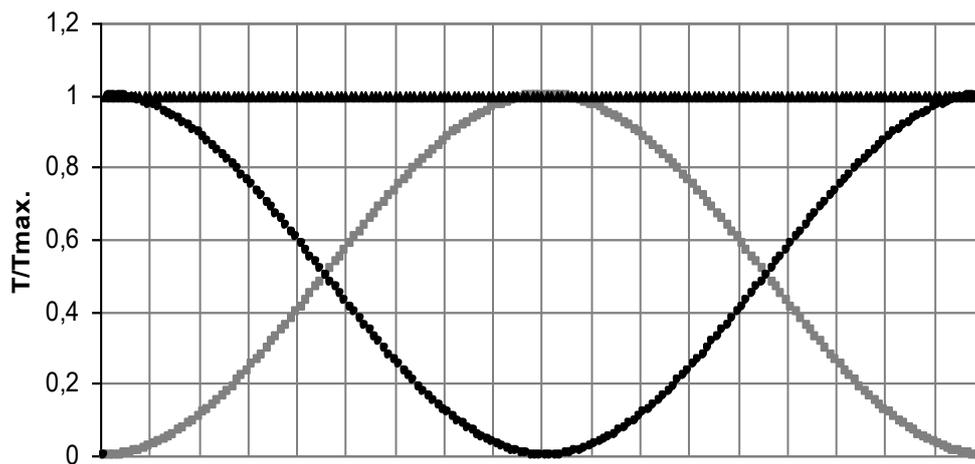


Рис. 4. График зависимости $T(t) = T_{\max} (\sin^2 t + \cos^2 t)$

Экспериментальная часть

Для исследования свойств рекуператора и электрической машины и проверки расчетов был изготовлен рабочий макет, фотография которого приведена на рис. 5.

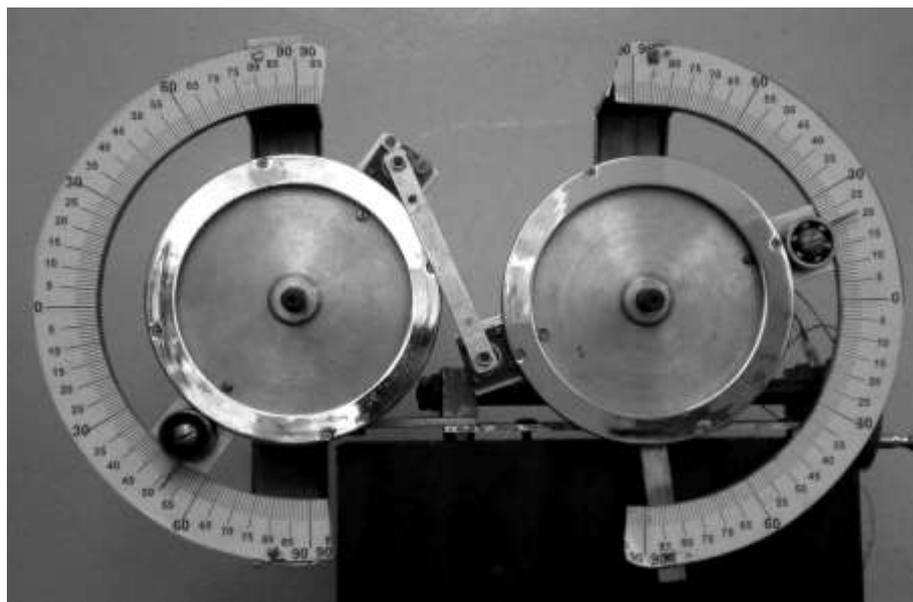


Рис. 5. Фотография рабочего макета

Макет представляет собой систему двух симметрично расположенных электрических машин, связанных посредством рекуператора. Маховики рекуператора установлены на хвостовиках валов электрических машин и снабжены противовесами. Каждая электрическая машина содержит четыре катушки статора и магнитный двухполюсный якорь. При помощи винтовой подачи может производиться изменение расстояния между электрическими машинами. Шарниры шатуна рекуператора имеют возможность установки под любым углом относительно магнитных полюсов якоря. Расстояние между осью маховика и осью шатуна равняется 0,097м. Шатун рекуператора выполнен с возможностью ступенчатого изменения его длины, которая может принимать значения 0,074м, 0,097м и 0,12м. С магнитных катушек электрической машины электрический сигнал может поступать на вход осциллографа. Макет

снабжен двумя лимбами с градусными делениями. Левый лимб закреплен на основании, правый - на подвижной части винтовой подачи. Каждый маховик снабжен стрелкой.

Рекуператор вводился в режим свободных колебаний путем придания момента импульса одному из маховиков. В этот момент проводилось наблюдение за формой осциллограммы наведенной ЭДС и фотографирование ее на цифровой фотоаппарат. После остановки рекуператора производилась его перенастройка путем изменения длины шатуна, расстояния между электрическими машинами, угла между магнитными полюсами электрической машины и шарнира шатуна. В результате этого наблюдалось изменение формы сигнала ЭДС. Наблюдались импульсы различной формы, например, далекие от синусоидальной, с гармониками. По-видимому, такая форма обусловлена сложной картиной взаимодействия неоднородного магнитного поля ротора электрической машины катушками ее статора. Однако путем подбора перечисленных параметров рекуператора можно было добиться сигнала ЭДС правильной периодической формы (рис 6).

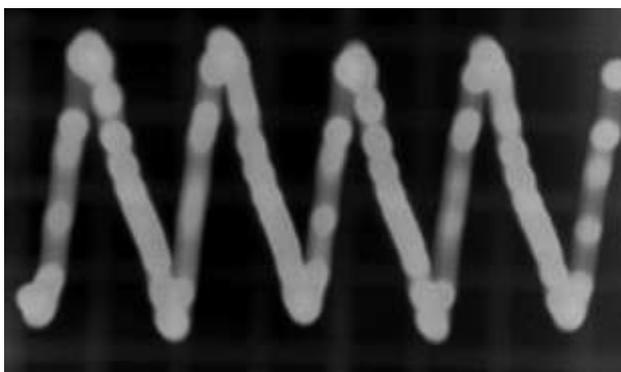


Рис. 6. Осциллограмма импульсов периодической формы

Напряжение такой формы (рис 6) можно преобразовывать при помощи диодного моста в пульсирующее и сглаживать при помощи фильтров. Это напряжение можно использовать, например, на транспорте для питания тяговых электродвигателей постоянного тока. В случае необходимости полученное постоянное напряжение можно преобразовывать в синусоидальное или же синусоидальное трехфазное при помощи радиоэлектронных средств.

Для исследования механических свойств рекуператора применялась следующая методика - в целях устранения влияния магнитного поля с валов электрических машин снимались магнитные сердечники. Напротив макета устанавливался цифровой фотоаппарат Nikon coolpix L14, настроенный на съемку видео. Выставлялись необходимые геометрические параметры макета - длина шатуна и расстояние между осями маховиков. Для каждой длины шатуна проводилась специальная серия экспериментов. Расстояние между маховиками изменялось с таким расчетом, чтобы амплитуда колебаний маховиков менялась в пределах от ста восьмидесяти градусов до тридцати с шагом в десять градусов. После приведения рекуператора в режим колебаний производилась съемка клипа с частотой 30 кадров в секунду. Вследствие рассеяния энергии характер колебаний изменялся - плавно уменьшалась частота вплоть до полной остановки рекуператора. Расшифровка клипа проводилась в редакторе Media Player Classic путем последовательного просмотра каждого кадра, во время которого снимались показания с лимба каждого маховика. Таким образом, были получены данные о зависимости угла поворота каждого маховика от времени с временным разрешением в одну тридцатую секунды. Ниже приведена типичная кривая такой зависимости углов поворота маховика от времени.

На рис. 7 нанесены экспериментальные точки и теоретическая кривая. Выяснилось, что типичная форма кривой представляет собой практически правильную синусоиду, причем форма приведенной кривой не зависит ни от длины шатуна, ни от расстояния между осями маховиков. Искажение синусоидальной кривой можно объяснить неидеальностью действу-

ющего макета. По-видимому, наибольший вклад в искажения внесли недостаточная уравновешенность маховиков и наличие упругой деформации макета в процессе совершения им колебаний. Анализ кривых подтверждает результаты аналитического решения, то есть моменты сил действительно подчиняются гармонической закономерности (2).

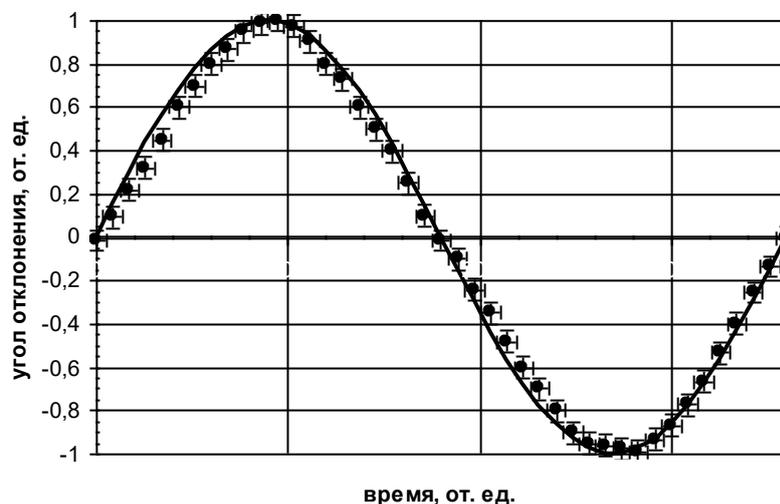


Рис. 7. Типичная кривая зависимости угла отклонения маховика от времени

Для сравнения характеров изменения рабочих объемов от времени поршневого и рассматриваемого двигателей обратимся к рис. 1 и рис. 7. Из рис. 7 следует, что вблизи “мертвых” точек, т.е., в экстремумах функция имеет незначительную скорость изменения, ротор плавно останавливается и начинает движение в обратную сторону. В этот момент времени происходит впрыск порции горючего и его воспламенение. В районах точек перегиба функция имеет наибольшую скорость изменения. В эти моменты горячие газы совершают основную работу по вращению ротора или же лопатки вытесняют отработавшие газы. Подобное рассуждение справедливо также и для поршневого двигателя, поршень которого движется по закону, описываемому кривой рис. 1. А поскольку поршневые двигатели работают в таком режиме, то можно сделать вывод, что и представленный двигатель будет работать в составе дизель-электрического агрегата.

Заключение

Нами были получены следующие результаты:

1. Разработана физическая модель дизель-электрического агрегата, содержащая роторный двигатель внутреннего сгорания, соединенный посредством рекуператора с электрической машиной.
2. Получено аналитическое решение для системы двух маховиков, связанных шатуном, которое имеет гармонический характер. Показано, что КПД рекуперации достигает максимально возможного значения.
3. Создана экспериментальная установка, включающая действующий макет и средства измерения для его исследования. Разработана методика исследования механических свойств рекуператора.
4. Получены осциллограммы электрической машины правильной периодической формы.
5. Получены экспериментальные данные о зависимости угла поворота каждого маховика от времени при различных геометрических параметрах рекуператора.
6. Экспериментальные данные проанализированы и сопоставлены с данными литературных источников.

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Подтверждена возможность получения электроэнергии при помощи электрической машины возвратно-вращательного типа.

2. Показано, что рекуператор обладает свойствами, необходимыми как для штатной работы ДВС, так и для работы электрической машины.

Согласно проведенным оценкам, в случае использования данной модели дизель-электрического агрегата при проектировании энергетических установок, по сравнению с традиционными схемами можно добиться уменьшения массы и габаритов устройства, значительного упрощения конструкции, увеличения ресурса, КПД, уменьшения вибраций и рабочего шума.

Предложенная здесь методика исследования механических свойств рекуператора может быть рекомендована для исследования подобных сравнительно быстро протекающих механических процессов. Она может заменить или дополнить известные стробоскопические методы и может быть внедрена в лабораторный физический практикум. В связи с широким распространением в последнее время цифровой фотографической и видеотехники эта методика обещает стать дешевой и общедоступной. Для проведения серьезных исследований понадобятся профессиональные научные приборы с соответствующим метрологическим обеспечением.

Литература

1. Шестопалов К.С., Чиняев В.Г. Устройство и эксплуатация автомобиля // Издательство ДОСААФ СССР, 1974. – С. 7- 147.

2. Иваницкий С.Ю., Карманов Б.С., Рогожин В.В. и др. Мотоцикл, теория, конструкция, расчет. – М.: Машиностроение, 1971. – С. 102 - 107.

3. Гулиа Н. Двухроторный тяни-толкай // Техника- молодежи, №1, 1989. – С. 28-29.

4. Шакиров А.Л. Двигатель внутреннего сгорания, заявка № 2002/1683.1 от 27.12.02, патент РК №14025 // Промышленная собственность, №6 2008. – С 173–174.

ҚАЙТЫМДЫ-АЙНАЛМАЛЫ ТИПТЕГІ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРЛІК АГРЕГАТТЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

В.В. Дьячков, А.Л. Шакиров

Электр машинасымен рекуператор арқылы жалғанған роторлы іштен жану қозғалтқышы (ДЖК) бар дизель-электрлі агрегаттың жобасы зерттелді. Рекуператор шатунмен байланысқан екі маховиктен тұратын жүйені құрайды. Рекуператордың іштен жану қозғалтқышының және электрлік машиналардың қалыпты жұмысына қажетті қасиеттерге ие екендігі көрсетілді. Қайтымды-айналмалы типтегі электрлік машиналардың көмегімен электр энергиясын алу мүмкіндігі расталған.

PHYSICAL MODEL OF DIESEL-ELECTRIC UNIT OF RECIPROCATING ROTARY MOTION TYPE

V.V. D'yachkov, A.L. Shakirov

A model of diesel-electric unit containing a rotor internal-combustion engine (ICE) connected to the electric machine by means of a recuperator has been investigated. The recuperator presents a system of two flywheels coupled by a connecting rod. The investigations showed that the recuperator possesses the characteristics required for the standard operation of both ICE and electric machine. The feasibility of electric power obtaining using the electric machine of a reciprocating rotary motion type has been proved.