

А.Е. Божко, д.т.н., проф., член-кор. НАН Украины, З.А. Иванова, с.н.с., к.т.н., доц., (ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины), Е.М. ИВАНОВ, к.т.н., доц., (Харьковский Национальный автомобильный университет «ХАДИ»)

## Принципиальные особенности функционирования электромагнитного поршневого двигателя

*Представлен принцип переоснащения энергетической системы двигателя конструктивными элементами, работающими на низкоточковых нагрузках, а двусторонний ход поршневого механизма реализован с помощью однотипных электромагнитных элементов, что снижает энергозатраты, исключает возникновение разномоментных тяговых усилий с нарушением плавности вращения коленчатого вала и разбалансировке хода поршней.*

**Ключевые слова:** поршень, цилиндр, соленоид, коленчатый вал, батарея конденсаторов, система управления.

*Представлено принцип переоснащення енергетичної системи двигуна конструктивними елементами, які працюють на низькопотужкових навантаженнях, а двосторонній хід поршневого механізму реалізований за допомогою однотипних електромагнітних елементів, що знижує енергозатрати, виключає виникнення різномоментних тягових зусиль з порушенням плавності обертання коленчатого валу та розбалансування ходу поршнів.*

**Ключові слова:** поршень, циліндр, соленоїд, колінчастий вал, батарея конденсаторів, система управління.

*The paper is devoted to the principle of re-equipment of the energy system of the engine design elements, working at a low current loads, and two-way stroke piston mechanism is implemented by using the same type of electromagnetic elements, which reduces energy costs, eliminates the appearance of different moments traction effort with the violation of smoothness of rotation Colin shaft and deregulation stroke pistons.*

**Keywords:** piston, cylinder, solenoid, crankshaft, the battery of capacitors, the system of management.

Предложенная модель двигателя относится к электромашиностроению и может быть использована в автомобилестроении, моторостроении, тракторостроении как привод низкоскоростных исполнительных механизмов.

В работе рассмотрены особенности функционирования двигателя, выполненного по принципу соленоида. В двигателе имеются шатуны и коленчатый вал, вращающийся в подшипниках скольжения [1].

При разработке двигателя была поставлена задача переоснащения электрической системы двигателя конструктивными элементами, которые могли бы работать на низкоточковых нагрузках, а двусторонний ход поршневого механизма был бы реализован с помощью однотипных электромагнитных элементов, что исключает повышение энергозатрат и уменьшает разномоментные тяговые усилия в нижней и верхней мертвых точках. При этом устраняется нарушение плавного вращения коленчатого вала и

разбалансирование хода поршней, за счет чего достигается снижение энергопотребления на единицу мощности двигателя, улучшение равномерности хода поршня и повышение частоты вращения коленчатого вала.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в электромагнитном поршневом двигателе, который имеет поршни, соединенные между собой с помощью общего коленчатого вала с маховиком и размещенные в цилиндрах, оснащенных установленными в нижних мертвых точках соленоидами. В верхних мертвых точках цилиндров устанавливаются другие соленоиды, связанные с последовательно соединенными коммутатором, автоматической системой управления, высоковольтным трансформатором, выпрямителем, конденсаторной батареей, генератором переменного тока (мультивибратором Ройера [2]). Поршни в верхней части жестко связаны со штоками, установленными с возможностью выхода из цилиндра на длину хода поршня, что уравнивает сило-

вой момент и повышает равномерность хода поршня.

Введение в каждую пару поршень-цилиндр дополнительного соленоида в верхней мертвой точке позволяет уменьшить энергопотребление на единицу мощности электродвигателя, уравнивает суммарные моменты количества движения с идентичными тяговыми усилиями, что приводит до равномерного хода поршня и частоты вращения коленчатого вала, упрощая конструктивное исполнение изделия в целом.

Поршни цилиндров (с шатунами) со стороны, прилегающей к коленчатому валу, жестко связаны со штоками, что уравнивает силовой момент. Штоки выполнены из ферромагнитного материала с целью увеличения магнитной проводимости в соленоиде, снижения энергопотребления двигателя и увеличения равномерного хода поршня.

Верхние обмотки соленоидов каждого из непарных поршней и нижние обмотки соленоидов каждого из парных поршней через ком-

мутатор связаны с разноименными полюсами конденсаторной батареи, что позволяет выравнивать моменты на противоположных направлениях движения поршней и суммировать тяговые усилия моментов движения с целью увеличения мощности двигателя. Для дальнейшего увеличения мощности двигателя можно разместить несколько пар параллельно соединённых цилиндров с поршнями, связанных через кривошипно-шатунные механизмы с коленчатым валом.

Структурно-механическая схема данного двигателя представлена на рисунке. Здесь изображена схема двигателя с двумя парами поршней и цилиндров с соленоидами. Элементы, входящие в общую схему двигателя, следующие: 1, 2 – цилиндры с установленными в нижней мёртвой точке первыми соленоидами 3, 4, а в верхней мёртвой точке – 5, 6. В цилиндрах 1, 2 установлены поршни 7, 8 со штоками 9, 10 и шатунами 11, 12 из ферромагнитного материала, которые соединены с коленчатым валом 13, оснащённым маховиком 14. Электромагнитный двигатель включает в свою схему генератор постоянного тока 15, выход которого соединён с аккумуляторной батареей 16. Генератор 15 своим валом (ротором, якорем) механически соединён с коленчатым валом 13. Выход батарей 16 соединён с блоком питания автоматической системы управления 17 и преобразователем постоянного тока в переменный – (мультивибратор с трансформаторной связью) 18. Выход мультивибратора Ройера подключён через выпрямитель 19 к входу конденсаторной батареи 20, а выход системы управления 17 подключён к входу коммутатора 21. В схеме двигателя также имеется понижающий трансформатор 22, первичной обмоткой подключаемый к источнику сетевого напряжения, а вторичной обмоткой – к аккумуляторной батарее через выпрямитель 23. Конденсаторная батарея включает в себя  $2N$  высокочастотных конденсаторов большой ёмкости, где  $N$  – число цилиндров.

Работа двухцилиндрового двигателя следующая. Считаем, что аккумуляторная батарея 16 заря-

жена до необходимого напряжения  $U_6$ . В момент пуска двигателя от батареи 16 поршень 7 находится в верхней мёртвой точке цилиндра 1, а поршень 8 находится в нижней мёртвой точке цилиндра 2. При команде автоматической системы управления 17 от генератора 15 через коммутатор 21 на обмотку соленоида 5 поршня 7 подаётся импульс напряжения  $U_{c11}$ . По обмотке 5 протекает ток  $i_{11}$ , который наводит в магнитопроводе и поршне 7 (со штоком) магнитный поток  $\Phi_{11}$ . Этот магнитный поток создаёт тяговое усилие  $F_{11}$ , действующее на поршень 7 таким образом, чтобы поршень 7 мог перемещаться. Поршень 7, отталкиваясь от соленоида 5, движется вниз по цилиндру 1 и через кривошипно-шатунный механизм 11 вращает коленчатый вал 13. Одновременно с подачей импульса напряжения  $U_{c11}$  на обмотку соленоида 5 подаётся импульс напряжения  $U_{c21}$  на обмотку соленоида 4, вызывая в ней ток  $i_{21}$  и, соответственно, в поршне 8 наводится магнитный поток  $\Phi_{21}$ . Этот поток  $\Phi_{21}$  создаёт тяговое усилие  $F_{21}$ , которое направлено вверх цилиндра 2 и поршень 8 под действием этого тягового усилия  $F_{21}$  движется вверх. Этим обеспечивается увеличение момента вращения коленчатого вала 13.

Далее импульсы напряжений  $U_c$  с предварительно заряженных конденсаторов 20 подаются соответственно на обмотки соленоидов 3, 6 и поршни 7, 8, которые движутся в противоположных направлениях через свои кривошипно-шатунные механизмы 11, 12 и коленчатый вал 13 разгоняет двигатель до необходимых оборотов.

Скорость вращения коленчатого вала регулируется величиной амплитуды импульсов  $U_c$  идущих с заряженных конденсаторов 20, то – есть величинами токов, которые протекают по обмоткам соленоидов 3, 4, 5, 6. Автоматическая система 17 совместно с коммутатором 21 управляет зарядкой и разрядкой конденсаторной батареи 20 на соответствующие обмотки соленоидов 3, 4, 5, 6 и управлением преобразователя 18 с целью подзарядки от него через выпрямитель 19 конденсаторной батареи 20. Akku-

муляторная батарея 16 заряжается от сети через трансформатор 22 и выпрямитель 23, а во время вращения коленчатого вала 13 – от генератора 15.

В предлагаемом двигателе уменьшено энергопотребление на единицу мощности в результате взаимодействия магнитного поля соленоидов и ферромагнитных поршней. При подаче импульсов тока создаётся уравновешенное синхронное движение поршней с плавным вращением коленчатого вала двигателя. Кинетическая энергия поршня преобразовывается в кинетическую энергию маховика, которая через вал и коробку передач (на рисунке она не показана) передаётся на трансмиссию и генератор 15 для подзарядки аккумуляторной батареи 16. Предлагаемая конструкция двигателя может быть выполнена с большим количеством цилиндров. Однако принцип работы двигателя остаётся тем же.

Далее остановимся на работе коммутатора 21. Коммутатор заменяет распределительный механизм двигателя внутреннего сгорания. Он включает в себя механические контакты, расположенные в мёртвых точках (верхней и нижней) каждого цилиндра, системы управления тиристорами, включённых последовательно в цепи разряда конденсаторов батареи 20.

Далее рассмотрим основные аспекты теории этого двигателя.

При разряде конденсатора на обмотку соленоида ток в электроцепи записывается выражением [3]

$$i(t) = \frac{U_{c0}}{(p_1 - p_2)L} (-e^{p_1 t} + e^{p_2 t}), \quad (1)$$

где  $U_{c0}$  – начальное напряжение на конденсаторе,  $t$  – время,  $L$  – индуктивность обмотки соленоида,

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}},$$

$r$  – активное сопротивление обмотки соленоида,  $C$  – ёмкость конденсатора,

$$L = w^2 G, \quad G = \mu_0 \frac{S}{\delta}, \quad (2)$$

где  $w$  – число витков обмотки соленоида,  $G$  – магнитная проводимость

в цилиндре с поршнем,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха (в зазоре  $\delta$  – смотри рисунок),  $S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода возле зазора  $\delta$ ,  $S = 2\pi R h$ , где  $R$  – радиус окружности магнитопровода,  $h$  – толщина магнитопровода возле зазора.

Согласно закону полного тока [4], ток  $i(t)$  вызывает в магнитопроводе магнитный поток  $\Phi = i\omega G$ . Этот магнитный поток создает тяговое усилие  $F$ , которое, действуя на поршень, перемещает его в цилиндре. Поршень своим движением через кривошипно – шатунный механизм вращает коленчатый вал. Величина тягового усилия определяется формулой [5]

$$F = \mu_0 S \left( \frac{i\omega}{2\delta} \right)^2 \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в (1), получим общую формулу тягового усилия, возникающего в двигателе в виде

$$F(t) = \mu_0 S \left( \frac{\omega U_{co}}{(p_1 - p_2) 2\delta L} (-e^{ip_1} + e^{ip_2}) \right)^2$$

или с учетом (2)

$$F(t) = \frac{1}{\mu_0 S} \left( \frac{U_{co}}{(p_1 - p_2) 2\omega \delta G} (-e^{ip_1} + e^{ip_2}) \right)^2 \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что тяговое усилие прямо пропорционально квадрату начального напряжения на конденсаторе.

Для определения скорости движения поршня в цилиндре запишем уравнение

$$F_i - F_c = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm_u}{da}, \quad (5)$$

где  $m$  – масса поршня совместно с кривошипно-шатунным механизмом,  $v$  – скорость движения поршня,  $a$  – перемещение поршня,  $m_u$  – приведенная масса, как функция от  $a$ ,  $F_c$  – сила сопротивления (в нашем случае сила трения).

Из уравнения (5) получаем величину скорости перемещения поршня в цилиндре в виде [6]

$$V_i = \sqrt{\frac{2}{m} \int_{a_0}^{a_i} (F - F_c) da + \frac{m_u}{m} v_0^2}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) выражение (4), получим зависимость скорости перемещения поршня в цилиндре

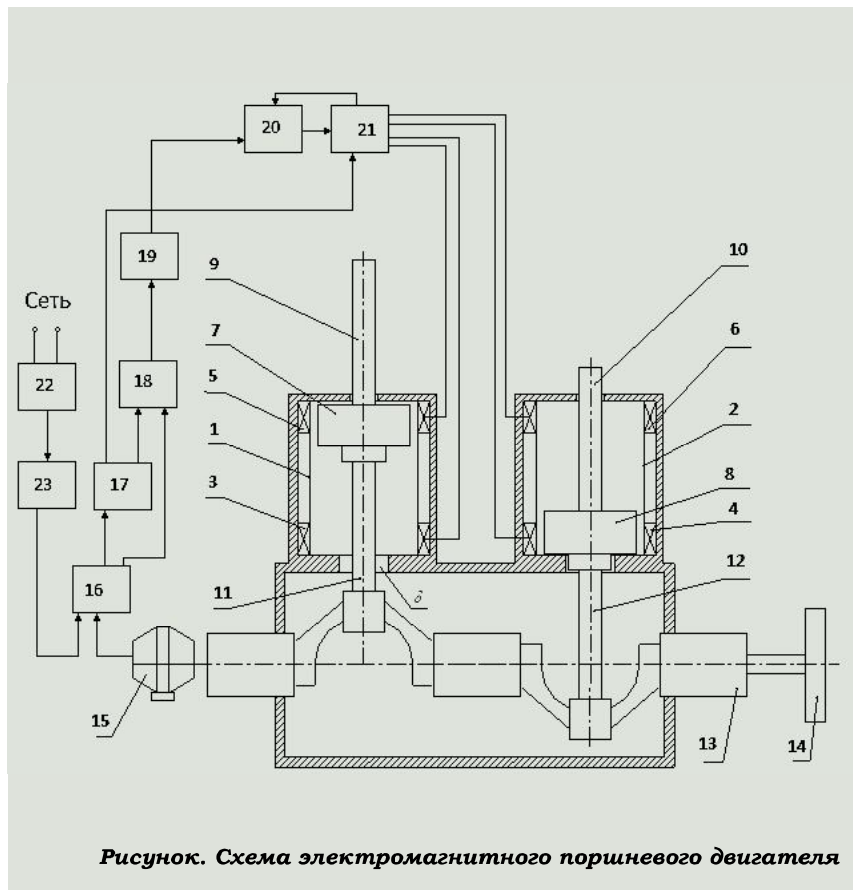


Рисунок. Схема электромагнитного поршневого двигателя

также от параметров соленоида в виде

$$V_i = \left( \frac{2}{m} \int_{a_0}^{a_i} \left[ \frac{1}{\mu_0 S} \left( \frac{U_{co}}{(p_1 - p_2) \omega} (e^{ip_2} - e^{-ip_1}) \right)^2 - F_c \right] da + \frac{m_u}{m} v_0^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), скорость  $V_i$  в каждой  $i$ -й точке  $S_i$  при движении поршня пропорциональна величине  $U_{co}$ , то-есть величине начального напряжения на конденсаторе. А это значит, что величину скорости можно регулировать с помощью величины  $U_{co}$ , которое может в свою очередь регулироваться системой управления 17. Понятно, что и скорость вращения коленчатого вала двигателя также будет пропорциональна величине  $U_{co}$  и зависит от числа поршней.

#### Выводы

Предложенная основная конструкция электромагнитного поршневого двигателя позволяет снизить энергопотребление, стабилизировать равномерность хода поршня и частоту вращения коленчатого

вала, а также упростить конструктивные исполнения двигателя в целом. Данный двигатель экологически безопасен.

#### Список литературы:

1. Божко О.Е., Личкацкий С.О., Белых В.И., Иванов Е.М. Электромагнитный поршневый двигун. Патент Украины № 61108, Бюл. № 13 від 11.07.2011 р.
2. Божко А.Е. Принцип регулирования частоты генерируемого сигнала в мультивибраторе Ройера // Доповіди НАНУ, 2008. - № 1. - С. 83-86.
3. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. - М.: Сов. радио, 1959. - 404 с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Высш. Школа, 1978. - 528 с.
5. Божко А.Е. Теория электромагнитных возбуждателей / А.Е.Божко, В.И.Белых, Е.М.Иванов., К.Б.Мякохлеб// Харьков: ХНАДУ, 2008. - 436 с.
6. Артоболовский И.И. Теория механизмов и машин. - М.: Наука, 1988. - 640 с.