

УДК 681.513.6

**К.Р. Гильмияров, А.В. Павленко**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО ПРИВОДА  
КЛАПАНА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

*Рассмотрены вопросы математического моделирования процессов в мехатронном приводе клапана газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания. Предложена математическая модель привода на основе резонансного электромагнитного механизма. Проведено численное исследование характеристик привода для различных значений коэффициента вязкого сопротивления. Выполнено сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными, подтверждена адекватность математической модели.*

*Математическая модель; электромагнитный механизм резонансного типа; мехатронный привод; система управления.*

**K.R. Gilmiyarov, A.V. Pavlenko**

**MATHEMATICAL MODELING MECHATRONIC ACTUATOR FOR VALVES  
MECHANISM GAS EXCHANGE OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

*The paper deals with mathematical modeling of mechatronic actuator for valves mechanism gas exchange of an internal combustion engine. A mathematical model of the actuator based on the resonant electromagnetic mechanism. A numerical study of the characteristics of the actuator for various values of the coefficient of viscous friction. A comparison of the results of mathematical modeling with experimental data confirmed the adequacy of the mathematical model.*

*Mathematical model; control system; resonant electromagnetic mechanism; mechatronic actuator.*

Основой многих узлов топливоподачи и воздухогазообмена двигателей внутреннего сгорания (ДВС) являются быстродействующие электромагнитные механизмы резонансного типа. На базе электромагнитных приводов реализуются: газораспределительные механизмы (ГРМ) с индивидуальными приводами клапанов, воздушно-тактовые клапаны для импульсного наддува, системы рециркуляции газов, моторный тормоз и другие устройства, обеспечивающие улучшение энергетических, экономических и экологических показателей ДВС [1, 2, 3]. Применение электромагнитных приводов в таких системах связано с малым временем срабатывания резонансных электромагнитных механизмов (до 2,5 мс) и возможностью индивидуального управления последними, что позволяет обеспечить гибкое управление процессами воздухогазообмена за счет изменения фаз газораспределения и, при необходимости, отключения отдельных цилиндров.

Резонансный электромагнитный механизм представляет собой взаимосвязанную электромеханическую систему маятникового типа, состоящую из одного или двух электромагнитов и общего якоря, подпружиненного с обеих сторон. Время движения якоря в такой системе определяется жесткостью пружин и массой движущихся частей механизма, а перемещение якоря происходит за счет преобразования потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Таким образом, особенности конструкции электромагнитных механизмов резонансного типа обеспечивают плавность разгона и торможения якоря (клапана), позволяют существенно улучшить массогабаритные показатели привода и уменьшить потребляемую мощность. Для удержания клапана в крайних положениях, в обесточенном состоянии, в электромагните применяются постоянные магниты. В зависимости от количества оборотов ДВС варьируется время открытого и закрытого состояния клапана, которое может составлять значительную часть времени общего цикла его работы. При

этом применение постоянных магнитов практически исключает потребление электромагнитом мощности в этих режимах. С другой стороны, одним из существенных недостатков, ограничивающим широкое применение электромагнитных механизмов резонансного типа для индивидуального управления клапанами ГРМ, является сложность обеспечения практически нулевой скорости якоря, и соответственно клапана, в конце хода (безударное срабатывание, скорость не более 0,4 м/с). Конструкция электромагнита предполагает, что на этапе разгона якоря действие постоянного магнита будет замедлять его перемещение, а на этапе торможения наоборот – ускорять [4], что увеличивает скорость якоря в конце хода. Обеспечить требуемые динамические характеристики электромагнита привода (заданные время срабатывания и скорость посадки якоря) можно путем изменения геометрии и конструкции магнитной системы, однако это не всегда возможно реализовать в связи с жесткими ограничениями, накладываемыми на массогабаритные и другие показатели привода. Альтернативным путем обеспечения заданных динамических характеристик, является применение интеллектуальных систем управления. В этом случае привод можно рассматривать как мехатронное устройство, включающее резонансный электромагнитный механизм, устройство управления, датчики и микропроцессорный контроллер. Несмотря на большое количество публикаций и патентов, вопрос управления резонансными электромагнитными механизмами с поляризованной магнитной системой практически не рассматривался, в связи с чем остается нерешенным вопрос обеспечения требуемой скорости посадки клапана. Основным этапом проектирования подобных приводов является создание новых комплексных моделей и методов расчета. Для разработки метода управления, обеспечивающего условие посадки якоря с минимальной скоростью, наряду с электромагнитными процессами целесообразно рассматривать процессы в механической системе резонансного электромагнитного механизма, так как параметры механической системы в основном определяют характеристику перемещения якоря. В общем цикле перемещения якоря преобладают динамические процессы разгона и торможения, сопровождающиеся процессами преобразования потенциальной энергии в кинетическую и обратно. На рис. 1 представлена зависимость изменения энергии в реальной механической системе при перемещении якоря  $x$ . Часть потенциальной энергии расходуется на преодоление сил сопротивления, к которым в рассматриваемом случае можно отнести силы трения, давления газов на клапан газораспределительного механизма и др.

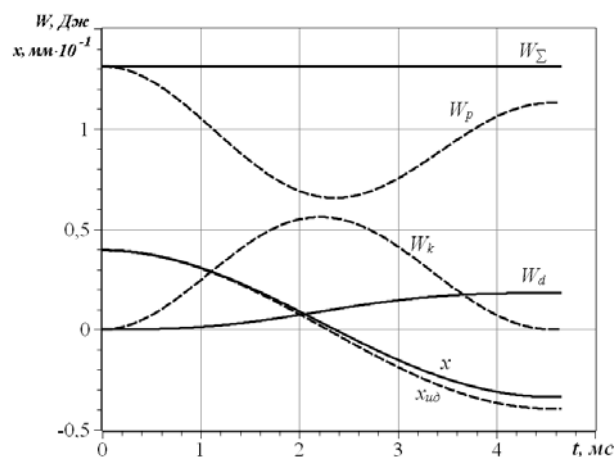


Рис. 1. Преобразование энергии в механической системе привода

Если предположить, что в любой момент времени имеется возможность компенсировать затраты энергии на преодоление сил сопротивления  $W_d$ , то распределение энергии при перемещении якоря будет соответствовать распределению энергии в идеальной (консервативной) механической системе привода. При этом клапан переместится из одного положения в другое  $x_{по}$ , с заданным временем движения и нулевой скоростью в момент посадки.

Энергетический баланс механической системы реального электромагнитного механизма выглядит следующим образом

$$W_{\Sigma} = W_p + W_k + W_d + W_{эл} + W_{нм},$$

где  $W_p$  – потенциальная энергия системы;  $W_k$  – кинетическая энергия;  $W_d$  – энергия, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления;  $W_{эл}$  и  $W_{нм}$  – энергии, подводимые электромагнитами и постоянными магнитами и проявляемые в виде работ сил электромагнитного притяжения.

Как видно из уравнения энергетического баланса компенсировать затраты энергии на преодоление сил сопротивления  $W_d$  возможно лишь за счет энергий  $W_{эл}$  и  $W_{нм}$  преобразуемых в процессе движения якоря в механическую энергию, проявляемых в виде работ сил электромагнитного притяжения. Однако, принимая во внимание тот факт, что действие постоянных магнитов на этапе разгона препятствует движению якоря, то для обеспечения переключения привода с заданным временем срабатывания и минимальной скоростью посадки якоря необходимо выполнить следующее условие

$$W_{эл} = W_d + W_{нм}. \quad (1)$$

Таким образом, суть предлагаемого метода управления заключается в обеспечении выполнения равенства (1) путем регулирования величины энергии, подводимой электромагнитами. При этом обеспечивается достижение механической системой свойств, присущих идеальной системе – обеспечение заданного времени срабатывания и нулевой скорости посадки якоря [5]. Для проведения дальнейших аналитических исследований была разработана математическая модель мехатронного привода, которая описывает процессы в резонансном электромагнитном механизме и устройстве управления.

Обобщенная математическая модель резонансного электромагнитного механизма включает модули расчета статических и динамических характеристик электромагнитного механизма. Первый модуль реализует расчет электромагнитного поля электромагнита методом конечных элементов и используется для определения семейства статических характеристик потокосцепления  $\Psi=f(i,x)$  и электромагнитной силы  $F_{эл}=f(i,x)$  для различных значений тока и воздушного зазора. При расчете электромагнитного поля электромагнита, принимаются следующие ограничения и допущения – магнитное поле считается плоскомеридианным (осесимметричным) и за пределами расчетной области отсутствует, кривые намагничивания ферромагнитных материалов однозначны, токи равномерно распределены по токонесящим областям. На рис. 2,а представлена расчетная область магнитной системы резонансного электромагнитного механизма. Расчеты выполняются в программном комплексе *FEMM 4.2* [6] с применением скриптов на интерпретируемом языке программирования *Lua*. Полученные статические характеристики  $\Psi=f(i,x)$  и  $F_{эл}=f(i,x)$  в дальнейшем используются в модели для расчета динамических характеристик резонансного электромагнитного механизма. Для удобства проведения расчетов зависимость потокосцепления от тока и зазора  $\Psi=f(i,x)$  преобразуется в зависимость тока от потокосцепления и зазора  $i=f(\Psi,x)$ .

Второй модуль представляет собой модуль расчета динамических характеристик электромагнитного механизма и реализуется на основе методов электрических и магнитных цепей. На рис. 2,б представлена кинематическая схема, используемая для расчета динамических характеристик резонансного электромагнитного механизма. Ось  $x$  направлена вдоль оси перемещения штока, за начало отсчета

которой принято положение статического равновесия якоря. Положительное направление оси  $x$  – вверх. В процессе движения якорь рассматривается как материальная точка массой  $m$ . При расчете динамических характеристик электромагнитного механизма принимаются следующие ограничения и допущения – вихревые токи отсутствуют, сила вязкого трения пропорциональна скорости якоря, удар якоря о полюс рассматривается как мгновенное изменение скоростей соударяющихся тел и характеризуется некоторой средней силой.

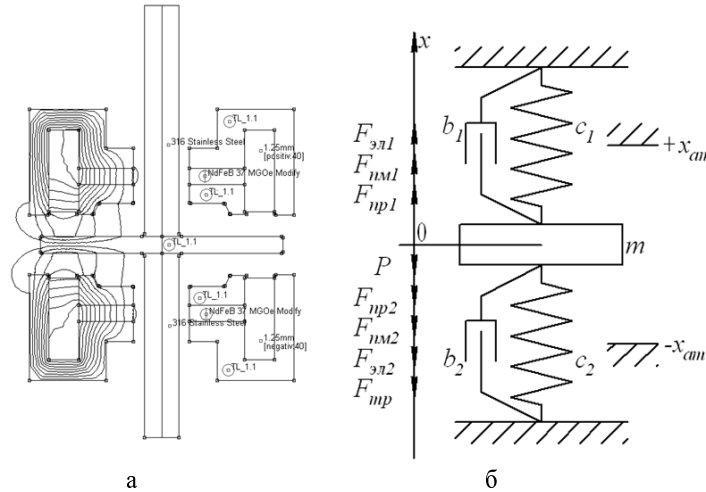


Рис. 2. Расчетная область магнитной системы (а) и расчетная кинематическая схема (б) резонансного электромагнитного механизма

Система уравнений, описывающая математическую модель для резонансного электромагнитного механизма [7], представляет собой

$$\begin{cases} ma = F_{эл1} + F_{нм1} - F_{эл2} - F_{нм2} + F_{нп1} - F_{нп2} - F_{мп} - P - F_{y0}, \\ a = \frac{dv}{dt}, v = \frac{dx}{dt}, \\ F_{эл1} = f(i_1, x), F_{эл2} = f(i_2, x), \\ F_{нм1} = f(x), F_{нм2} = f(x), \\ i_1 = f(\Psi_1, x), i_2 = f(\Psi_2, x), \\ \Psi_1 = \int (U_1 - i_1 \cdot R_1) dt, \\ \Psi_2 = \int (U_2 - i_2 \cdot R_2) dt, \\ F_{нп1} = c_1 \cdot x, \\ F_{нп2} = c_2 \cdot x, \\ F_{мп} = b \cdot v, \\ P = mg, \\ F_{y0} = \begin{cases} \frac{m \cdot v_{y0}}{t_{y0}} \cdot (1+k), nпу \quad |x| = x_{ав} \\ 0, nпу \quad -x_{ав} < x < x_{ав}. \end{cases} \end{cases}$$

Здесь  $m$  – суммарная масса перемещающихся частей привода;  $a$ ,  $v$ ,  $x$  – ускорение, скорость и ход якоря;  $F_{эл1}$  и  $F_{эл2}$  – силы, создаваемые электромагнитами;  $F_{нм1}$  и  $F_{нм2}$  – силы, создаваемые постоянными магнитами;  $U$ ,  $i$ ,  $R$  – напряжение питания, активное сопротивление и токи в обмотках электромагнитов;  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – потокосцепления обмоток;  $F_{нр1}$  и  $F_{нр2}$  – силы упругости пружин;  $c_1$  и  $c_2$  – жесткости пружин;  $F_{мп}$  – сила вязкого трения;  $b$  – коэффициент вязкого трения;  $P$  – сила тяжести;  $g$  – ускорение свободного падения;  $F_{уд}$  – сила, характеризующая удар;  $t_{уд}$  – длительность удара;  $v_{уд}$  – скорость якоря в момент удара;  $k$  – коэффициент восстановления;  $x_{ам}$  – крайнее положение якоря.

На основе предложенной математической модели было проведено исследование рабочего процесса в мехатронном приводе клапана ГРМ ДВС. На рис. 3, 4 представлены зависимости величин энергии, перемещения и скорости якоря, токов в обмотках электромагнитов, электромагнитной и суммарной сил пружин при движении якоря, полученные при переключении привода без учета сил сопротивления движению якоря.

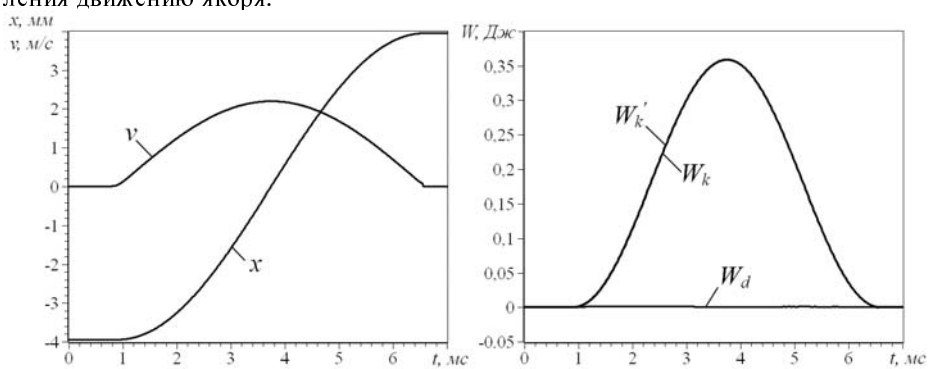


Рис. 3. Зависимости скорости и хода якоря (слева) и изменения энергии в механической системе привода (справа)

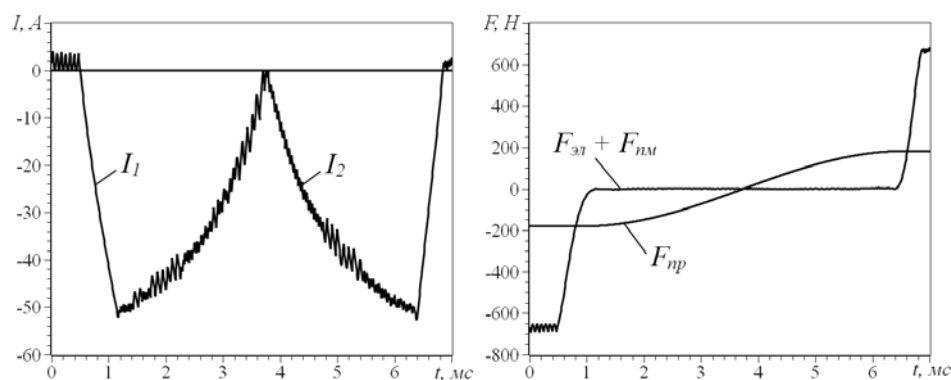


Рис. 4. Зависимости тока (слева), суммарной электромагнитной силы и суммарной силы пружин (справа)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что значение действительной кинетической энергии якоря  $W_k$  на всем пути перемещения якоря совпадает со значением желаемой  $W_k'$ , при этом якорь перемещается с заданным временем и практически нулевой скоростью посадки. Это подтверждает выполнение равенства (1), достоверность предлагаемого метода управления и выводы о влиянии постоянных магнитов на динамические характеристики привода.

Для оценки влияния силы вязкого трения на скорость посадки якоря было проведено математическое моделирование процесса переключения привода при различных значениях силы вязкого трения. Характеристики изменения хода и скорости якоря представлены на рис. 5.

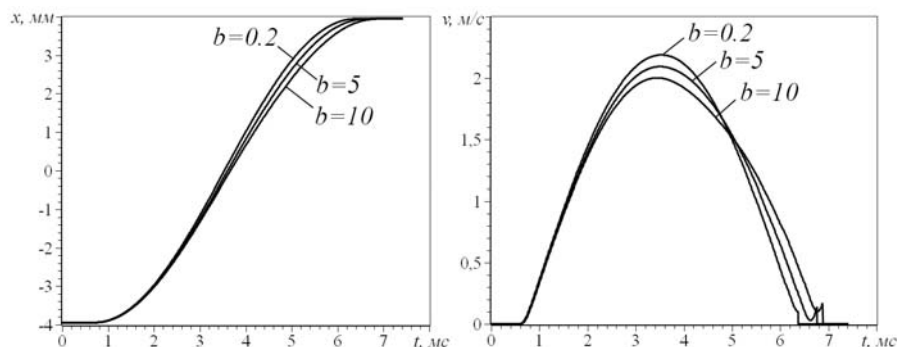


Рис. 5. Зависимости хода и скорости якоря

Полученные характеристики свидетельствуют о том, что увеличение трения в системе, как и предполагалось, приводит к росту времени переключения привода, однако скорость посадки якоря при этом не превышает заданных 0,4 м/с.

По результатам математического моделирования и расчетов был изготовлен опытный образец устройства управления мехатронным приводом с резонансным электромагнитом и проведены его экспериментальные исследования. В ходе экспериментальных исследований была проведена оценка адекватности разработанных математических моделей. Для оценки адекватности модели резонансного электромагнитного механизма первого уровня было проведено сравнение характеристик сил, создаваемых постоянным магнитом от величины воздушного зазора, полученных расчетным и экспериментальным путем (рис. 6). Значению  $x$  равному 3,95 мм на рис. 6 соответствует минимальный воздушный зазор. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов показывает, что расхождение не превышает 18,5 %.

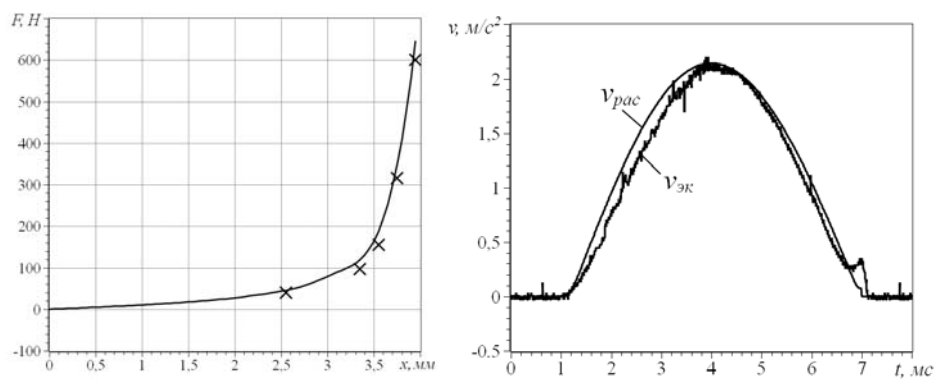


Рис. 6. Зависимости силы, создаваемой постоянным магнитом, от величины воздушного зазора (слева) и скорости якоря от времени (справа)

Для оценки адекватности разработанной математической модели резонансного электромагнитного механизма второго уровня было выполнено сравнение динамических характеристик, полученных при математическом моделировании и

экспериментальных исследованиях. Количественная оценка проводилась путем вычисления относительной погрешности для времени срабатывания, которая составила 2 %, и относительной приведенной погрешности при определении скорости посадки якоря, равной 11 %. Качественная оценка выполнялась путем определения нормированного скалярного произведения для полученных зависимостей скорости якоря от времени, значение которого составило 0,997.

Полученные результаты свидетельствуют о хорошем совпадении результатов математического моделирования и экспериментальных исследований, что позволяет использовать предложенные математическую модель и методику при проектировании мехатронных приводов с резонансными электромагнитами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павленко А.В., Батищев Д.В., Гринченков В.П., Гуммель А.А., Павленко И.А., Калленбах Э. Электромагнитные приводы для мехатронных устройств и систем автомобилей. Проектирование и оптимизация // Мехатроника, автоматизация, управление – 2007: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., пос. Дивноморское, 24-29 сент. 2007 г. – С. 429-431.
2. Павленко А.В., Батищев Д.В., Гринченков В.П., Гуммель А.А., Большенко И.А. Быстродействующие электромагнитные приводы для клапанов систем топливоподдачи и воздухообмена двигателей внутреннего сгорания // Изв. вузов “Электромеханика”. – 2010. – № 5. – С. 48-53.
3. Павленко И.А., Гильмияров К.Р. Электромагнитный привод для клапанов газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2009. – Спецвып.: Мехатроника. Современное состояние и тенденции развития 2009 // Всероссийская науч. школа для молодежи. – г. Новочеркасск, 2-15 ноября 2009 г. – С. 5-10.
4. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Поляризованные электромагниты. – Изд-во «Энергия», 1964. – 119 с.
5. Павленко А.В., Гильмияров К.Р. Управление резонансным электромагнитным приводом клапана газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания с использованием методов нечеткой логики // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2011. – № 4. – С. 55-60.
6. Finite Element Method Magnetics, Owner: DavidMeeker. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>, свободный.
7. Никитенко А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1983. – 192 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. П.Г. Колпахчян.

**Гильмияров Константин Ринардович** – Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт); e-mail: [azov\\_kot@mail.ru](mailto:azov_kot@mail.ru); 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; тел.: 88635251684; кафедра «Электрические и электронные аппараты»; аспирант.

**Павленко Александр Валентинович** – кафедра «Электрические и электронные аппараты»; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Gilmiyarov Konstantin Rinardovich** – South Russian state technical university (Novocherkassk polytechnical institute); e-mail: [azov\\_kot@mail.ru](mailto:azov_kot@mail.ru); 132, Prosvescheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia; phone: +78635251684; the department “Electric and electronic devices”; post-graduate student.

**Pavlenko Alexandr Valentinovich** – Managing department “Electric and electronic devices”; dr. of eng. sc.; professor.