

УДК 537.812:621.318

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА КЛАПАНОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА СОВРЕМЕННЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ ДВС

Балабин В.Н.*ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)», Москва,
e-mail: tu@miit.ru*

В статье рассмотрены некоторые направления развития электромагнитного привода клапанов газораспределения локомотивных ДВС. Представлены результаты расчетов по созданной математической модели, позволившей определять свыше 30 конструктивных и режимных параметров привода. Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований на безмоторном стенде дизеля ЧН 26/26.

Ключевые слова: тепловозный двигатель, клапаны газораспределения, электромагнитный привод

PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF THE ELECTROMAGNETIC VALVE TIMING ON MODERN LOCOMOTIVE ENGINES

Balabin V.N.*Moscow state University of railway engineering (MIIT), Moscow, e-mail: tu@miit.ru*

In the article some directions of development of the electromagnetic valve timing locomotive internal-combustion engine. Presents the results of calculations on the created mathematical model, allowing to define more than 30 design and operating parameters of the drive. The results of experimental research on non-motorised stand diesel CHN 26/26.

Keywords: diesel engine, valve timing, electromagnetic drive

Для реализации возможностей микро-процессорного управления локомотивным ДВС необходимо повысить управляемость его узлов, возможность изменения их состояния в любой момент времени и по любой задаваемой функции. Наибольший интерес может представлять альтернативный механическому электромагнитный привод клапанов (ЭМПК) газораспределения. Применение ЭМПК газораспределения нашло практическое применение, начиная с конца 80-годов. Особенно большое число исследований проводилось во Франции, Германии и Японии. Преимущества ЭМПК достаточно много, это:

- обеспечение широких диапазонов регулирования ФГР;
- высокое быстродействие;
- удобство контроля работы привода;
- большая надежность элементов электронной системы управления и электропривода и возможность при необходимости установки дублирующих схем формирования управляющих сигналов;
- высокий КПД из всех существующих немеханических систем привода.

Исследования ЭМПК

Исследования ЭМПК, проводимые ведущими компаниями в мире достаточно обширны. Наибольший интерес представ-

ляют экспериментальные работы, проводимые в последние 20 лет. Некоторые из проблем ЭМПК обсуждались ещё в 1993 г. на международных конгрессах и конференциях различного уровня, посвященных экспериментам в области альтернативного привода клапанов газораспределения транспортных ДВС. Главный вывод: если бы удалось регулировать ФГР клапанов с меньшей затратой энергии, чем при механическом приводе, то это представляло бы большое достижение в области транспортного двигателестроения.

В течение многих лет коллектив исследователей кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» МИИТа работал над созданием ЭМПК существующих и перспективных локомотивных ДВС. Были проведены глубокие теоретические расчеты, позволившие получить ряд любопытных результатов.

Наиболее сложные расчёты сделаны для выпускного клапана, работающего в наиболее тяжелых условиях [1]. В этом случае во всех расчётах ЭМПК необходимо учитывать значительное противодавление газа в начальный момент открытия.

Расчеты проводились с помощью разработанной математической модели и учитывали все основные влияющие факторы.

Основная зависимость для рассматриваемой системы:

$$m \frac{d^2}{dt^2} x(t) = F_{ЭМ} [x(t), i] - \Delta p(t) S_0 - k_{ГР} [x(t) + x_0], \quad (1)$$

где m – масса всех подвижных деталей системы, кг; $x(t)$ – перемещение клапана, м; $F_{эм}$ – сила, действующая на якорь электромагнита, Н; i – ток в обмотке электромагнита, А; Δp – перепад давлений по обе стороны тарелки клапана, Па; S_0 – площадь тарелки клапана,

m^2 ; k_{np} – жёсткость возвратной пружины, Н/м; x_0 – предварительная затяжка пружины, м.

Для расчета перепада давлений внутри цилиндра и в выпускном патрубке, использовано интегральное уравнение неразрывности газового потока.

$$\frac{p_1(t) V_{ц}}{RT_1} = m_0 - \int_0^t S_{кл}(x) \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1^2 M}{RT_1} \left[\left(\frac{p_k}{p_1(t)} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_k}{p_1(t)} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} dt. \quad (2)$$

Пользуясь теоремой о дифференцируемости определённого интеграла с перемен-

ным верхним пределом и после преобразований выражение будет иметь вид:

$$\frac{d}{dt} p_1(t) = - \frac{S_{кл}(x)}{V_{ц}} p_1(t) \left(\frac{R \cdot T_1}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \xi \left(\frac{p_k}{p_1(t)} \right), \quad (3)$$

Для ЭМПК наибольшее значение отводится расчету электрической части привода.

Уравнение электрического состояния цепи:

$$u = i(t)r + \frac{d}{dt} L(x) \frac{d}{dt} x(t)i(t) + L[x(t)] \frac{d}{dt} i(t). \quad (4)$$

Для нахождения параметров движения клапана сопутствующие уравнения были

решены методом Рунге-Кутты с фиксированным шагом:

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{\sum m} \cdot \left[\frac{(wi)^2}{2} \cdot \Delta'(x) - (p - p_k) \cdot s_0 - F_{соп}(v, s) \right] \\ \frac{dp}{dt} = - \frac{s_{кл}(x)}{V_{ц}(t)} \cdot p \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T_1}{Mp}} \cdot \xi \left(\frac{p_k}{p} \right) \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{w^2 \cdot \Lambda(x)} \cdot [u - i(w^2 \cdot \Lambda'(x) \cdot v + r)] \end{cases} \quad (5)$$

где x – перемещение клапана; v – скорость движения клапан; p – давление газов в цилиндре; I – ток в обмотке силового электромагнита.

Математическая модель позволяет определять влияние свыше 30 различных конструктивных и режимных параметров на мощностные и экономические показатели ЭМПК.

На рис. 1. представлены результаты расчета хода клапана при изменении числа витков W обмотки силового электромагнита.

Разработанная модель позволяет определять оптимальные конструктивные и технологические параметры ЭМПК для локомотивных ДВС, различных мощностных и скоростных градаций.

Экспериментальные исследования

Силовой ЭМПК достаточно компактен, легко вписывается в габариты крышки цилиндров локомотивных ДВС и представляет собой обычные соленоиды, состоящие из обмотки, неподвижного магнитопровода и подвижного якоря, выполненных из ферромагнетиков.

Основной недостаток традиционных электромагнитов-соленоидов – невозможность увеличения электромагнитной силы без увеличения габаритов и инерции из-за эффекта насыщения ферромагнитных материалов магнитопроводов.

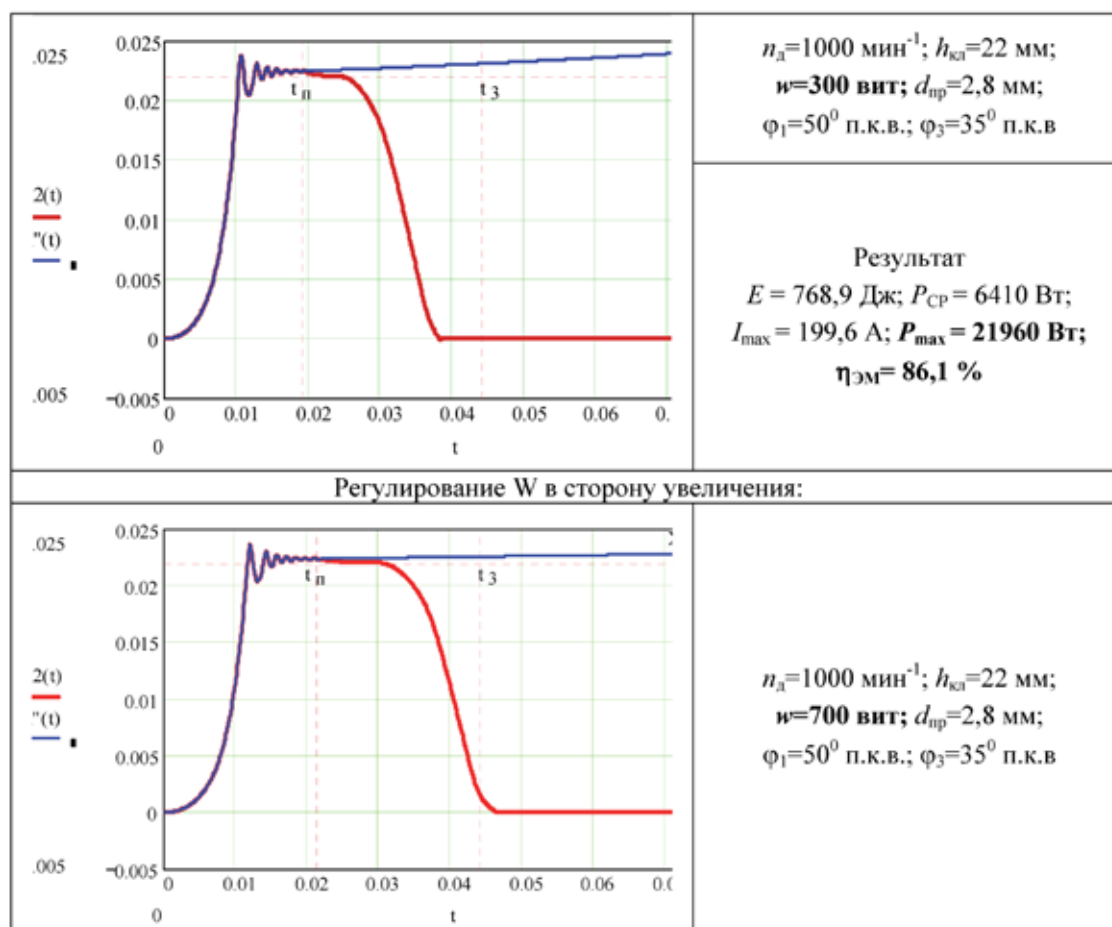


Рис. 1. Здесь расчетные параметры:

$h_{кл}$, мм – высота подъема клапана; $d_{пр}$, мм – диаметр обмоточного провода; ϕ_1 , °п.к.в. – фаза опережения открытия выпускного клапана; ϕ_3 , °п.к.в. – фаза запаздывания закрытия выпускного клапана; E , Дж – потребляемая выпускным клапаном электроэнергия; P_{CP} , Вт – средняя потребляемая мощность СЭ; I_{max} , А – максимальный ток СЭ; P_{max} , Вт – максимальная мощность, потребляемая СЭ; $\eta_{ЭМ}$, % – КПД СЭ привода выпускного клапана

Чаще всего конструктивные средства повышения эффективности силовых электромагнитов по величинам развиваемой электромагнитной силы и быстродействию представляют собой попытки увеличения площади рабочих воздушных зазоров при максимальном снижении размеров частей магнитов, подводящих магнитный поток к рабочему воздушному зазору.

Сила, возвращающая якорь в исходное положение, создается в ЭМПК пружиной. Для повышения эффективности в конструкции могут использоваться двоянные электромагниты двойного действия. Электромагнитная сила второго электромагнита для первого служит возвращающей, заменяя или дополняя силу пружины. Иногда возможно создание возвращающей силы упругостью магнитопровода якоря. В большин-

стве электромагнитов электромагнитная сила с уменьшением зазора растет быстрее, чем сила пружины. При нулевом зазоре, когда якорь вплотную прилегает к полюсу сердечника, коэрцитивная сила, создаваемая даже оставшимся после выключения тока магнитным потоком, может удерживать якорь в притянутом состоянии – возникает, так называемый, эффект «залипания». В устройстве ЭМПК этот эффект недопустим.

В процессе эксплуатации значительное ослабление пружины приводит к ускорению срабатывания электромагнита и снижению темпа закрытия клапана. Возможна конструкция с параллельным воздействием электромагнита и пружины.

Учитывая специфику работы электромагнитного привода клапанов, в частно-

сти, необходимость обеспечения полного выхода клапанов для двигателей средней и большой мощности на 10...25 мм, проектирование электромагнита является сложной задачей. Основные элементы (электромагниты, соленоиды) промышленностью серийно не выпускаются, и поэтому их разработка ведется всеми заинтересованными фирмами индивидуально для конкретных типов двигателей.

Так как ЭМПК в данном случае является силовым, то необходимо обеспечить требуемый закон движения якоря, определяемый законом перемещения клапана газораспределения. В частности, для обеспечения плавного безударного движения выходного штока электромагнита необходимо добиться синусоидального изменения ускорения.

Однако до сего времени создать компактную работоспособную систему ЭМПК не удается. Лимитируют несколько узловых параметров, являющихся главными в ЭМПК. Это громоздкость конструкции, большая энергоемкость, значительный шум, возникающий в момент удара при посадке клапанов на седла, требование принудительного охлаждения силовых обмоток электромагнитов и др. [Исследователи Abthoff, Bachschmid и другие, 1991 г.; Brust и Schwarzenthal, 1998 г.; Hosaka и Hamazaki, 1991 г.; Jost, 1997 г.].

Как правило, сравнивая механический привод и ЭМПК, исследователи используют в качестве базового механического привода систему VTEC или другие подобные.

Наибольший интерес представляют эксперименты, проведенные с системой ЭМПК под названием «EMV» [Butzmann, Melbert и другие, 2000 г.].

Так как ЭМПК является силовым, то необходимо обеспечить требуемый закон движения якоря, определяемый законом перемещения клапанов газораспределения. Учитывая специфику работы ЭМПК, в частности, необходимость обеспечения полного выхода клапанов для большинства двигателей на 10...25 мм, проектирование силовых электромагнитов является сложной технической задачей.

ЭМПК имеет ряд коренных преимуществ перед механическим, пневматическим и гидравлическим типами приводов, заключающийся, прежде всего, в возможности программного регулирования фаз газораспределения и хода клапанов в зависимости от режимных параметров двигателя.

Указанные соображения послужили основой для исследования работы ЭМПК на безмоторных стендах дизелей ЧН 26/26 [2, 3].

В результате установлено, что для дизелей типа ЧН 26/26 ЭМПК должен

удовлетворять следующим требованиям:

- подъем (посадка) впускного клапана не более 116^0 п.к.в. или при номинальной частоте вращения коленчатого вала $n=1000$ мин⁻¹ время подъема (посадки) не более 19,3 мс;

- подъем (посадка) выпускного клапана не более 134^0 п.к.в. при $n=1000$ мин⁻¹ соответственно время подъема (посадки) не более 22,3 мс;

- скорость в момент посадки клапана должна быть $V_{\text{пос}}=0,5...0,6$ м/с;

- максимальный ход клапана – $h_{\text{кл}}=22$ мм.

На быстроедействие ЭМПК оказывают влияние следующие факторы:

- емкость форсирующего конденсатора C ;

- напряжение заряда форсирующего конденсатора $U_{\text{ф}}$;

- число витков обмотки силового электромагнита W ;

- начальный зазор между внешним якорем и сердечником δ ;

- подача дополнительных импульсов при подъеме и посадке клапана на обмотку силового электромагнита.

Некоторые результаты испытаний ЭМПК на безмоторном стенде дизеля ЧН 26/26 представлены на осциллограммах рис. 2, 3. Регулирование «времени-сечения» обеспечивалось изменением длительности управляющего импульса.

С ростом емкости и напряжения увеличивается время посадки клапана, которое, однако, не превышает допустимой величины. При $C = 400$ и 500 мкФ, полный подъем клапана не достигается (соответственно $h_{\text{кл}}=18,8$ и $19,8$ мм рис. 2, а и б).

Для двух других случаев при $C = 600$ и 800 мкФ обеспечивается полный подъем клапана при допустимом времени подъема и посадки (рис. 2, в и г). Дальнейшее увеличение емкости не влияет на время подъема клапана.

В большей степени на темп подъема клапана оказывает напряжение форсирующего конденсатора. Небольшое увеличение напряжения относительно базового значения существенно уменьшает время подъема клапана. Так, если при напряжении 280 В (рис. 3, а) клапан полностью не открывается ($h_{\text{кл}} = 17,5$ мм), то при напряжении в 320 В (рис. 3, б) обеспечивается максимальный ход ($h_{\text{кл}} = 22,0$ мм).

Не меньшее влияние на величину максимального подъема клапана и темп открытия оказывает число витков обмотки силового электромагнита.

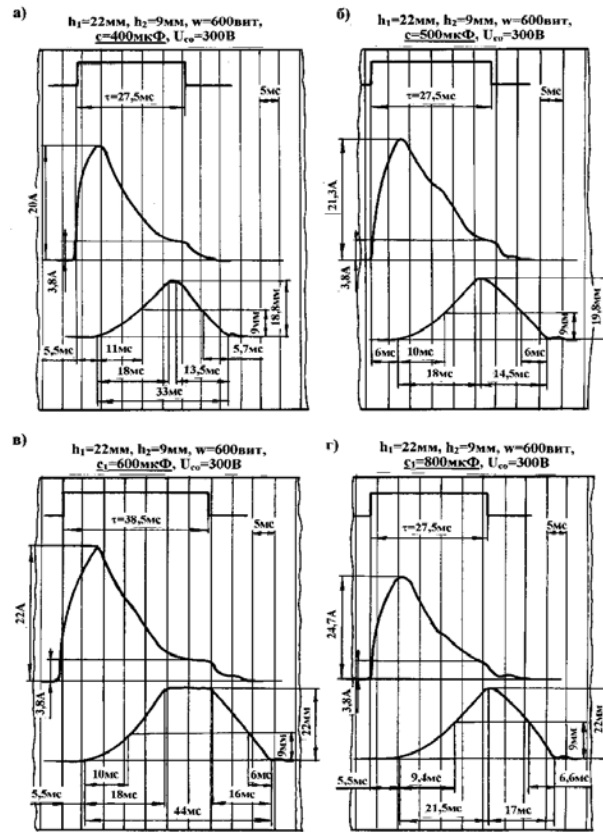


Рис. 2. Некоторые осциллограммы испытаний ЭМПК безмоторного стенда дизеля ЧН 26/26

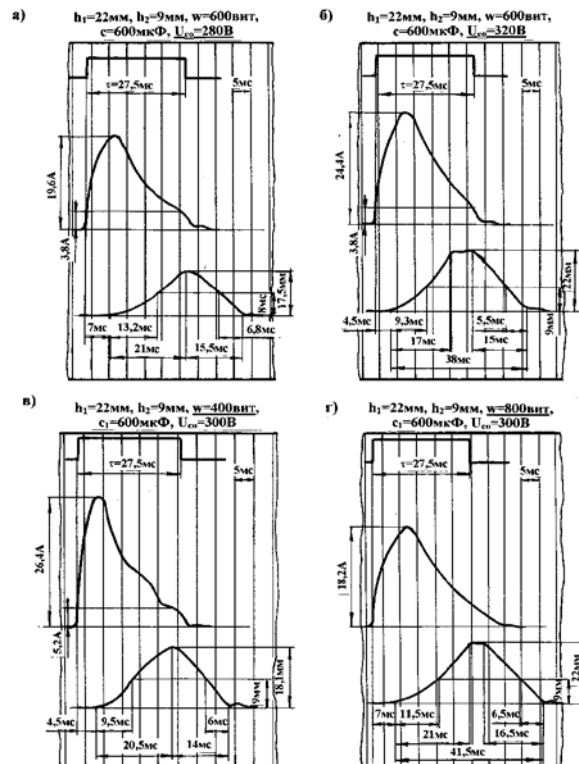


Рис. 3. Некоторые осциллограммы испытаний ЭМПК безмоторного стенда дизеля ЧН 26/26

Увеличение числа витков свыше $W=600$ затягивает время подъема, что объясняется увеличением сопротивления и индуктивности обмотки, а также снижением тока (изменение видно на рис. 3, б, в и г соответственно для $W=600, 400$ и 800 вит). Кроме того, сильно меняется темп изменения тока. При этом время посадки клапана меняется незначительно.

Выбор начального зазора между внешним якорем и сердечником оказывает небольшое влияние на время подъема клапана. Так увеличение зазора с $h_2 = 6$ до 12 мм уменьшает время подъема клапана с 21 до 20 мс. При базовом зазоре $h_2 = 9$ мм обеспечивается необходимое быстрое действие при

подъеме клапана. Время посадки в этом случае остается практически постоянным.

Во всех рассмотренных выше опытах скорость посадки клапана значительно превышала $2...3$ м/с. Для торможения клапана перед посадкой на обмотку силового электромагнита подавался дополнительный импульс. Путем выбора параметров тормозного импульса и момента его подачи можно снизить скорость клапана при посадке до значений $0,4...0,5$ м/с и исключить повторный отскок.

На основании проведенных исследований для дизеля типа ЧН 26/26 рекомендуются параметры системы ЭМПК, приведенные в таблице.

Параметры	Величина	Параметры	Величина
Якорь внутренний: диаметр внешний, м; диаметр внутренний, м; площадь, м ² ; толщина, м; масса, кг	$100 \cdot 10^{-3}$	Силовой электромагнит: диаметр, м; высота, м; масса, кг	$150 \cdot 10^{-3}$
	$50 \cdot 10^{-3}$		$150 \cdot 10^{-3}$
	$5148 \cdot 10^{-6}$	Зазор между сердечником и внешним якорем, м	$1,8$
	$10 \cdot 10^{-3}$		$9 \cdot 10^{-3}$
	$0,656$	Форсирующий конденсатор: емкость, мкФ; напряжение, В	600
Якорь внешний: диаметр внешний, м; диаметр внутренний, м; площадь, м ² ; толщина, м; масса, кг	$130 \cdot 10^{-3}$		300
	$100 \cdot 10^{-3}$	Обмотка силового электромагнита: число витков; диаметр провода, мм	600
$5397 \cdot 10^{-6}$	0,8		
	$6 \cdot 10^{-3}$	Емкость конденсатора для дополнительного импульса, мкФ	200
	$0,35$		
Кольцо между якорями: толщина, м; масса, кг	$7 \cdot 10^{-3}$		
	$0,24$		
Штоки якорей: масса, кг	$0,25$		

Выводы

Хотя ЭМПК является заманчивым техническим решением, его широкое применение представляется проблематичным. Есть области, где преимущества возобладают над недостатками, например, на тихоходных дизелях судовых модификаций, не имеющих ограничений по массе и габаритам.

Для тепловозных дизелей ЧН 26/26 силовой электромагнит привода только одного выпускного клапана имеет массу свыше 16 кг, причем, сердечник и обмотка имеют примерно равный вес. В среднем КПД привода несколько выше 50% , а на отдельных оптимальных режимах работы двигателя

КПД может достигнуть величины 89% . Средняя потребляемая мощность на привод составляет приблизительно 1 кВт/клапан при частоте вращения коленчатого вала в 1000 об/мин. Электромагниты необходимо интенсивно принудительно охлаждать.

Список литературы

1. Калугин С.П. Балабин В.Н. К вопросу о предельно достижимых характеристиках силовых электромагнитов // Прикладная физика. – 2005. №5. – С. 130–136.
2. Балабин В.Н. Перспективы развития электромагнитного привода клапанов газораспределения транспортного двигателя. // Соискатель. – 2004. №1. – С. 72–87.
3. Балабин В.Н. Электромагнитный привод клапанов газораспределения транспортных дизелей нового поколения // Тяжелое машиностроение. – 2007. №7. – С. 35–37.