

## К вопросу о предельно достижимых характеристиках силовых электромагнитов

С. П. Калугин, В. Н. Балабин

Московский государственный университет путей сообщения, Москва, Россия

**Исследованы возможности совершенствования силовых электромагнитов в направлении получения более высоких удельных показателей; выясняются пределы таких возможностей.**

Для реализации возможностей микропроцессорного управления двигателем внутреннего сгорания 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. "Подкупает" его простота установки и удобство управления. Именно ЭМПК мог бы стать решением проблемы регулирования фаз газораспределения (ФГР) в широком диапазоне.

Кроме того, при ЭМПК реализуются оптимальные энергетические и экологические показатели дизеля при любых режимах работы.

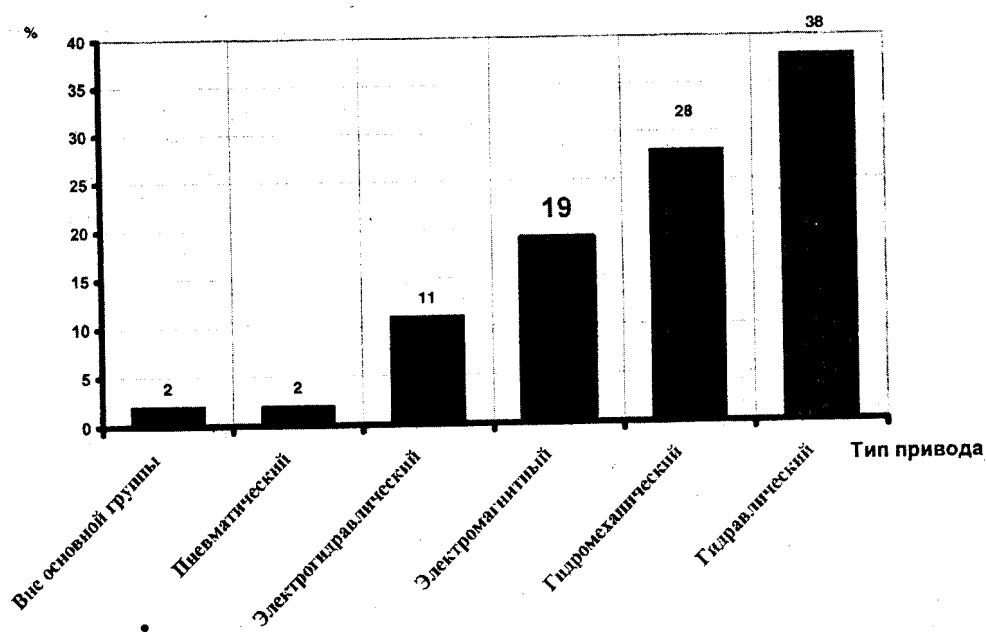
Применение данного типа привода нашло практическое применение начиная с конца 80-х годов XX века. Особенно большое число патентных публикаций принадлежит Франции, США и Японии. Преимуществ ЭМПК достаточно много, это:

- 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;
- самый высокий КПД из всех существующих немеханических систем привода.

Формированием микропроцессорного и программного обеспечения для решения многочисленных вопросов, связанных с регулированием топливоподачи и газообмена, в настоящее время занимаются порядка 15 групп и фирм, такие как: Society of Automotive Engineers, Ricardo Group plc, CAD-FEM GmbH, Association of International Automobile Manufacturers, Inc., American Society of Mechanical Engineers (ASME), European Automotive Initiative Group (EAIG), International Society for Measurement & Control (ISA), MIT International Motor Vehicle Program и др.

Распределение патентных источников по видам привода клапанов газораспределения транспортных двигателей представлено на рисунке.



*Распределение патентных источников по видам привода клапанов газораспределения транспортных двигателей внутреннего сгорания*

ЭМПК позволяет получить оптимальные энергетические и экологические показатели дизеля при любых режимах работы, в том числе без малейших затруднений реверсировать дизель, осуществлять декомпрессию при пуске и режим противовращения, использовать двигатель внутреннего сгорания в качестве поршневого компрессора и др.

Электропривод многих исполнительных устройств осуществляется с помощью электромагнитов линейного и углового перемещения. Однако зачастую электромагнит с требуемым усилием, ходом якоря и быстродействием имеет неудовлетворительные массогабаритные показатели, а при заданных массе и габаритах требуемые усилие и быстродействие не могут быть реализованы.

В настоящее время возникает острая необходимость создания компактных и эффективных исполнительных устройств, преобразующих электрический сигнал в механическое воздействие.

Все вышесказанное ставит задачу выяснения возможностей совершенствования электромагнитов в направлении получения более высоких удельных показателей и предела таких возможностей.

Электромагниты с одной обмоткой можно разделить на две основные группы: силовые, работающие на перемещение якоря, и полевые, создающие магнитное поле. Во втором случае магнитная проводимость магнитной цепи постоянная, не зависящая явно от времени, в первом случае она изменяется, и именно за счет ее изменения возникает сила, которую можно было бы назвать силой Максвелла (по аналогии с формулой для вычисления этой силы). Хорошо известная сила Ампера существенным образом отличается от силы Максвелла: сила Ампера действует только на проводник с током.

Итак, имеются три числа, исчерпывающим образом характеризующие электромагнит: ход якоря, начальное тяговое усилие и время полного втягивания якоря. Необходимо найти максимальные значения при заданных размерах и массе электромагнита.

Усилие электромагнита может быть найдено по энергетической формуле

$$F_{em} = \frac{(wi)^2}{2} \frac{d\Lambda(x)}{dx}, \quad (1)$$

где  $wi$  — магнитно-движущая сила или ампервитки;

$\Lambda(x)$  — магнитная проводимость всей магнитной цепи как функция перемещения якоря  $x$ .

Как видно, ампер-витки являются главенствующим фактором. Будем искать максимально достижимые ампер-витки цилиндрического соленоида по условию охлаждения. При выполнении этого условия электрическая мощность не

должна превышать мощность, отводимую в виде тепла. Рассмотрим установившийся режим и предположим, что отводимая мощность пропорциональна поверхности теплообмена. В этом случае условие охлаждения запишется в виде

$$P_{dis} \leq k_h S_{sp} \Delta t, \quad (2)$$

где  $P$  — электрическая мощность, Вт;

$k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$S$  — площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  — разность между допустимой температурой обмотки и температурой охлаждающей среды (температурный напор).

Выражение (2) справедливо при условии, что перепады температур внутри обмотки много меньше перепада температур между обмоткой и охлаждающей средой (теплопроводность обмотки велика).

Будем считать, что поверхность теплообмена — это наружная цилиндрическая поверхность и две плоские боковые поверхности, а выделяющееся тепло — это джоулево тепло. С учетом этих предположений условие охлаждения примет следующий вид:

$$i^2 R \leq k_h \Delta t \left( 2 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) + \pi D h \right), \quad (3)$$

где  $D$  — наружный диаметр обмотки;

$d$  — внутренний диаметр обмотки;

$h$  — высота цилиндра;

$R$  — сопротивление обмотки.

Сопротивление обмотки можно найти по известной формуле

$$R = \frac{\rho l}{S_{wire}}, \quad (4)$$

где  $l$  — длина обмоточного провода, м;

$S$  — его сечение, мм<sup>2</sup>;

$\rho$  — удельное сопротивление материала провода, Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Длина и сечение провода могут быть выражены через размеры обмотки, если предположить, что обмотка занимает все сечение

$$l = \pi D_{mid} w = \pi \frac{D+d}{2} w; \quad (5)$$

$$S_{wire} k_{wind} w = h \frac{D-d}{2}, \quad (6)$$

где  $S_{wire}$  — сечение обмоточного провода, мм<sup>2</sup>;

$k_{wind}$  — обмоточный коэффициент (коэффициент заполнения).

Подставим (5) и (6) в (4)

$$R = \pi k_{wind} w^2 \frac{\rho}{h} \frac{D+d}{D-d}. \quad (7)$$

Теперь подставим (7) в (3) и отметим, что в левой части появились ампер-витки, сократим на  $\pi$  правую и левую части и перенесем в правую часть геометрические характеристики

$$\rho k_{wind}(wi)^2 \leq k_h \Delta t \left( \frac{h}{2} (D-d)^2 + Dh^2 \frac{D-d}{D+d} \right). \quad (8)$$

Для приведения выражения (8) к виду, более удобному для исследования, введем безразмерные переменные: коэффициент диаметра  $\alpha$  и коэффициент длины  $\beta$ .

Перепишем (8) с учетом введенных обозначений:

$$\rho k_{wind}(wi)^2 \leq k_h \Delta t D^3 \left( \frac{\beta}{2} (1-\alpha)^2 + \beta^2 \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right). \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что создание компактных электромагнитов является технологически чрезвычайно трудной задачей: диаметр входит в выражение в третьей степени, а все остальные переменные — в первой.

Подставим найденное из (9) значение ампер-витков в (1), особо обозначая при подстановке функцию геометрических параметров

$$F_{em} \leq \frac{k_h \Delta t D^3}{\rho k_{wind}} \frac{d\Lambda(x)}{dx} \phi(\alpha, \beta). \quad (10)$$

Формула (10) приводит нас к замечательному выводу: *ни число витков, ни сила тока в обмотке не влияют на предельно достижимую в статическом режиме по условию охлаждения электромагнитную силу*.

Рассмотрим возможные пути увеличения электромагнитной силы. Снижение удельного сопротивления материала провода возможно путем замены меди на серебро; этим достигается выигрыш в 0,0172/0,0165 раза, или менее чем на 10 %, а более электропроводного материала, чем серебро, в природе не существует (сопротивление сплавов всегда больше сопротивления чистых металлов). Использование сверхпроводимости наталкивается на иные чрезвычайно значительные трудности, анализ которых выходит за пределы настоящей статьи. Все же можно указать основную трудность — при достижении некоторого критического значения напряженности магнитного поля сверхпроводимость скачком разрушается. Критическое значение напряженности поля зависит от свойств материала. В настоящее время достигнуты сравнительно высокие значения, которые не позволяют говорить о практическом применении сверхпроводящих электромагнитов. Увеличение температурного напора может быть достигнуто лишь за счет увеличения рабочей температуры обмоток, поскольку применение холодильных машин и

нежелательно (ввиду их сложности и наличия в них потерь), и неэффективно (ввиду невозможности понизить температуру более чем на 300 °C — температуры ниже абсолютного нуля недостижимы). Можно было бы увеличить температуру обмоток, но здесь также имеются два лимитирующих фактора — температура плавления материала провода (для меди — 1083 °C, для серебра еще меньше — 960 °C) и температура, при которой изоляция сохраняет свои свойства.

Фторопласт — самый высокотемпературный из органических изоляторов — выдерживает температуру 400 °C, что явно недостаточно, поэтому необходимо применять керамику. В этом случае предел температур связан с увеличением ионной электропроводности керамики. Кроме повышения рабочих температур применение тонкослойных керамических изоляторов дает второе, еще более значительное преимущество, заключающееся в увеличении теплопроводности обмотки, складывающейся из теплопроводности металлических проводов и неметаллической изоляции. Теплопроводность же металлов и традиционных изоляторов различается более чем на два порядка. Другим возможным путем повышения теплоотдачи является пропускание хладагента через всю толщу обмотки как через пористое тело.

Чрезвычайно серьезной проблемой является увеличение удельного сопротивления материала обмотки с увеличением температуры. Так, удельное сопротивление электротехнической меди при увеличении температуры приблизительно на 240 °C удваивается, и при расчете предела возможностей обмотки пренебрегать возрастанием сопротивления недопустимо. Кроме того, при высоких температурах снижается электрическая прочность изоляции, а значит, требуется слой изоляции большей толщины и увеличивается объем электромагнита (за счет снижения обмоточного коэффициента). Возникает совершенно новая задача — оптимизация температуры обмотки по отдаче механической работы на единицу объема электромагнита или на единицу подведенной электрической энергии, различная, по-видимому, для различных режимов работы (частоты переключения и относительной продолжительности включенного состояния).

Работа электромагнита в динамическом режиме имеет особенность, заключающуюся в весьма кратковременном подводе электрической энергии, при котором повышение температуры обмотки зависит не только от интенсивности теплоотдачи, но и от теплопроводности самой обмотки. Найдем выражение для этого случая создания электромагнитной силы, предполагая, что ток в обмотке устанавливается значительно быстрее, чем длится включенное состояние электромагнита, а теплоотдаче можно пренебречь. Условие примет следующий вид:

$$i^2 R \tau \leq C m \Delta t, \quad (11)$$

где  $\tau$  — длительность включеного состояния;  
 $C$  — средняя теплоемкость обмотки;  
 $m$  — масса обмотки;  
 $\Delta t$  — средняя температура обмотки.

В правой части выражения (11) находится то значение теплоты, при котором максимальная температура обмотки будет максимально допустимой. Выражая среднюю температуру через максимально допустимую, получим

$$i^2 R \tau \theta \leq C m \Delta t_{\max}, \quad (12)$$

где  $\theta > 1$  — отношение максимальной температуры к средней.

Среднюю массу найдем приближенно как

$$m = \frac{\rho_{den} \pi (D^2 - d^2) h k_{wind}}{4}, \quad (13)$$

где  $\rho_{den}$  — плотность материала провода.

Подставляя (13) в (12) и учитывая (7), получим

$$\begin{aligned} \pi k_{wind} (wi)^2 \frac{\rho}{h} \frac{D+d}{D-d} \tau \theta &\leq \\ &\leq C \frac{\rho_{den} \pi (D^2 - d^2) h k_{wind}}{4} \Delta t_{\max}. \end{aligned} \quad (14)$$

Упрощая (14), получим

$$(wi)^2 \leq \frac{C \rho_{den} \Delta t_{\max}}{4 \tau \rho_{el} \theta} D^4 (\beta^2 (1-\alpha)^2). \quad (15)$$

Подставляя (15) в (1) и вновь вводя особое обозначение для функции соотношения геометрических размеров, получаем формулу

$$F_{em} \tau \leq \frac{C \rho_{den} \Delta t_{\max} D^4}{4 \rho \theta} \frac{d \Lambda(x)}{dx} \psi(\alpha, \beta). \quad (16)$$

В левой части формулы (16) теперь находится импульс силы. Как видно, характерный размер обмотки вновь входит в выражение в высокой степени. Силу можно увеличить, укорачивая время прохождения тока, но на этом пути возникает новый барьер — индуктивность обмотки. Для преодоления противоЭДС будет необходимо все большее напряжение, некоторое значение которого будет предельно допустимым по условию электрической прочности изоляции.

Введение средней температуры связано с неоднородностью поля температур по сечению обмотки. Найдем распределение температур по сечению для обмотки, рассматриваемой выше, считая, что обмотка представляет собой одно-

родное тело с равномерно распределенными источниками тепла. Очевидно, максимальная температура, которую нам также надо найти, будет достигнута на внутренней цилиндрической стенке, на высоте, равной половине высоты обмотки. Данную задачу удобно решать в цилиндрических координатах. Коэффициент теплопроводности материала провода будем считать постоянным.

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{C \rho_{den}} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}(t)) + \frac{q_v}{C \rho_{den}}, \quad (17)$$

где  $t$  — температура, К;

$\tau$  — время, с;

$\lambda$  — теплопроводность, Вт/м·К.

С учетом введенных допущений получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C \rho_{den}} \nabla^2 t + \frac{q_v}{C \rho_{den}},$$

причем в цилиндрических координатах .

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2},$$

где  $\phi$  — полярный угол.

А с учетом цилиндрической симметрии обмотки

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}.$$

Пользуясь функцией Хевисайда  $\eta(x)$ , можно записать выражение для объемной мощности внутренних источников теплоты

$$q_v(r, \phi, z, \tau) = q_{v0} (\eta(r - 0,5d) - \eta(r - 0,5D)) \times \\ \times (\eta(z) - \eta(z - h)),$$

$$\text{где } q_{v0} = \frac{i^2 R}{V_{wind}} = \frac{(wi)^2 4 \rho k_{wind}}{D^4 \psi(\alpha, \beta)}.$$

Начальные условия очень просты: температура в любой точке обмотки в начальный момент времени равна температуре охлаждающей среды. Границные условия будут двух видов, и записать их ненамного сложнее. Границное условие первого вида заключается в том, что температура охлаждаемых поверхностей обмотки в любой момент времени равна температуре охлаждающей среды. Условие второго вида заключается в том, что поток тепла через неохлаждаемые поверхности (в нашем случае через внутреннюю цилиндрическую поверхность) в любой момент времени равен нулю.

Решив рассмотренное уравнение, мы получим поле температур в обмотке электромагнита в любой момент времени. Найдя тот момент времени, при котором максимальная температура в обмотке (максимум по объему) достигнет максимально допустимого значения (максимум по времени), получим искомое значение электромагнитной силы.

Необходимо отметить, что не только тепловые процессы могут лимитировать электромагнитную силу. Кроме усилия, действующего на якорь электромагнита, при прохождении тока по обмотке возникают силы, стремящиеся разорвать обмотку изнутри, сходные по направлению с силами, нагружающими материал трубы с внутренним избыточным давлением или центробежными силами. В опытах П. Л. Капицы, проводившихся в лаборатории Э. Резерфорда, эти силы были столь велики, что приводили к взрывоподобному разрушению катушек.

Исследование быстродействия электромагнитов представляет собой еще более сложную задачу, поскольку электромагнитные, тепловые и механические процессы необходимо описывать отдельными уравнениями. Тем не менее задачу можно существенно упростить, вводя определенные допущения. Рассмотрим электромагнит, сопротивление обмотки которого пренебрежимо мало (в этом случае можно не учитывать влияние температуры, и упрощается уравнение электрического состояния), а единственная сила, приложенная к якорю, — это его сила инерции (рассматриваем режим холостого хода электромагнита и пренебрегаем трением, при этом существенно упрощается механическое уравнение). Считаем, что электромагнит включается на постоянное напряжение. Будем искать время срабатывания такого электромагнита. Запишем уравнение электрического состояния

$$u(t) = -\frac{d\Psi}{dt} + Ri, \quad (18)$$

где  $\Psi = Li$  — потокосцепление катушки.

Очевидно, переменными являются и ток, и индуктивность, поэтому вычисляем производную от сложной функции. С учетом принятых допущений уравнение (18) примет следующий вид:

$$U_m = L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt},$$

где  $t$  — время (в отличие от (11) или (17)).

Выражая индуктивность через магнитную проводимость, получим

$$U_m = w^2 \Lambda(x) \frac{di}{dt} + iw^2 \Lambda'(x) \frac{dx}{dt}.$$

Далее перенесем в левую часть производную от тока по времени

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_m}{w^2 \Lambda(x)} - i \frac{\Lambda'(x)}{\Lambda(x)} \frac{dx}{dt}.$$

Заметим, что второй член в правой части представляет собой произведение тока на логарифмическую производную магнитной проводимости

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_m}{w^2 \Lambda(x)} - i \frac{d(\ln \Lambda(x(t)))}{dt}. \quad (19)$$

Уравнение (19) представляет собой упрощенное уравнение электрического состояния силового электромагнита.

Далее воспользуемся уравнением (1), в котором приравняем электромагнитную силу силам сопротивления

$$F_{em} = \frac{(wi)^2}{2} \frac{d\Lambda(x)}{dx} = m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_0.$$

Учитывая принятые допущения, получим

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{(wi)^2}{2m} \Lambda'(x). \quad (20)$$

Уравнение (20) представляет собой упрощенное уравнение динамики силового электромагнита.

Уравнения (19) и (20) образуют систему

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U_m}{w^2 \Lambda(x)} - i \frac{d(\ln \Lambda(x(t)))}{dt} \\ \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{(wi)^2}{2m} \Lambda'(x) \end{cases} \quad (21)$$

Система (21) является системой 3-го порядка, неоднородной и существенно нелинейной, содержащей две неизвестные функции (ток в обмотке и перемещение якоря) и имеющей нулевые начальные условия. (Однородная система имела бы  $U_m = 0$ , т. е. короткозамкнутую обмотку; начальные условия для получения нетривиального решения в такой системе должны быть ненулевыми.) Система (21) выведена для случая

$$\tau = \frac{L}{R} = \infty,$$

где  $\tau$  — электромагнитная постоянная времени.

Решить систему (21) аналитически невозможно без каких-либо предположений о свойствах функции  $\Lambda(x)$ . Известно, что указанная функция

чрезвычайно сложна. Она вычисляется для каждой конкретной конструкции электромагнита, и для ее вычисления применяются методы теории поля. Можно считать, что она представляет собой комбинацию степенных, тригонометрических и гиперболических функций с большим числом параметров. Подставлять полученную из таких расчетов функцию  $\Lambda(x)$  в систему (21) бесмысленно из-за объема одних только алгебраических преобразований. Единственным путем, ведущим к цели, представляется аппроксимация функции  $\Lambda(x)$ , причем удачная аппроксимационная формула может дать высокую точность метода при сокращении объема вычислений. Если построить графики электромагнитной силы, скорости якоря электромагнита и времени его движения до текущей координаты  $F(x)$ ,  $v(x)$  и  $t(x)$  в функции текущей координаты, т. е. перемещения якоря, как обычно строят графики в теории локомотивной тяги, то можно заметить, что погрешности в задании электромагнитной силы неравноценны для точности вычисления времени. При малых  $(x)$  и, соответственно, больших зазорах влияние велико (потоками рассеяния и выпучивания пренебрегать нельзя), но по мере втягивания якоря скорость быстро растет, а с ней снижаются затраты времени на прохождение единицы пути. Закон движения якоря на конечном участке пути вообще не отражается на времени движения. Таким образом, влияние точности задания  $F(x)$  на вычисленное время движения снижается с увеличением  $(x)$  (перераспределением потоков и насыщением можно пренебречь, практически не снижая точности).

Теперь на основании рассмотренных соображений сформулируем требования, предъявляемые к аппроксимационной функции, она должна:

совпадать с точной функцией при малых  $(x)$ ;

иметь по возможности более простой вид и минимальное количество параметров;

иметь легко находимую аналитически первую производную, и ее выражение должно быть простым;

иметь легко находимый аналитически логарифм, и его выражение также должно быть простым;

желательно, чтобы ни функция, ни ее производная не имели разрывов при допустимых значениях  $(x)$ ;

желательно, чтобы функция, обратная к аппроксимирующей, также имела простое выражение и не имела разрывов.

Выбрав функцию, удовлетворяющую требованиям, подставляем ее в систему (21), и если уравнения не удается упростить, то ищем более подходящую функцию.

Как показывает анализ системы (21), к числу параметров относятся размеры магнитопровода (через функцию  $\Lambda(x)$ ), число витков обмотки, масса якоря и напряжение питания.

При отыскании предельно достижимых параметров мы должны избавляться от произвольно выбираемых параметров. В системе (21) таковым является напряжение питания. Найдем связь между напряжением питания и свойствами изоляции.

Будем считать, что обмотка электромагнита — рядовая, виток к витку. Обозначим через  $n$  число витков в слое, а через  $m$  — число слоев.

Тогда можно записать следующие выражения:

$$\frac{D-d}{2} = m(d_{st} + \delta_{ins}); \quad (22)$$

$$h = n(d_{st} + \delta_{ins}). \quad (23)$$

Разделив (22) на (23) и учитя введенные выше выражения для  $\alpha$  и  $\beta$ , получим уравнение

$$\frac{m}{n} = \frac{1-\alpha}{2\beta}.$$

Поскольку  $mn = w$ , получаем систему уравнений, из которой

$$m = \xi \sqrt{w}, \quad (24)$$

где  $\xi = \xi(\alpha, \beta) = \sqrt{\frac{1-\alpha}{2\beta}}$  — еще одна функция геометрических параметров катушки.

Напряжение питания электромагнита должно удовлетворять условию

$$U_m \leq E_{st} \delta_{ins} m, \quad (25)$$

где  $E_{st}$  — электрическая прочность изоляции, В/м;

$\delta_{ins}$  — толщина межслоевой изоляции.

Выбирая равенство в условии (25) и подставляя  $m$  из (24), получим

$$U_m = E_{st} \delta_{ins} \xi \sqrt{w}. \quad (26)$$

С учетом (26) система (21) приобретает вид

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{E_{st} \delta_{ins} \xi}{w^{3/2} \Lambda(x)} - i \frac{d(\ln(x(t)))}{dt} \\ \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{(wi)^2}{2m} \Lambda'(x) \end{cases}. \quad (27)$$

Учет тепловых явлений заключается в объединении системы (27) с уравнением теплового состояния на основе зависимости электрической прочности изоляции от температуры.

Выполненный расчет ЭМПК двигателей средней и высокой быстродействия позволил сформулировать следующие требования к системе:

- габаритно-присоединительные размеры ЭМПК не должны увеличивать габаритов двигателя;
- рабочее напряжение — 42 или 100 В;
- время полного открытия и полного закрытия ( $270^\circ$  поворота коленчатого вала) — 0,0025—0,003 с;
- привод должен обеспечить мягкую посадку клапана на седло;
- необходимая сила посадки клапана (250—300 Н) должна гарантировать хорошую теплопередачу клапан — седло, что особенно важно для выпускного клапана;
- потребляемая мощность на каждый клапан при  $6000 \text{ мин}^{-1}$  — не более 65 Вт.

Хотя ЭМПК является заманчивым техническим решением, его широкое применение с ис-

пользованием электромагнитов традиционной конструкции представляется проблематичным. Есть области, где преимущества возобладают над недостатками, например, на тихоходных дизелях судовых модификаций, не имеющих ограничений по массе и габаритам. Что же касается более компактных установок, то необходимость охлаждения электромагнитов, а главное — высокая стоимость, вызывает сомнения в практической ценности идеи ЭМПК двигателей внутреннего сгорания. Однако применение новых технических решений, таких, как использование в качестве изоляции керамики со специально подобранными свойствами (температурный коэффициент расширения, теплопроводность, электрическая прочность), открывает новые перспективы для силовых электромагнитов.

*Статья поступила в редакцию 18 января 2005 г.*

## To the problem on the extreme accessible performances of power electromagnets

S. P. Kalugin, V. N. Balabin

Moscow State University of Communication, Moscow, Russia

*Consideration is made to the opportunities the power electromagnets in a direction of achievement of higher specific exponents, and also account is taken on limits of such opportunities.*

УДК 535.42

## Гологramмы, созданные на компьютере с помощью техники бинарных прямоугольных и кругообразных масок

D. Данчулеску

Национальный колледж "Михай Витеазул", г. Бухарест, Румыния

K. Данчулеску

Бухарестский университет, г. Бухарест, Румыния

*На базе техники бинарных прямоугольных масок для создания компьютерных голограмм в аналогичных целях развита техника бинарных кругообразных масок.*

Зарегистрировав картину интерференции, созданную предметной волной и опорной волной, что определяет классическую голограмму, Lohmann с сотрудниками [1—4] продемонстрировали, как компьютер может воспроизводить на бумаге голограммы на базе техники бинарных прямоугольных масок. В данной работе с той же целью развита техника бинарных кругообразных масок. Обе техники пригодны для создания на компьютере голограмм предметов, которые могут быть легко описаны математически.

В данном смысле голограммы, созданные на компьютере, состоят из множества прямоугольных или кругообразных прорезей, нарисованных на черном фоне; их бинарное свойство облегчает создание голограмм. Размер прорези пропорционален модулю амплитуды, а ее позиция определена фазой. Как амплитуда, так и фаза вычисляются программой для каждой точки математически созданного предмета [5—13].

Данная работа объясняет принцип техники бинарных прямоугольных и кругообразных ма-