

Thomas, Pischinger Martin, Göbel Thomas // *MTZ: Motortech. Z.* –1996. –57, №2.–S.106–112, 114–115. 18. Hatannura Koichi, Hitomi Mitsuo, Ohe Hiromi, Kobaya-

shi Takashi // *Nihonikai gakkai ronbunshu. B = Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B.*–1995–61, №590.–P. 3477–3483.

УДК 621.436.038

**А.Н. Врублевский, канд. техн. наук, А.Л. Григорьев, д-р техн. наук, А.В. Денисов, инж.**

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ВПРЫСКИВАНИЯ

### Введение

В практике двигателестроения широко используются различные методы оптимизации. При этом оправдывают себя подходы, основанные на решении прямой задачи – проведение серии численных экспериментов с целью определения показателей системы при различном сочетании ее параметров [1].

Экономический эффект от применения виртуального (численного) эксперимента очевиден. Это широкая возможность перебора комбинаций параметров, большое (до 4000 и более) количество экспериментов, возможность наблюдать изменение таких параметров (давлений, перемещений, температур), измерение которых произвести сложно, а подчас и невозможно. И, как результат, при сокращении времени и материальных затрат на проектирование возможность получить двигатель либо отдельную его систему с лучшими по сравнению с аналогами параметрами.

Успешное решение оптимизационной задачи зависит от достоверности применяемых математических моделей, а также метода ее организации. В данной статье представлен опыт, накопленный авторами при определении оптимальных параметров аккумуляторной топливной системы (АТС) с электронным управлением, предназначенной для высокооборотного дизеля серии 4ДТНА. Особенности применяемых математических моделей АТС рассмотрены в работах [2 – 4]. Там же показана их достоверность и опи-

саны явления, которым при моделировании процесса топливоподачи уделено повышенное внимание. Следует отметить, что любой метод оптимизации не исключает человеческий фактор или, так называемый «совет специалистов». Совет специалистов играет решающую роль как при выборе параметров, ограничений и критериев, так и при выборе результата оптимизации.

### Анализ публикаций

Оптимизации топливоподающей аппаратуры (ТПА) непосредственного действия посвящено много работ отечественных и зарубежных специалистов. Из них можно выделить работы [5 – 7], в которых авторы используют методы, основанные на построении в каждой точке области функциональной модели процесса топливоподачи и определении вектора поиска на основе ее анализа. Для получения регрессии используется теория планирования эксперимента, что позволяет найти направление поиска при сокращенном количестве численных экспериментов. В программном комплексе «Впрыск» разработки МГТУ [8] задача оптимизации процессов в ТПА формализована и сводится к задаче нелинейного программирования для функции многих переменных с ограничениями. Учет ограничений производится методом штрафных функций. Как отмечают авторы [1], теория нелинейного программирования не дает ответа на вопрос о том, какие поисковые методы лучше, поэтому зачастую необходимо пользоваться

несколькими процедурами. В отличие от указанных выше авторов, которые используют многофакторный анализ и уравнения регрессии, в работе [9] для алгоритма многопараметрической и многокритериальной оптимизации используются линеаризованные модели ТПА. На их базе при использовании аналитических или численно-аналитических методов изучалось влияние параметров ТПА на показатели ее рабочего процесса, а также производился выбор и обоснование промежуточных (рабочих) критериев (принцип линеаризации).

### Цель и постановка задачи

Цель данной работы – провести оптимизацию АТС. Для достижения данной цели необходимо предложить метод оптимизации, выбрать параметры, которые в наибольшей мере влияют на процесс топливоподачи АТС, определить функциональные ограничения и критерии качества. Именно это является задачей данной работы.

### Объект исследования – топливная аппаратура дизеля серии 4ДТНА

Для дизеля серии 4ДТНА авторами совместно со специалистами КП ХКБД разработана АТС с электронным управлением. АТС оснащена электрогидравлической форсункой (ЭГФ) с электромагнитным клапаном. Принцип и особенности работы данной АТС изложен в работе [1].

Метод организации топливоподачи в АТС позволяет сформулировать для ЭГФ самостоятельную оптимизационную задачу. После такого разделения модель (включает ЭГФ, гидроаккумулятор и соединяющий их топливопровод) может быть основой для эффективного алгоритма многопараметрической и многокритериальной оптимизации.

### Методика проведения эксперимента

В данной работе при решении оптимизационной задачи использован современный метод, пред-

ложенный И.М.Соболев и Р.Б. Статниковым в работе [10]. В основе данного метода лежит численное исследование (сканирование) пространства параметров проектируемого объекта, которое проводится в три этапа.

1-й этап - составление таблиц испытаний. Этот этап не предусматривает участия человека. Последовательно выбирается  $N$  пробных точек. В каждой из точек рассчитывается процесс топливоподачи и вычисляются значения всех критериев. По каждому критерию составляется таблица испытаний. Таблицы представляют собой аналог статистических вариационных рядов.

2-й этап - выбор критериальных ограничений. Этот этап выполняется в режиме диалога ЭВМ – человек (проектировщик). Просматривая каждую из таблиц, он должен назначить ограничение для каждого из критериев.

3-й этап - проверка непустоты множества допустимых точек. Этот этап выполняется автоматически.

*Выбор пробных точек.* До сих пор наиболее популярным остается метод, в котором для просмотра многомерного куба используется кубическая решетка. Однако, равномерное сканирование многомерного куба, как доказывается в [10], является оптимальным только в одномерном случае, при размерности пространства  $n=1$ . Уже при  $n=2$  кубическая решетка не очень хороша, а с увеличением  $n$  ее способность описывать изменение функции быстро ухудшается.

Подробная модель технического объекта содержит в своем описании большое число параметров. Априори, известно, что значительная часть этих параметров оказывает на изменение любого, фиксированного критерия, крайне слабое влияние, но «отсеять» эти параметры обычно не представляется возможным. В крайней ситуации, которая на самом деле встречается достаточно часто, сильно влияет

только один параметр, а остальные для данного критерия являются уточняющими. Поэтому оптимальным может считаться такое распределение  $N$  пробных точек, у которого каждая из координат (параметров) представляет собой равномерно распределенную последовательность  $N$  точек на отрезке; кубическая решетка этому требованию не удовлетворяет.

Так, на рис. 1 изображена кубическая решетка, состоящая из  $N = 16$  точек. Точки распределены равномерно. В каждом из  $N$  малых квадратиков расположена одна точка сетки. Недосток такого распределения очевиден. При исследовании функции  $f(x_1, x_2)$ , которая сильно зависит от одного аргумента, мы получим лишь четыре различных значения, каждое повторенное четыре раза. В многомерном случае кубическая решетка может оказаться еще хуже, так как «потеря информации» при вычислении  $f(x_1, \dots, x_n)$  только возрастает.

Частичное решение этой проблемы дает использование генераторов случайных чисел.

Но авторами работы [10] предложено такое оптимальное распределение точек в пространстве, которое решает эту проблему самым эффективным образом. Как и в предыдущем случае, в двумерном распределении, состоящем из  $N = 16$  точек, в каждом малом квадратике расположена одна точка (см. рис. 1). Однако в данном случае при расчете  $f$  в точках сетки мы получим 16 значений, дающих лучшее представление о диапазоне изменения функции  $f$ .

Оптимальная последовательность всегда содержит  $N = 2^p$  точек, где  $p$  – целое положительное число.

Дополнительным достоинством такой последовательности является возможность удвоения количества пробных точек.

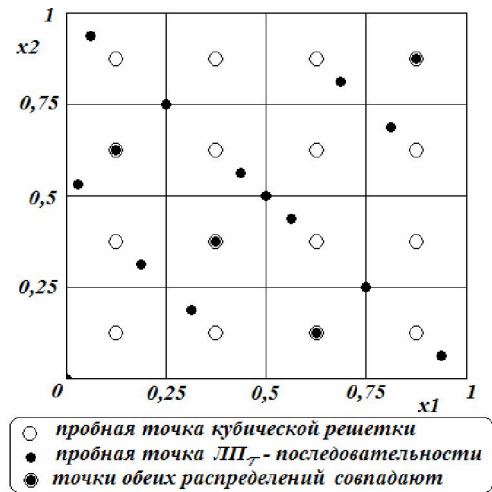


Рис. 1. Кубическая решетка и улучшенная сетка при  $n=2$  ( $N=16$ )

В работе [10] это распределение названо ЛПт-последовательностью. Для расчета ЛПт-последовательности авторами данной работы использовался следующий арифметический алгоритм. По таблице числителей [10] определяем  $r_j^{(l)}$ . Для этого по заданному номеру точки  $i$  вычисляем  $m = 1 + \lfloor \ln i / \ln 2 \rfloor$ , затем в каждой точке  $i$  для каждого параметра  $j = 1, 2, \dots, n$  определяем безразмерную величину параметра

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m [2^{\{i2^{-l}\}}] \cdot [2^{\{r_j^{(l)} 2^{k-1-l}\}}] \right\}.$$

В данных формулах  $[z]$  – целая часть числа  $z$ , а  $\{z\}$  – дробная часть числа  $z$ .

Вычислить текущее значение  $\alpha_j$ -го параметра в  $i$ -той точке  $n$ -мерного пространства можно по формуле

$$\alpha_{i,j} = q_{i,j} \cdot (\alpha_{j \max} - \alpha_{j \min}) + \alpha_{j \min},$$

преобразующей  $n$ -мерный куб с ребром, равным 1, в  $n$ -мерный параллелепипед изменения параметров.

Составленная в MathCAD по этому алгоритму подпрограмма интегрирована в программу расчета АТС.

### Выбор параметров электрогидравлической форсунки

Обоснуем выбор параметров и пределы их варьирования. Из работ [1 – 3] известно, что на процесс топливоподачи в системах с электронным управлением впрыскивания большое влияние оказывают следующие факторы:

- перемещение элементов ЭГФ;
- распространение волн давления и деформации по топливоподводящим каналам и элементам ЭГФ;
- колебание витков пружин;
- физические явления, сопровождающие течение топлива по каналам малого диаметра (сопловые отверстия распылителя, жиклеры камеры управления);
- особенности течения топлива в полостях низкого давления ЭГФ и связанные с этим эффекты присоединенных масс, соударения и др.

Используя данные факторы можно добиться улучшения эффективности применения аккумулирующей топливной системы для высокооборотного дизеля. Проведенные авторами предварительные расчетные и экспериментальные исследования позволили выделить основные конструктивные и регулировочные параметры таких систем. В табл. 1 приведены эти параметры, а также заданы их величины для исходной модели, которые далее были помещены в центр  $n$ -мерного параллелепипеда.

Выбор допустимых пределов варьирования каждого из параметров проведен с учетом ограничений, связанных с компоновкой, изготовлением, условиями эксплуатации топливной системы.

Так, например, величина хода клапана не может быть меньше 0,025 мм (обеспечивает минимально гарантированный зазор между магнитопроводом и якорем) с одной стороны, и больше 0,075 мм с другой (связано с уменьшением магнитодвижущей силы при увеличении воздушного зазора). Минимальный

ход иглы и мультипликатора составляет 0,125 мм. Данное ограничение связано с необходимостью минимизировать влияние эффективного проходного сечения распылителя на изменение давления топлива, а также с особенностями работы мультипликатора [11].

В пределах исследуемой области изменение каждого параметра табл. 1 составило  $\pm (40 \div 50) \%$ . Это позволяет исследовать обширную область многомерного пространства и определить направление поиска оптимума. С помощью генератора ЛП<sub>т</sub>-последовательности были получены пробные точки и составлены таблицы испытаний. Для предварительного сканирования пространства параметров выбрано 128 точек.

Таблица 1. Параметры исходной модели

№	параметр	размернос	величина
1	Диаметр сферы клапана	мм	1,3
2	Ход клапана	мм	0,05
3	Коэффициент жесткости пружины клапана	Н/мм	50
4	Угол седла клапана	град.	100
5	Площадь эффективного сечения подающего жиклера камеры управления	мм <sup>2</sup>	0,034
6	Площадь эффективного сечения отсечного жиклера камеры управления	мм <sup>2</sup>	0,055
7	Диаметр мультипликатора	мм	3,8
8	Длина мультипликатора	мм	76
9	Диаметр запорного пояса иглы	мм	1,6
10	Ход иглы	мм	0,25
11	Давление начала подъема иглы	МПа	5
12	Длина трубопровода от аккумулятора до ЭГФ	мм	220
13	Внутренний диаметр топливопровода	мм	1,5

### Определение функциональных ограничений

В дополнение к определению параметрических ограничений при формировании исходных данных для решения задачи поиска оптимальных параметров ЭГФ необходимо включить функциональные ограничения.

Для ЭГФ функциональными ограничениями являются отношения следующих параметров:

- диаметр мультипликатора превышает диаметр иглы распылителя, который принят постоянным и равным 3,5 мм;
- эффективное проходное сечение подающего жиклера камеры управления меньше эффективного проходного сечения отсечного жиклера камеры управления;
- диаметр запорного пояса иглы меньше диаметра иглы;
- внутренний диаметр топливопровода изменяется дискретно (величина определяется стандартным рядом значений [ГОСТ11017-80] 1,1 мм; 1,5 мм; 2,0 мм);
- недопущение подвпрыскиваний топлива;
- ограничение скорости элементов форсунки при их ударе об упоры-ограничители хода.

При решении оптимизационной задачи функциональные ограничения можно использовать двумя способами. Первый способ – после проведения численного эксперимента исключить из рассмотрения точки, в которых приведенные отношения параметров не выполняются. Второй способ – на стадии формирования исходных данных учесть указанные ограничения путем задания коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , определяющих отношения указанных выше параметров. Очевидно, что второй способ предпочтительнее. Так как позволяет получить больше точек для критериальной оценки, а также уменьшить время решения оптимизационной задачи за счет исключения процедуры анализа исходных данных на предмет выполнения функциональных ограничений.

### Выбор критериев качества

По общему мнению (см. напр. [1]), для ЭГФ целесообразно задать два решающих критерия качества – максимальное давление впрыскивания  $P_a$  и цикловой расход топлива на управление  $Q_z$ . Очевидно, что давление  $P_a$  должно быть максимальным. Обоснуем выбор критерия  $Q_z$ . В АТС топливо в камере управления ЭГФ находится под высоким давлением (25 ÷ 150 МПа). Процесс топливоподачи происходит в период сброса топлива из полости управления в топливный бак. Следовательно, чем меньше объем топлива сбрасывается, тем меньше затраты энергии на привод топливного насоса. Но, с другой стороны, существует минимально возможная величина  $Q_z$ , обеспечивающая охлаждение электромагнита.

Для получения множества паретовских точек, представляющих одномерное многообразие на плоскости, удобно, чтобы оба критерия стремились к минимуму, причем имели безразмерную форму.

Введем безразмерные критерии:

- $K_p = P_{ак}/P_a$ , где  $P_{ак}$  – давление топлива в гидроаккумуляторе;
- $K_q = Q_z/Q_c$ , где  $Q_c$  – цикловая подача топлива.

Ввод безразмерных критериев позволяет оценить относительную долю топлива, ушедшего на управление, а величину  $P_a$  сравнить с уровнем давления  $P_{ак}$ .

В задачах с двумя критериями  $\Phi_1 \rightarrow \min$ ,  $\Phi_2 \rightarrow \min$  решение ищется на так называемом «паретовском» множестве наборов параметров; каждый такой набор является решением однокритериальной задачи  $\Phi_1 \rightarrow \min$  при  $\Phi_2 = \text{const}$ . Каждому набору параметров, допустимому по функциональным ограничениям (их называют эффективными), соответствует некоторая точка на плоскости критериев ( $K_p$ ,  $K_q$ ) (рис. 2).

Паретовским точкам в плоскости критериев (рис. 2) будет соответствовать отрезок компромисс-

ной кривой, являющейся огибающей для всех представленных там точек.

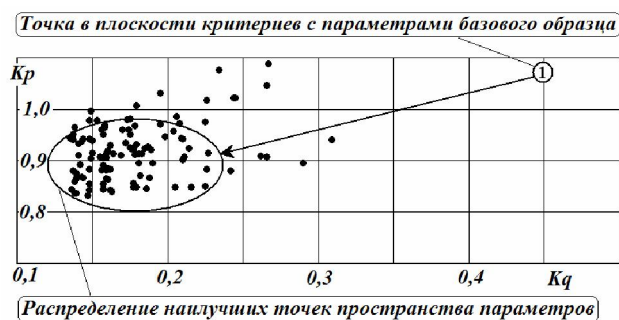


Рис. 2. Фрагмент распределения пробных точек в плоскости критериев ( $K_p$ ;  $K_q$ )

### Результаты оптимизации

Покажем, каким образом производится поиск оптимального сочетания параметров ЭГФ. В результате сканирования из множества 128-ми допустимых точек 24-ре оказались эффективными. На рис. 2 показано положение данных точек на плоскости критериев ( $K_p$ ,  $K_q$ ).

Заметим, что в каждой из этих точек эффективность процесса впрыскивания по указанным критериям ( $K_p = 0,912 - 0,941$ ;  $K_q = 0,178 - 0,137$ ) значительно повышается по сравнению с точкой 1 ( $K_p = 1,08$ ;  $K_q = 0,447$ ), соответствующей исходному набору параметров ЭГФ (табл. 1).

На компромиссную кривую попало три точки, которые находятся на огибающей кривой А (рис. 3) в области, очерченной прямыми D и E. Номера этих точек – 61, 121, 106, а часть кривой, соединяющей данные точки, является приближенной компромиссной. Точки № 48 и № 127 тоже находятся на кривой А, однако правее точки № 106 кривая А не является компромиссной. Действительно, на части кривой А, выделенной пунктиром, находятся точки, для которых оба критерия изменяются либо в большую, либо в меньшую сторону. Поэтому, например, если минимальная величина критерия  $K_q = 0,2$ , то в качестве

наилучшей следует выбирать точку пересечения кривой А с указанным значением  $K_q$ .

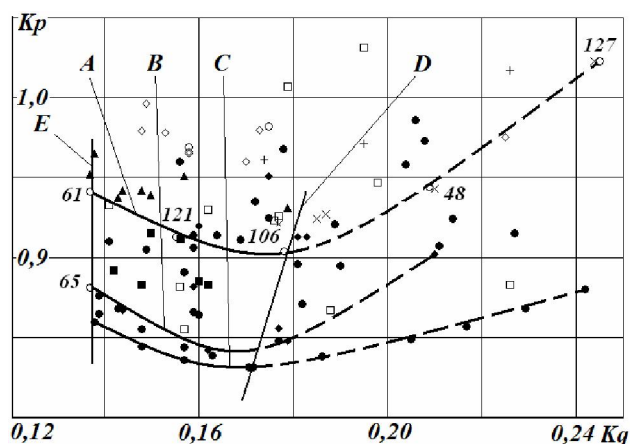


Рис. 3. Пробные точки и приближенные компромиссные кривые в плоскости критериев ( $K_p$ ;  $K_q$ )

В точке № 61 семь параметров находятся близко к центру сканируемого пространства, два параметра принимают максимально допустимые значения и два – минимальные. В точке № 106 девять из двенадцати параметров находятся в центре, два принимают минимальные значения и одно – максимальное. В точке № 121 количество средних значений – восемь, два принимают минимальные и два – максимальные значения.

В полученном множестве существует изолированная точка № 65 (рис. 3). По критериям качества данная точка наилучшая. Однако пять параметров точки № 65 принимают минимально допустимые значения. Так, давление затяжки пружины иглы равно 1,57 МПа, а диаметр сферы клапана – 0,864 мм.

Заметим, что анализ одного варианта (пробной точки) включает совместный электрогидродинамический расчет топливной системы с электронным управлением впрыскивания и занимает около 2 мин на современном компьютере с быстродействием 3,6 МГц. Поэтому число пробных точек  $N = 128$  пока следует считать предельным. Однако, исходя из рекомендаций работы [10], а также учитывая собствен-

ный опыт решения этой многокритериальной задачи, данное число следовало бы увеличить по крайней мере в 2 – 4 раза, что позволит заметно повысить эффективность оптимизации. Частичное решение проблемы дает алгоритм последовательной оптимизации, применение которого к данной задаче сводится к следующему.

Для уточнения компромиссной кривой целесообразно дополнительно просканировать пространство параметров в окрестностях паретовских точек №№ 61, 106 и 121. В центр нового параллелепипеда поставлена указанная паретовская точка, параметры которой могут изменяться в узком диапазоне  $\pm 15\%$ . В таком случае объем сканируемой области уменьшается в  $10^6$  раз, поэтому количество пробных точек, определяемое с помощью генератора ЛПГ-последовательности, может быть сокращено до 16-ти.

В результате такого уточнения было получено новое множество допустимых точек, находящихся ниже кривой А (рис. 3) и построена компромиссная кривая В. Интересно, что точка № 65, полученная при предварительном сканировании, находится на кривой В и ограничивает ее слева.

Целесообразно повторить процедуру уточнения компромиссной кривой еще раз. При этом сканировались окрестности точек, находящихся на кривой В, ограниченной прямыми Д и Е. Результатом уточнения является новая кривая С. Расстояние между кривыми В и С незначительное, поэтому авторами принято решение дальнейшего уточнения компромиссной кривой не производить.

Полученные результаты позволяют утверждать, что на кривой С находятся точки с оптимальными параметрами ЭГФ.

Заключительным пунктом решения оптимизационной задачи является определение области работы топливной системы с оптимизированной ЭГФ при изменении давления  $P_{ак}$ . Для этого в программу рас-

чета были введены значения параметров, полученные для паретовских точек кривой С и, задавая величину  $P_{ак}$ , построены расчетные зависимости  $P_a$ ,  $Q_c$ ,  $Q_z$  от  $P_{ак}$ . Максимально возможное  $P_{ак}$  определялось наличием несанкционированного расхода топлива  $Q_{подвпр}$  через распылитель в завершающей фазе впрыскивания. По полученным результатам определено, что оптимизированная ЭГФ обеспечивает впрыскивание топлива при минимальном давлении  $P_{ак} = 20$  МПа и максимальном  $P_{ак} = 150$  МПа (рис. 4).

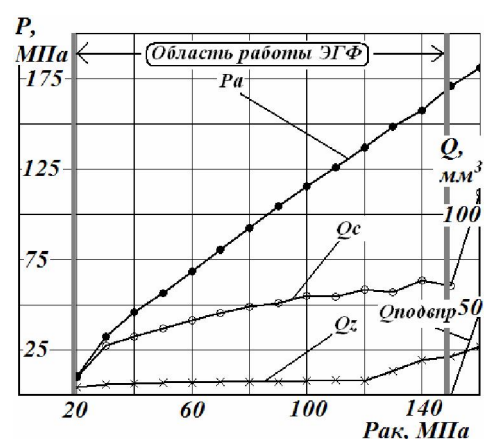


Рис. 4 Зависимость параметров впрыскивания от давления  $P_{ак}$  для АТС с оптимизированной ЭГФ

Для всех расчетных точек в процессе оптимизации задавалось однофазное впрыскивание со следующими параметрами электрического импульса (максимальная сила тока в катушке 17,5 А, сила тока в период удержания 10 А, продолжительность электрического сигнала 1 мс).

### Выводы

Разработан новый метод многокритериальной оптимизации топливной аппаратуры с электронным управлением впрыскивания, основанный на компьютерном сканировании области изменения параметров и построении паретовских множеств и компромиссных кривых.

Определены основные параметры аккумулирующей топливной системы, которые оказывают

наибольшее влияние на процесс топливоподачи (см. табл. 1).

Сформулированы функциональные ограничения и критерии качества – максимальное давление впрыскивания  $P_a$  и расход топлива на управление  $Q_z$ , которые позволяют оценить эффективность процесса топливоподачи.

Проведенная оптимизация ЭГФ позволила увеличить давление впрыскивания  $P_a$  по сравнению с уровнем давления в гидроаккумуляторе  $P_{ак}$  на 15 % (в исходной АТС  $P_{ак}$  превышает  $P_a$ ) и снизить расход топлива на управление в 2 раза.

Определена область эффективной работы АТС в зависимости от давления  $P_{ак}$ . АТС обеспечивает впрыскивание топлива при изменении давления  $P_{ак}$  от 20 до 150 МПа.

#### Список литературы:

1. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. – М.: Легион - Автодата, 2004. – 344 с. 2. Врублевский А.Н., Григорьев А.Л., Грицюк А.В., Денисов А.В., Щербатов Г.А. Особенности математического моделирования гидромеханических процессов ЭГФ // ДВС, №1, 2007, с. 44 – 52. 3. Врублевский А.Н. Математическая модель движения элементов и течения топлива в полостях низкого

давления электрогидравлической форсунки // Автомобильный транспорт – Харьков: ХНАДУ. – 2008. Вып. 22. – с. 109 – 117. 4. Врублевский А.Н., Григорьев А.Л., Бовда А.М. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС // Автомобильный транспорт № 19. 2006 - с. 138 - 143. 5. Голубков Л.Н., Рябикин Л.М., Кратко А.П. Методика оптимизации параметров топливного насоса автомобильного дизеля // Рабочие процессы автотракторных двигателей и их агрегатов: Тр. МАДИ. – М., 1983. – с. 42 – 51. 6. Морозов Ю.В. Реализация заданных характеристик впрыскивания топлива путем оптимизации конструктивно-регулируемых параметров топливной аппаратуры: Автореферат дисс... докт. техн. наук. - Харьков., ХарГАЖТ. 1998. 32 с. 7. Дизельная топливная аппаратура: Оптимизация процесса впрыска, долговечность деталей и пар трения / В.Е. Горбаневский, В.Г. Кислов, Р.М. Баширов и др. – М.; изд-во МГТУ, 1996. – 138 с. 8. Кулешов А.С., Грехов Л.В. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. – М.: изд-во МГТУ, 2000. – 64 с. 9. Григор'єв О.Л., Розробка універсальних методів гідродинамічного розрахунку, динамічного аналізу та оптимізаційного синтезу основних елементів паливної апаратури дизелів. Автореферат дис... докт. техн. наук. - Харків., НТУ «ХПИ». 2004. 36 с. 10. Соболев И.М. Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука. 1985. – 110 с. 11. Врублевский А.Н., Абрамчук Ф.И., Зенкин Е.Ю. Принципы организации впрыскивания топлива при помощи электрогидравлической форсунки // Автомобильный транспорт, № 21, 2007, с. 119 – 124.

УДК 621.436

А.А. Лисовал, канд. техн. наук

## ПОДГОТОВКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА К РАСЧЕТНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

### Введение

Главной задачей расчетных исследований систем автоматического регулирования (САР) двигателей внутреннего сгорания является анализ их устойчивости и показателей переходных процессов. Для этого применяют так называемые динамические математические модели, в которых учитывается инерционность САР [1].

В последнее время широко применяется метод составления динамических математических моделей систем автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) дизелей на основе использования экспериментальных статических характеристик её звеньев. Основные положения этого метода опубликованы в работах В.И. Крутова, и названо квазистатическим подходом для составления математиче-