

МАТЕМАТИКА

УДК 62.522–62.387

© В. И. Ивлев, С. Ю. Мисюрин

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОМОТОРА НА ОСНОВЕ ЕГО ДЕТАЛИЗИРОВАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Представлена детализированная математическая модель радиально-поршневого пневмомотора для анализа динамических процессов и построения механических характеристик. Показан процесс выбора параметров с помощью программы многокритериальной оптимизации MOVI.

Ключевые слова: пневмомотор, динамические и механические характеристики, многокритериальная оптимизация.

Введение

Пневмомоторы (ПМ) находят широкое применение в различных машинах горнодобывающей промышленности, подъемно-транспортном оборудовании взрывоопасных производств, механизированном инструменте, т. е. там, где необходимы повышенные требования по безопасности эксплуатации, а также простота и надежность конструкции. До начала 90-х годов у нас в стране рядом КБ и НИИ проводились разработки новых конструкций ПМ, совершенствовались методы их расчета, серийно выпускалась широкая гамма ПМ, которые по ряду показателей не уступали зарубежным аналогам. В последние годы, по известным причинам, работы в этом направлении практически не ведутся, а многие организации, где занимались указанными вопросами, уже не существуют. Тем не менее, потребность в надежных и экономичных ПМ остается востребованной.

Анализ последних разработок ведущих фирм-производителей ПМ показывает, что прогресс здесь связан со следующими направлениями:

- использование новых конструкционных материалов, в первую очередь — полимерных композитов, а также антифрикционных износостойких покрытий, что снижает инерционные нагрузки и потери на трение (повышение механического КПД);
- повышение точности и качества изготовления основных деталей ПМ, что позволяет снизить утечки сжатого воздуха и перетечки между рабочими камерами (повышение пневматического КПД);
- развитие детализированных методов расчета рабочих процессов и оптимизации параметров ПМ. Это связано со значительно возросшими возможностями вычислительной техники.

§ 1. Математическая модель привода

На рис. 1а представлена конструктивная схема шестицилиндрового эксцентрикового ПМ. Выбор такой схемы обусловлен тем, что ПМ планируется использовать в автономных устройствах (питание от баллона высокого давления), где необходимо, в первую очередь, обеспечить экономичность. В такой схеме удастся свести к минимуму вредные объемы, получить относительно малые механические потери при удовлетворительных габаритных показателях. На рис. 1б приведена расчетная схема распределительного устройства (вращающегося золотника), где: V_n и V_b — объемы полостей нагнетания и выхлопа соответственно, f_y — эффективная площадь зазора в золотнике, через которую происходят основные утечки. Открытие и закрытие

впускных каналов в рабочие цилиндры определяется угловым положением i -го цилиндра φ_i и углами: γ_1 — начало впуска, γ_2 — конец впуска, γ_3 — начало выхлопа, γ_4 — конец выхлопа, δ — угловой размер входного канала.

Уравнения, описывающие изменение давления p_i и температуры T_i сжатого воздуха в рабочих цилиндрах, имеют вид [1]:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{kR}{V_i} \left[T_m G_i^+ - T_i G_i^- - \frac{k-1}{kR^2 T_i} p_i \alpha F(x) (T_i - T_c) \right] - \frac{p_i}{V_i} \frac{dV_i}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{T_i}{V_i} \frac{dV_i}{dt} + \frac{T_i}{p_i} \frac{dp_i}{dt} - \frac{RT_i^2}{p_i V_i} (G_i^+ - G_i^-), \quad (2)$$

$$V_i = V_0 + F_p e (1 - \cos \varphi_i),$$

где: k — показатель адиабаты, R — газовая постоянная, V_0 — вредный объем, F_p — площадь поршня, $F(x)$ — поверхность теплообмена в рабочем цилиндре, зависящая от координаты поршня, T_c — температура корпуса мотора, G_i^+ и G_i^- — расходы сжатого воздуха на фазе наполнения и фазе выхлопа соответственно, определяемые по формуле Сен-Венана. В данной модели коэффициент теплопередачи от сжатого воздуха к стенкам цилиндра принят пропорциональным плотности сжатого воздуха [2], где α — коэффициент пропорциональности.

Аналогично записываются уравнения для определения давления p_n и температуры T_n в полости нагнетания и в полости выхлопа p_v , T_v :

$$\frac{dp_n}{dt} = \frac{kR}{V_n} \left[T_m G_m - \sum_{i=1}^z T_n G_i^+ - T_n G_y - \frac{k-1}{kRT_n^2} \alpha p_n (T_n - T_c) \right], \quad (3)$$

$$\frac{dT_n}{dt} = \frac{T_n}{p_n} \frac{dp_n}{dt} - \frac{RT_n^2}{p_n V_n} \left(G_m - \sum_{i=1}^z G_i^+ - G_y \right), \quad (4)$$

$$\frac{dp_v}{dt} = \frac{kR}{V_v} \left[T_n G_y + \sum_{i=1}^z G_i^- T_i - T_v G_a - \frac{k-1}{kRT_v^2} (T_v - T_c) \right], \quad (5)$$

$$\frac{dT_v}{dt} = \frac{T_v}{p_v} \frac{dp_v}{dt} - \frac{RT_v^2}{p_v V_v} \left(G_y + \sum_{i=1}^z G_i^- - G_a \right), \quad (6)$$

где: G_m — расход из питающей магистрали, G_a — расход отработанного сжатого воздуха в атмосферу, G_y — расход, определяющий утечки в распределительном устройстве, z — число цилиндров.

Уравнение движения блока цилиндров:

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \sum_{i=1}^z p_i F_p e \sin \varphi_i \left(1 - \frac{e}{R_c} \cos \varphi_i \right) - c \frac{d\varphi}{dt} - M_t \operatorname{sign} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) - M_c, \quad (7)$$

где: I — момент инерции блока цилиндров, c — коэффициент вязкого трения, M_t — момент сухого трения, M_c — момент полезной нагрузки. Момент сухого трения определялся через работу известных сил трения в цилиндрах, совершаемую за один оборот ротора.

Система дифференциальных уравнений 18-го порядка (1–7), алгебраические выражения для расхода сжатого воздуха и логические выражения, определяющие переключение выпускных клапанов представляют собой математическую модель радиально-поршневого пневмомотора.

§ 2. Некоторые результаты расчетов

Расчеты проводились для ПМ со следующими параметрами: диаметр цилиндра — 63 мм; эксцентриситет — 15 мм; радиус статора — 240 мм; число цилиндров — 6; сечение питающей магистрали — 12 мм; диаметр входного отверстия в цилиндр — 8 мм; момент сухого трения 0,9 Нм;

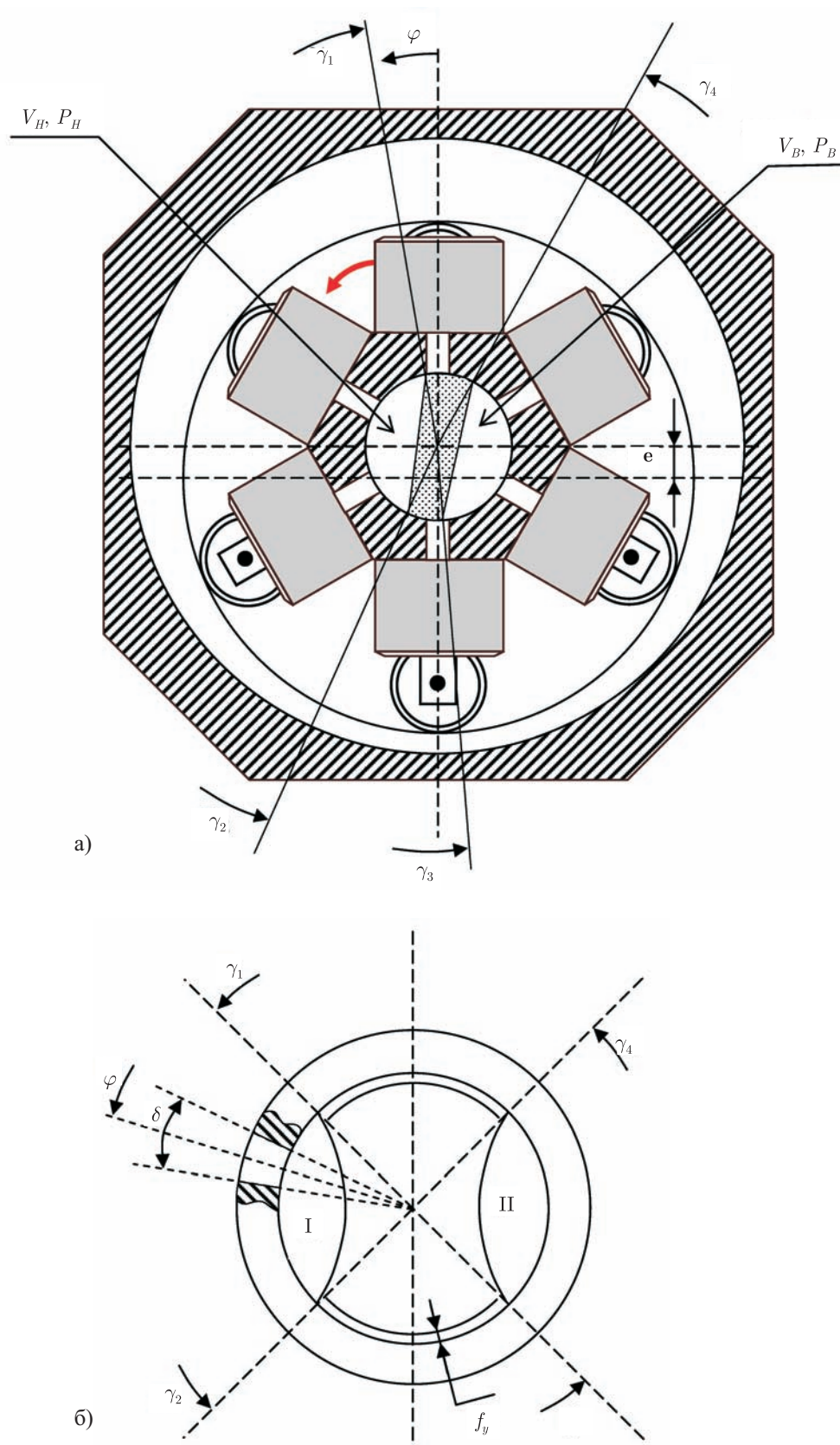


Рис. 1. а) Расчетная схема радиально-поршневого пневмомотора.
 б) Расчетная схема системы воздухораспределения

коэффициент вязкого трения $0,0085 \text{ Нмс}$; момент инерции ротора — $0,0062 \text{ кгм}^2$; углы $\gamma_1 - \gamma_4$ 5, 120, 180, 340 градусов соответственно; угловой размер входного отверстия в цилиндр — 20° ; величина вредного объема — $3,8 \times 10^{-6} \text{ м}^3$, эффективная площадь сечения утечек в распределительном устройстве — $0,4 \text{ мм}^2$.

На рис. 2а представлен процесс запуска ПМ при давлении питания $0,4 \text{ МПа}$ (абсолютное) и нулевой полезной нагрузке, т.е. режим холостого хода. Вертикальные кривые соответствуют углу поворота ротора на 180° . Хорошо видны пульсации движущего момента и расхода — 3 колебания на угле 180° , что соответствует прохождению трех цилиндров. Выходу на установившийся режим соответствует равенство нулю среднего значения правой части уравнения (7).

На рис. 2б представлен график изменения давления сжатого воздуха в рабочей полости цилиндра для режима холостого хода ($\omega = 538 \text{ с}^{-1}$). Трапециевидные линии соответствуют степени открытия впускного (пунктирная линия) и выхлопного (сплошная линия) каналов. Видно достаточно быстрое наполнение полости, что объясняется малой величиной вредного объема. В дальнейшем из-за быстрого роста объема полости цилиндра давление падает, что свидетельствует о недостаточном темпе поступления сжатого воздуха. В конце фазы выхлопа происходит даже некоторый рост давления (эффект компрессии), т.к. из-за быстрого уменьшения объема полости сжатый воздух не успевает уходить в полость выхлопа. Такая картина характерна для поршневых моторов, при работе в режиме холостого хода. При работе ПМ в области номинальных режимов (с нагрузкой) угловая скорость значительно меньше, и кривая изменения давления приближается к линиям, характеризующим открытие каналов наполнения и выхлопа (рис. 2в; $M_C = 20 \text{ Нм}$, $\omega = 132 \text{ с}^{-1}$).

На рисунке 3а представлены механические характеристики ПМ — величина развиваемого момента, мощность на выходном валу, расходы сжатого воздуха (приведенного к нормальным условиям) и удельного расхода (на 1 кВт развиваемой мощности) в зависимости от угловой скорости. Приведенные характеристики качественно практически не отличаются от аналогичных характеристик других поршневых ПМ. На рис. 3б даны безразмерные характеристики, построенные на основании экспериментальных данных, полученных для ПМ моделей П 6.3-12, П16-25, П9-12 и др. (данные НИПИГормаш). Соответствующие выделенные значки отмечают значения, рассчитанные по представленной модели.

Основные отличия рассматриваемого ПМ заключаются в его большей быстроходности и экономичности. Это обусловлено следующими факторами:

- в модель заложены величины сил трения в уплотнениях поршней и золотниковой паре, которые сегодня реально получить при использовании новых конструкционных материалов, что позволяет существенно снизить уровень механических потерь;
- величина вредного объема в рассматриваемой конструкции ПМ в $7 \div 8$ раз меньше, чем для указанных выше моделей, что снижает удельный расход сжатого воздуха и повышает быстроходность;
- существенно снижен уровень утечек сжатого воздуха в золотниковой паре за счет возможности более точного ее изготовления из материалов, обеспечивающих меньшие величины трения и износа, чем в указанных выше. На рис. 3б видно, что уровень утечек для большинства моделей ПМ может достигать 20% от номинального расхода. Современный уровень технологии позволяет значительно снизить эту величину.

Использование в данной модели значений сил трения и величин зазоров, обеспечивающих утечки, полученных экспериментально для серийно выпускаемых ПМ, позволяет получить достаточно точное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

§ 3. Оптимизация параметров пневмомотора

Пневмомоторы представляют собой достаточно сложное тепло-механическое устройство (соответствующая математическая модель представляет собой систему нелинейных диффе-

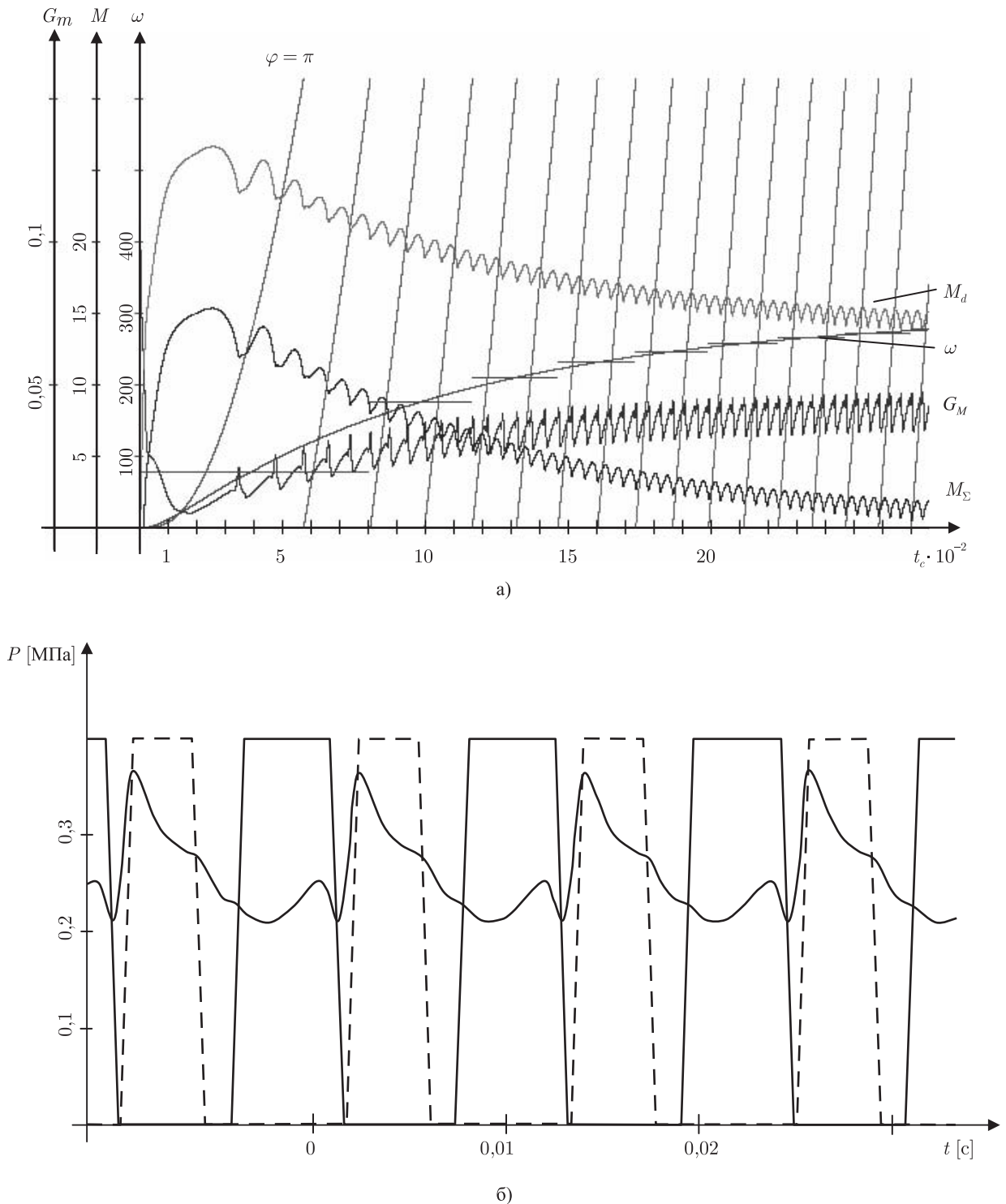


Рис. 2. а) Переходный процесс при запуске пневмомотора.
 б) Зависимость изменения давления в рабочей полости при переключении каналов воздухораспределения

ренциальных уравнений 18-го порядка, содержащую большое количество конструктивных параметров).

Осуществить выбор параметров пневмомотора, обеспечивающих наилучшие показатели нескольких критериев качества, с помощью классических методов в данном случае представляется практически неразрешимой задачей. Для такого класса задач более перспективны методы, позволяющие зондировать множество параметров точками последовательности, равномерно распределенной в замкнутой области n -мерного пространства, ограниченной заданным диапазоном изменения группы из n параметров. Использование таких последовательностей

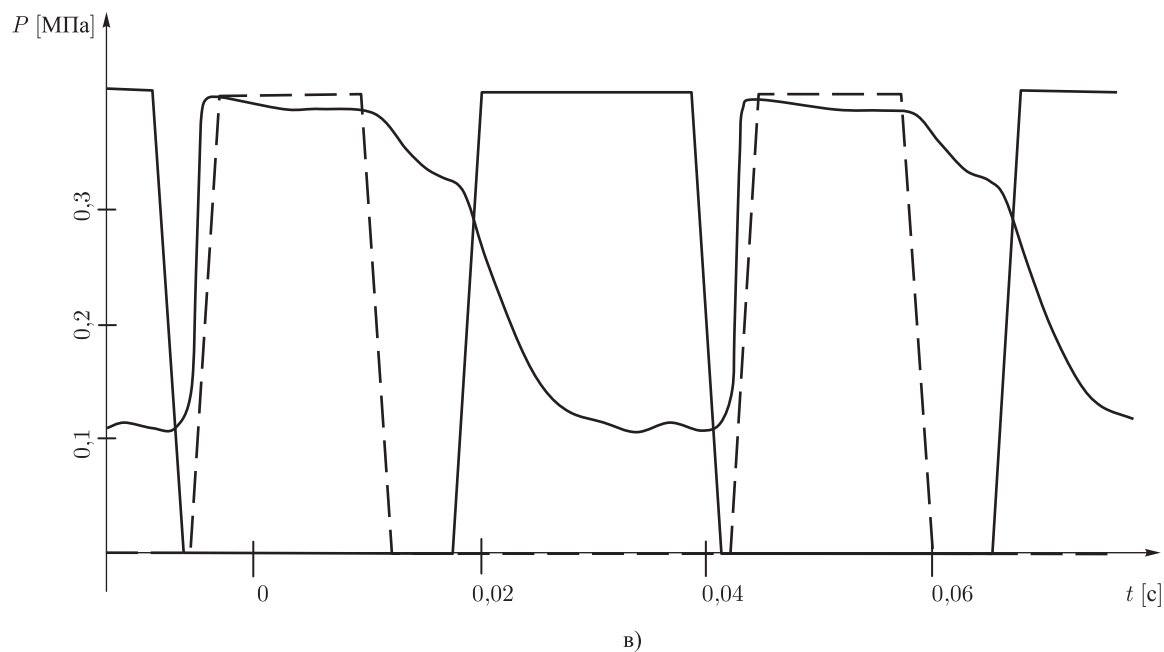


Рис. 2. в) Зависимость изменения давления в рабочей полости при переключении каналов воздухораспределения

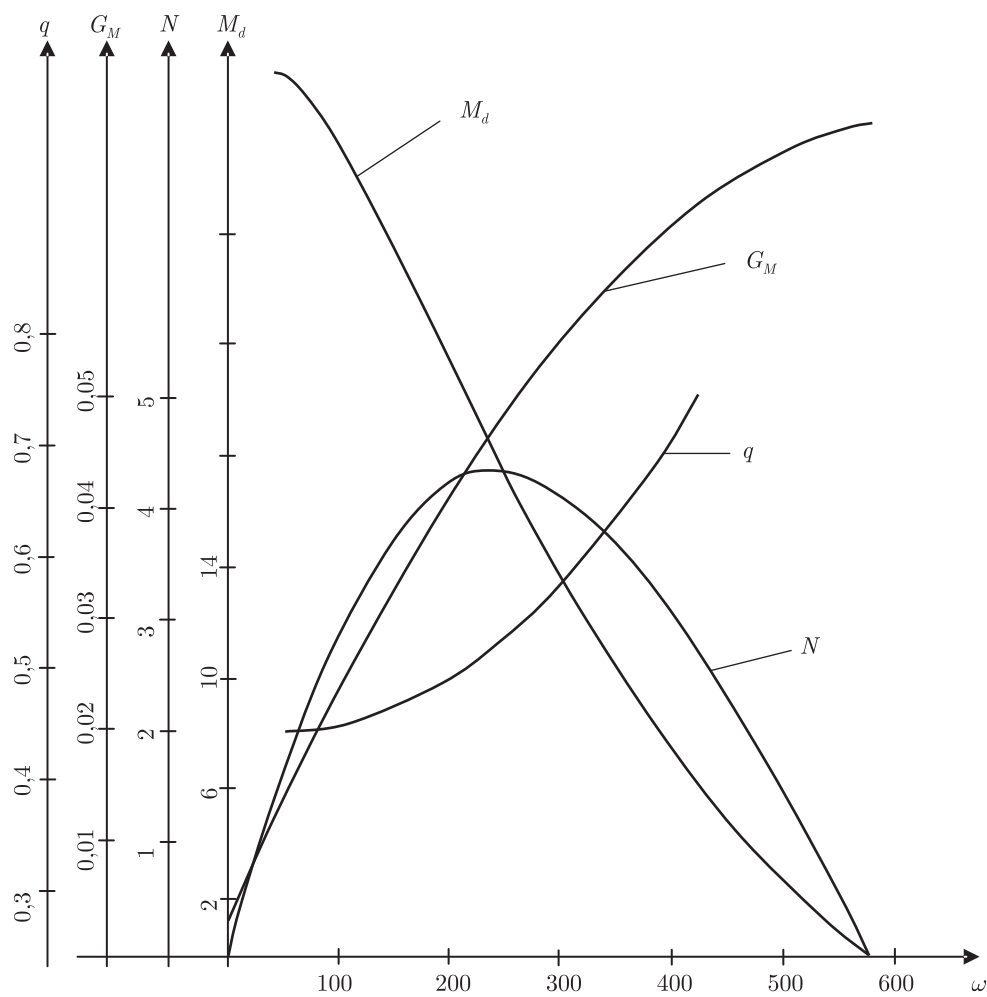


Рис. 3. а) Расчетные механические характеристики пневмомотора: ω [c^{-1}], q [$\text{м}^3/\text{кВт} \cdot \text{мин}$], G_M [кг/с], N [кВт], M_d [Нм]

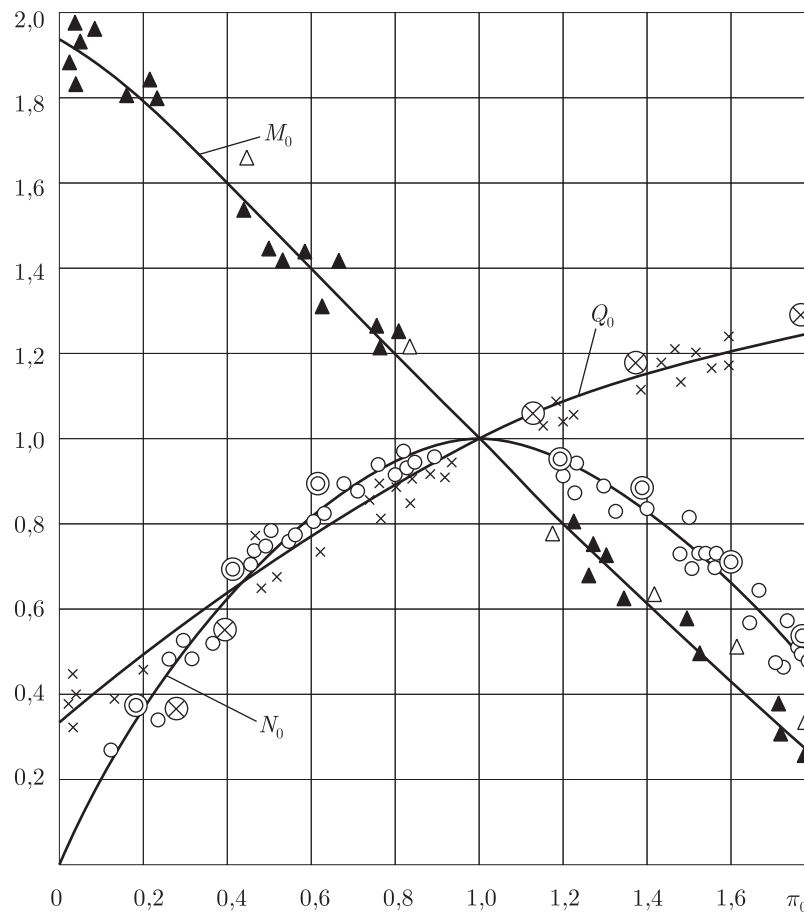


Рис. 3. б) Безразмерные экспериментальные механические характеристики пневмомоторов с результатами проведенных расчетов

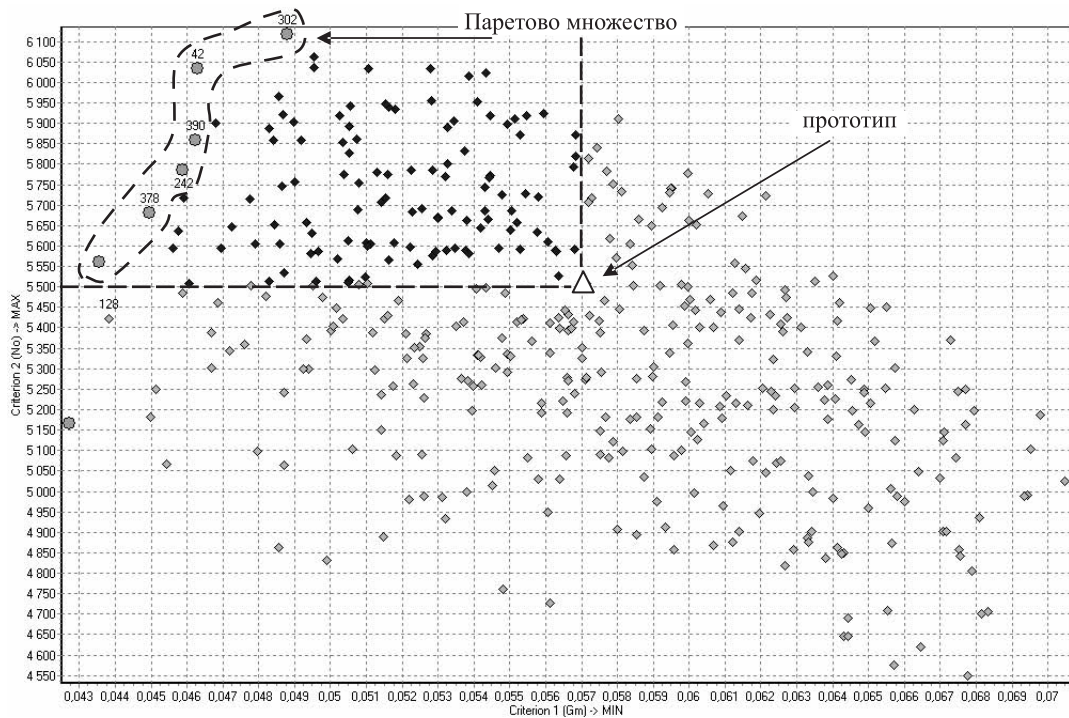


Рис. 4. График распределения решений по критериям качества

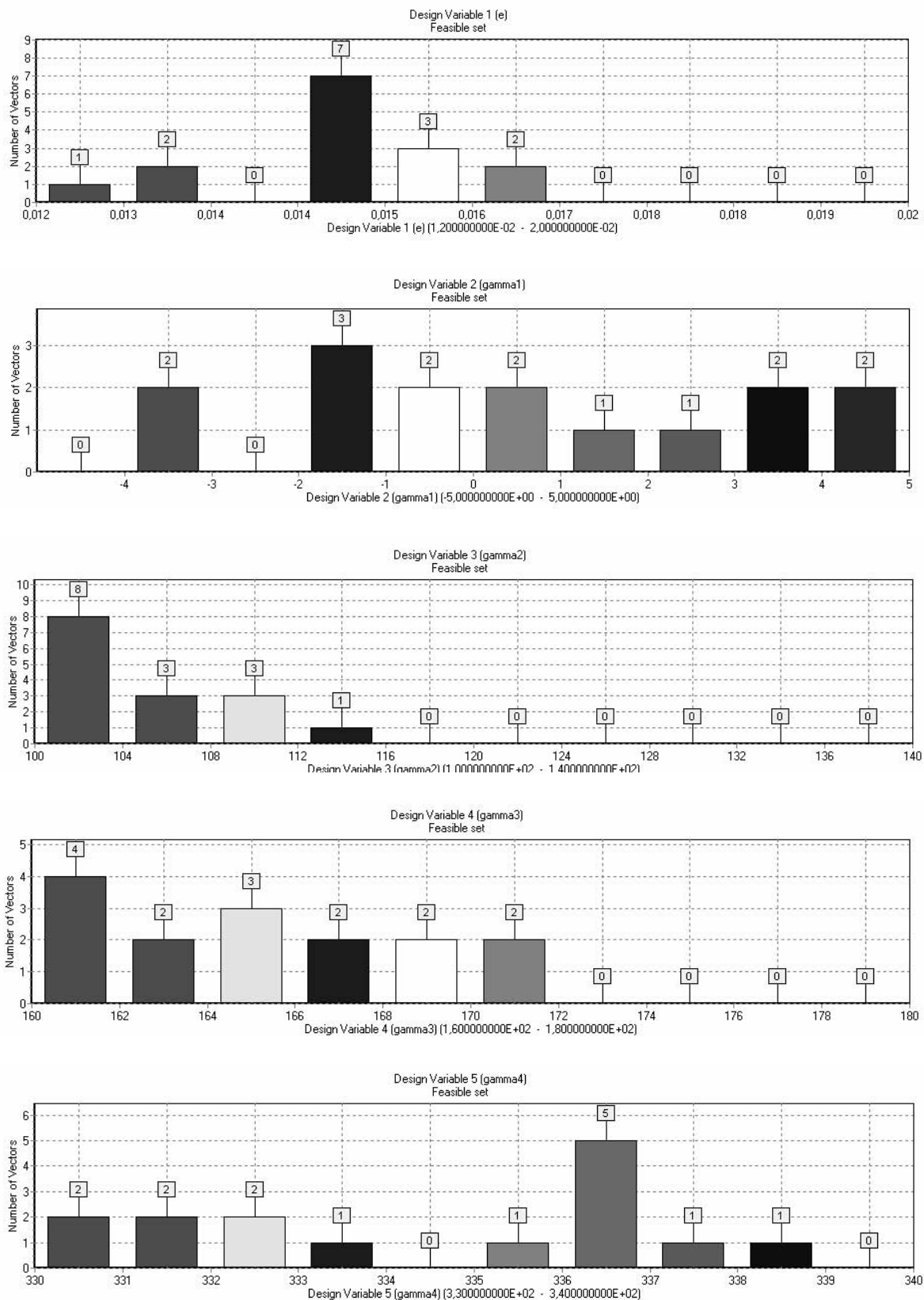


Рис. 5. Частота распределения решений внутри диапазона изменения варьируемых параметров

при достаточной равномерности и достаточном количестве точек дает возможность исследовать пространство параметров. Вычисление выбранных критериев качества в этих точках позволяет иметь достаточно полную информацию об исследуемой системе. Обоснование такого подхода дано в [3]; также разработан программный пакет MOVI, позволяющий в диалоговом режиме проводить оптимизацию достаточно сложных систем с большим количеством параметров и критериев качества. Оптимизация проводится численным методом с выделением Парето — оптимальных вариантов, т. е. таких, которые нельзя улучшить одновременно по всем критериям.

Для пневмомотора оптимизируемыми критериями являются: развиваемая мощность, расход сжатого воздуха на единицу развиваемой мощности, мощность на единицу веса и объема мотора, рассматриваются также соответствующие стоимостные показатели. Ниже в качестве наглядного примера приводятся результаты оптимизации по двум критериям — развиваемой мощности и расходу сжатого воздуха. Варьируемыми параметрами являются эксцентриситет и 4 угла газораспределения. Диапазон изменения параметров указан на рис. 5. Расчеты проводились для давления питания сжатого воздуха $p_m = 0,6$ МПа. Было проведено 500 испытаний по оптимизации системы. График распределения результатов по принятым критериям представлен на рис. 4. Здесь треугольником обозначено место прототипа; прямые пунктирные линии отсекают те решения, которые были улучшены. Отдельно выделена область (пунктирная волнистая линия) — паретово множество решений. Видно, что оптимальное решение соответствует точке 42 (номер эксперимента). Было выбрано 60 решений, близких к оптимальному по обоим критериям. В пересечении они дали 15 наилучших решений. На рис. 5 приведена частота распределения этих решений на отрезках варьировемых переменных: $e, \gamma_i; i = 1-4$. Видно, что оптимальные решения не равномерно распределяются по параметрам. Поэтому при дальнейшей оптимизации целесообразно сузить границы варьировемых параметров, что позволит найти более точное решение. Здесь мы считаем, что оба критерия имеют одинаковые весовые значения, хотя одному из критериев может отдаваться предпочтение. В этом случае сам исследователь выбирает решение из паретовой области.

Выводы

Представленная математическая модель радиально-поршневого пневмомотора позволяет достаточно точно описывать термодинамические процессы в рабочих полостях, а также строить полный набор механических характеристик и графики изменения фазовых координат в переходных и установившихся режимах работы.

Использование пакета программ оптимального проектирования MOVI дает возможность достаточно быстро решать задачу выбора значений большого количества конструктивных параметров, обеспечивающих наилучшие показатели сразу нескольких критериев качества.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК-П1450), проекта «Строительные технологии» (ГК-П1455), проекта «Мехатроника и создание микросистемной техники» (ГК-П2111).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герц Е. В. Динамика пневматических систем машин. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.
2. Мамонтов М. А. Вопросы термодинамики тела переменной массы. — М.: Оборонгиз, 1961. — 187 с.
3. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981. — 110 с.

V. I. Ilev, S. Yu. Misyurin

Detail mathematical model of pneumomotor and its multicriterion optimization

The detail mathematical model of radial-piston pneumomotor for dynamic process analysis and calculate mechanical characteristics are presented. The procedure of parameters determine using the multicriterion optimization programme MOVI are shown.

Keywords: pneumomotor, dynamic and mechanical characteristics, multicriterion optimization.

Mathematical Subject Classifications: 80M50

Ивлев Владимир Исаакович, к. т. н., Учреждение Российской академии наук институт машиноведения им. А. А. Благодравова РАН, 101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4, Email: ssmmrr@mail.ru

Мисюрин Сергей Юриевич, к. т. н., Учреждение Российской академии наук институт машиноведения им. А. А. Благодравова РАН, 101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4, Email: ssmmrr@mail.ru