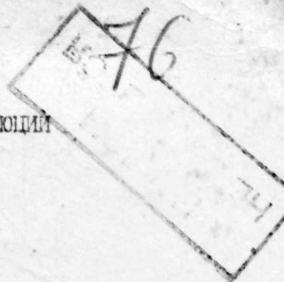


М401891



МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

СУЛИГА СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
МЕМБРАННОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ ШАГОВОГО
ПРИВОДА

Специальность 05.02.03 - Системы приводов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1982г.

Работа выполнена на кафедре "Гидравлика и гидроавтоматика" Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Попов Д.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Трифонов О.Н.

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Потепалов Ю.Н.

Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение "Пневматика" (г. Симферополь)

Защита диссертации состоится _____ 1982 года на заседании специализированного совета К 053.15.06 "Автоматические приводы и системы управления" в МВТУ имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005 г. Москва, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан

Ваши отзывы в 2-х экз.
просьба высылать по указе

Учёный секретарь
специализированного
кандидат технических наук

Л - 90611 от 24 . 06.82 г. Э
Типография МВТУ им.Н.Э.Ба

401898



1401891

Сулига С. В. Исследование и

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

актуальность работы. В принятых на XXVI съезде КПСР "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981 - 1985 годы и на период до 1990 года" указывается, что необходимой составной частью решения важнейших экономических задач является повышение технического уровня и качества продукции машиностроения, средств автоматизации и приборов, повышение экономичности, производительности, надёжности и долговечности выпускаемой продукции. Для этого необходимо обеспечить ускоренное развитие производства средств автоматизации управления машинами и оборудованием, комплектных электроприводов, гидро- и пневмооборудования.

15810441

Пневматические устройства и системы занимают одно из ведущих мест среди средств автоматизации производственных процессов. При управлении машинами и станками часто возникает необходимость в получении малых и точных перемещений различных механизмов и рабочих органов, что может быть достигнуто применением пневматических шаговых приводов (ППШ). В таких приводах исполнительным двигателем служит пневматический шаговый двигатель (ПШД), преобразующий последовательность импульсных сигналов системы управления в последовательность шагов выходного вала (или штока). При значительных нагрузках и большом числе позиций рабочих органов машин и станков используются ПШД вращательного действия с механической редукцией шага с большим передаточным отношением, которые развивают крутящий момент до 30 н·м (при рабочем давлении 0,4 МПа) и имеют величину углового шага до 0,25°. Однако, скорость вращения выходного вала у таких двигателей невелика (до 150°/с), что противоречит требованиям по высокой скорости отработки заданного углового перемещения. Задача повышения скорости вращения выходного вала ПШД может быть решена путём увеличения частоты следования управляющих импульсов. Для этой цели необходимо повысить быстродействие пневмоцепей, включающих элементы системы управления, рабочие камеры ПШД и усилители мощности, которые устанавливаются между двигателем и системой управления с целью повышения сигналов по давлению и расходу до уровня, требуемого ПШД. Поскольку наиболее инерционными элементами пневмоцепей являются усилители мощности, актуальна задача повышения быстродействия именно этих устройств, которое характеризуется отрезком времени между моментом подачи на вход усилителя сигнала

ла управления и моментом переключения его регулирующего органа в новое положение. Требуемое быстродействие усилителя растёт с ростом скорости вращения выходного вала ППД.

Анализ конструкций известных ППП показывает, что в последнее время наметилась тенденция использовать в таких приводах, часто работающих в экстремальных условиях окружающей среды, мембранные пневматические усилители (МПУ). Мембранные пневмоусилители являются более экономичными, по сравнению с золотниковыми и, особенно, струйными и вихревыми усилителями, благодаря малым утечкам рабочей среды в закрытом положении (при отсутствии сигнала управления). Это свойство МПУ очень важно для шаговых приводов, у которых при работе продолжительное время вал исполнительного двигателя неподвижен. Чаще всего в силовых приводах применяются двухкаскадные МПУ, первый каскад которых является усилителем давления, а второй – усилителем расхода. Быстродействие таких усилителей невелико из-за наличия нескольких промежуточных камер и подвижных элементов, что отрицательно сказывается на динамических характеристиках ППП. Наряду с требованием высокого быстродействия и высокой частоты пропускания импульсных сигналов, необходимых для работы в системе шагового привода, к МПУ предъявляются весьма высокие требования по пропускной способности по расходу, поскольку снижение пропускной способности усилителя при работе на частотах 10 Гц и выше вызывает резкое уменьшение давления в камерах ППД и, следовательно, крутящего момента на его выходном валу.

Таким образом, видна необходимость исследований с целью оптимизации мембранных пневмоусилителей по быстродействию.

Цель работы состоит в установлении оптимального по быстродействию соотношения между конструктивными и эксплуатационными параметрами двухкаскадного мембранного пневмоусилителя и создания методики расчёта по заданным значениям выходного расхода (или условному проходу), давления питания и управления усилителей такого типа, динамические характеристики которых удовлетворяют условиям работы в системе силового быстродействующего ППП.

Основные задачи работы следующие: 1) разработка нелинейной математической модели двухкаскадного МПУ, учитывающей основные особенности его функционирования; 2) проверка адекватности математической модели на основе экспериментальных исследований различных МПУ; 3) анализ с помощью теоретических и экспериментальных методов влияния конструктивных и эксплуатационных параметров

МПУ на его динамические характеристики; 4) выбор рациональной конструкции МПУ, в наибольшей мере удовлетворяющей условиям и требованиям работы в системе силового быстродействующего ППП; 5) определение на основе оптимизации по быстродействию оптимального соотношения между геометрическими параметрами усилителя; 6) разработка методики расчёта двухкаскадных МПУ с хорошими динамическими характеристиками и её экспериментальная проверка; 7) исследование работы промышленного МПУ типа ПФ67-21 и оптимизированного МПУ в системе силового ППП; 8) определение области наиболее рационального применения новых усилителей.

Основными методами исследования являются:

- исследование на ЭВМ математической модели МПУ с применением аппарата планирования эксперимента и статистической обработки результатов, а также математической модели пневмопривода с МПУ;
- экспериментальное исследование макетов мембранных пневмоусилителей и шагового пневмопривода с различными типами усилителей.

Научная новизна. Разработана нелинейная математическая модель двухкаскадного МПУ с учётом основных особенностей его функционирования. Проведен всесторонний анализ влияния конструктивных и эксплуатационных параметров усилителя на его динамические характеристики, в результате чего определены параметры, от которых существенно зависит быстродействие и частота пропускания импульсных сигналов усилителя. На основании анализа результатов факторного эксперимента, проведенного с помощью математической модели, получены описывающие процессы включения и выключения усилителя линейные уравнения регрессии для оценки характера и степени влияния геометрических параметров МПУ на его быстродействие. Путём оптимизации установлено оптимальное по быстродействию сочетание безразмерных геометрических параметров усилителя. На основе математической модели, отражающей функционирование шагового пневмопривода с МПУ, и экспериментальных исследований проведен сравнительный анализ влияния различных МПУ на быстродействие шагового привода.

Практическая ценность и реализация результатов. Предложены новые конструкции МПУ и соотношение геометрических размеров элементов усилителя, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к пневмоусилителям, работающим в системе силового быстродействующего шагового привода. Разработана методика инженерного расчёта двухкаскадных мембранных пневмоусилителей по заданным значениям выходного расхода, давления питания и управления. Ис-

пользование в методике безразмерных геометрических параметров позволяет рассчитывать МПУ с заранее заданным быстродействием в широком диапазоне типоразмеров. Результаты экспериментов и расчётов на ЭВМ дают возможность конструктору правильно оценить эффект от замены существующих МПУ на усилители с оптимальными по быстродействию размерами элементов и решить вопрос о целесообразности использования того или иного типа МПУ.

Результаты диссертационной работы подтверждены при создании и экспериментальном исследовании характеристик опытных образцов усилителя с составным клапанным узлом и МПУ с оптимальными по быстродействию геометрическими размерами элементов, изготовленных Симферопольским НИО "Пневматика" в 1981 году.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на:

- IV Всесоюзном симпозиуме по пневматическим (газовым) приводам и системам управления (г.Тула, июнь 1981 г.);
- научно-технических конференциях молодых учёных и специалистов МВТУ им.Н.Э.Баумана (г.Москва, февраль 1981 г. и март 1982 г.)
- научно-технических семинарах кафедры гидравлики и гидроавтоматики МВТУ им.Н.Э.Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ

Объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Текст диссертации изложен на 140 страницах. Диссертация иллюстрирована 101 рисунком и снабжена 10 таблицами. В библиографию включено 82 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение содержит общие сведения о требованиях, предъявляемых к МПУ, обоснование актуальности работы, описание её структуры, характеристику целей, задач и методов исследования, перечень основных положений, выносимых на защиту. Описаны возможные приложения результатов диссертационной работы.

В главе I приводится обзор конструкций и характеристик существующих МПУ, который показывает, что известные двухкаскадные мембранные пневмоусилители не отвечают тому комплексу требований, которые предъявляются к усилителям, работающим в системе быстродействующего привода. По таким характеристикам, как время переключения и частота пропускания импульсных сигналов существующие МПУ необходимо оптимизировать, сохраняя прежние

диапазоны изменения давления питания и управления, условный проход, габариты и массу.

Обзор существующих публикаций по МПУ показал, что в большинстве работ рассмотрены либо аналоговые усилители, которые по принципу действия отличаются от рассматриваемых дискретных (релейных) и поэтому не находят применения в ППП, либо однокаскадные МПУ, которые работают на низком (до 0,14 МПа) давлении и используются в логических системах управления. Работы, посвященные исследованию двухкаскадных релейных МПУ (В.П. Запорожец, В.А. Федорец и др.) рассматривают МПУ в условиях, отличных от условий работы в системе силового быстродействующего пневмопривода. Из особенностей функционирования МПУ в системе такого привода, например, шагового, можно выделить следующие основные положения: 1) высокие давления питания (от 0,2 до 1,0 МПа); 2) следование импульсов управляющего давления с большой частотой и частой сменой направления; 3) небольшой ход силовых элементов шаговых двигателей (сильфонов, поршней и др.) и возрастание в связи с этим доли подготовительного и заключительного периодов в полном времени срабатывания привода; 4) относительно большая пропускная способность по расходу выходного канала МПУ; 5) относительно малое время обрабатывания привода, в связи с чем характер переходного процесса МПУ и его быстродействие оказывают значительное влияние на динамические характеристики привода.

Недостаточное изучение характеристик МПУ, его работы в системе силового ППП, а также отсутствие в настоящее время методик расчета усилителей такого типа и научно обоснованных рекомендаций по улучшению их динамических характеристик не позволяет проектировать МПУ с высоким быстродействием и частотой пропускания импульсных сигналов, которые были бы пригодны для использования в пневматических шаговых приводах.

В последнее время широкое распространение получили методы оптимизации различного рода устройств и систем, характеризующихся большим числом взаимосвязанных параметров, в которых используется планирование эксперимента. Специально поставленная серия опытов даёт возможность представить зависимость между параметром оптимизации и влияющими на него факторами в виде полинома. Минимизируя (или находя максимум, как того требует задача исследования) полученный полином, можно найти такое сочетание значений факторов, при котором параметр оптимизации будет иметь минимальное (или максимальное) значение. Применение теории пла-

лирования эксперимента, разработанной в трудах зарубежных (Дж. Бокс, К. Уилсон, Дж.Клейнен, Р.Фишер и др.) и советских (В.В.На-
лимов, М.П.Адлер, И.Т.Зедгенидзе и др.) учёных, при оптимизации
устройств пневмоавтоматики дало хорошие результаты. Проведя оп-
тимизацию МПУ по быстродействию, выбрав в качестве параметра оп-
тимизации время срабатывания МПУ, а в качестве факторов – его
конструктивные и эксплуатационные параметры, можно разработать
методику расчёта таких усилителей на основе полученного опти-
мального сочетания значений этих факторов.

Ведущая роль в области исследования пневмоприводов принад-
лежит советским учёным, благодаря фундаментальным исследованиям
которых инженерная практика обогатилась весьма эффективными и
точными методами расчёта пневмоприводов. Опираясь на современные
представления о газодинамических процессах, можно решать широкий
круг задач динамического анализа и синтеза пневматического при-
вода с учётом всех его элементов. Теории отдельно взятого пнев-
мопривода, в качестве которого может рассматриваться каждый из
каналов ПИД, достаточно полно изложена в трудах Е.В.Герц и Г.В.
Крейнина. Однако совместная работа пневмопривода с МПУ в из-
вестных работах не рассматривалась.

В главе 2 представлена нелинейная математическая модель
двухкаскадного МПУ, полученная на основе дифференциальных урав-
нений, описывающих процессы в камерах МПУ и движение его под-
вижных узлов, а также приведены результаты исследования динами-
ческих характеристик МПУ численными методами по математической
модели. Нелинейная математическая модель, учитывающая основные
особенности функционирования усилителя, разрабатывалась с целью
замены трудоёмких экспериментов на натурной модели при оптимиза-
ции расчётами на ЭВМ (изменение многих конструктивных размеров
МПУ в процессе экспериментов является очень сложной задачей).
При переходе к безразмерным параметрам форма записи уравнений
становится наиболее простой:

$$\frac{d\sigma_a}{d\tau} = [\alpha_{11} \cdot q_{\text{зуп}} \cdot \varphi(\sigma_a, \sigma_{\text{зуп}}) - \sigma_a \cdot \beta_1 \cdot S_1 \cdot \alpha_0] \cdot k / (\gamma_a + \beta_1 \cdot h_1 \cdot \alpha_0);$$

$$\frac{d\sigma_b}{d\tau} = [\alpha_3 \cdot \sigma_c \cdot \varphi(\sigma_b, \sigma_c) - \sigma_b \cdot \beta_1 \cdot \varphi(\sigma_{\text{ат}}, \sigma_b) + \sigma_b \cdot \beta_1 \cdot S_1 \cdot \alpha_0 \cdot k] / (\gamma_b + \beta_1 \cdot h_1 \cdot \alpha_0);$$

$$\frac{ds_1}{d\tau} = N_1 \cdot [\sigma_a \cdot \beta_1 - \sigma_b \cdot (\beta_1 - \beta_2) - \varphi \cdot \sigma_c \cdot \beta_2 + (\varphi + 1) \cdot \sigma_c \cdot \beta_2 \cdot h_1] - s_1 \cdot \eta_1;$$

$$\frac{dh_1}{d\tau} = S_1;$$

$$\frac{d\sigma_c}{dt} = [\psi(\sigma_c, 1) - \alpha_3 \cdot \sigma_c \cdot \psi(\sigma_b, \sigma_c) - \sigma_c \beta_2 \cdot S_2 \cdot k] / (\chi_c + \beta_2 \cdot h_2);$$

$$\frac{d\sigma_d}{dt} = [\sigma_c(1-h_2) \cdot M_3 \cdot \alpha_3 \cdot \psi(\sigma_d, \sigma_c) - \alpha_3 \cdot \sigma_d \cdot \psi(\sigma_{at}, \sigma_d)] \cdot \sqrt{g} / \chi_d;$$

$$\frac{dS_2}{dt} = N_2 \cdot [\sigma_c \beta_2 + m - \beta_4 - \sigma_d(\beta_2 - \beta_4)] - S_2 \cdot \eta_2;$$

$$\frac{dh_2}{dt} = S_2;$$

$$\frac{d\sigma_e}{dt} = [h_2 \cdot M_4 \cdot \alpha_4 \cdot \psi(\sigma_e, 1) - \sigma_e(1-h_2) \cdot M_5 \cdot \alpha_5 \cdot \sqrt{g_e} \cdot \psi(\sigma_d, \sigma_e) - \alpha_5 \cdot \sigma_e \cdot \sqrt{g_e} \cdot \psi(\sigma_{at}, \sigma_e)] \cdot k / \chi_e;$$

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \frac{\theta_e}{\sigma_e} \frac{d\sigma_e}{dt} - \frac{\theta_e}{\chi_e \sigma_e} [M_4 \cdot \alpha_4 \cdot h_2 \cdot \theta_e \cdot \psi(\sigma_e, 1) - M_5 \cdot \alpha_5 \cdot (1-h_2) \cdot \sigma_e \cdot \sqrt{g_e} \cdot \psi(\sigma_d, \sigma_e) - \alpha_5 \cdot \sigma_e \cdot \sqrt{g_e} \cdot \psi(\sigma_{at}, \sigma_e)];$$

Уравнения описывают изменения давления в глухой камере на входе в усилитель (σ_a) и давлений в прочных камерах ($\sigma_b, \sigma_c, \sigma_d, \sigma_e$), изменение температуры в проточной выходной камере (θ_e), изменения высоты камер первого каскада (h_1), высоты надмембранной камеры второго каскада (h_2) и скоростей перемещения мембранных узлов (S_1 и S_2). Введение функции $Q_{упр}$ позволяет моделировать существенно нелинейную характеристику глухой камеры ($Q_{упр} = \sigma_{упр}$, если $\sigma_{упр} > \sigma_a$, и $Q_{упр} = \sigma_a(\sigma_a/\sigma_e)^{k-1}$, если $\sigma_{упр} < \sigma_a$). Расходная функция $\psi(A, B)$, вводимая в виде составного логического оператора, позволяет автоматизировать переход от докритического режима течения газа к надкритическому (и наоборот) и изменение знака расхода на всех дроселирующих элементах. Безразмерные давления σ ($\sigma_i = p_i/p_{лит}$) и объёмы χ ($\chi_i = W_i/W_0$) имеют индексы камер, а безразмерные площади β ($\beta_j = F_j/F_0$), проводимости α ($\alpha_j = f_j/f_7$), перемещения h ($h_j = X_j/X_0$) и скорости S — индексы соответствующих элементов МПУ согласно рис. I ($\sigma_{ат} = p_{ат}/p_{лит}$, $\alpha_0 = h_0/\chi_0$, $\sigma_{упр} = p_{упр}/p_{лит}$). Базовая единица времени равна $t_{б1} = F_0 \cdot \chi_0 / f_7 \sqrt{k \cdot R \cdot T_0}$, где $F_0 \cdot \chi_0 = W_0$ — базовый объём; $F_0 = F_2 + W_c/\chi_0$ — базовая площадь; χ_0 — максимальное перемещение мембранно-клапанного узла 4 (рис. I), принятое за базовое; $a_0 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_0}$ — скорость звука при нормальных условиях; T_0 — температура воздуха в магистрали питания (базовая температура); R — газовая постоянная (для воздуха $R = 287$ дж/кг·К°); k — показатель адиабаты; f_7 — эффективная площадь дросселя 7. Параметры N_1 и N_2 характеризуют отношение силы, развиваемой базовой площадью при базовом давлении $p_{лит}$, к силе

инерции, развиваемой массой соответствующего мембранного узла; η_1 и η_2 — параметры, характеризующие вязкое трение при движении мембран; M_5 и M_6 — переменные коэффициенты расхода клапанных целей; Ψ — коэффициент, учитывающий газодинамическую силу, действующую на мембрану I со стороны потока, вытекающего из сопла.

В математическую модель вводились ограничения по перемещениям мембранных узлов, связанные с посадкой клапанов в седла и посадкой жёсткого центра мембраны I на срез сопла и верхнюю стенку камеры A. Учитывалось изменение эффективной площади мембраны 2, деформации упругих уплотняющих колец и утечки через неплотно закрытое сопло.

Расчёт переходных процессов и откликов на гармонический сигнал проводился по специально разработанному алгоритму с использованием стандартной программы численного интегрирования систем дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты на ЭВМ типа ЕС-1022.

За базовую конструкцию при расчётах был взят промышленный усилитель ПБ7-2I. К выходу усилителя подключался постоянный дроссель 9 (рис. I), диаметр которого был одинаков при расчётах и экспериментах. Такой вид нагрузки, в отличие от ёмкости, позволял непосредственно оценить времена срабатывания каскадов усилителя. Результаты, полученные в процессе исследования математической модели МПУ на ЭВМ, позволили установить факторы, оказывающие наибольшее влияние на динамические характеристики МПУ, сделать выводы о характере и степени влияния на быстродействие усилителя его геометрических и эксплуатационных параметров, а также установить оптимальные диапазоны изменения этих параметров. Анализ переходных процессов МПУ, проведенный на основе численных решений системы (I), показал, что влияние таких параметров, как площадь сопла f_3 , диаметр седла клапана d_{κ} , площади дросселей 7 и 10 f_7 и f_{10} , канала 8 f_8 и эффективная площадь мембраны 2 F_2 , имеет весьма сложный и противоречивый характер. Увеличение, например, площади сопла приводит к ускорению процесса выключения МПУ, но затягивает процесс включения, а увеличение площадей f_7 , f_8 и f_{10} приводит к обратному результату. Таким образом, добиться повышения быстродействия МПУ путём перебора различных значений его геометрических параметров без использования аппарата планирования эксперимента, где предполагается одновременное плановое варьирование всех параметров,

чрезвычайно сложно. В то же время, проведенные расчёты показали, что правильный выбор геометрических размеров элементов МПУ приводит к значительному повышению быстродействия усилителя.

В результате анализа полученных данных было установлено, что наиболее длительным процессом при включении МПУ является переключение мембранно-клапанного узла, которому препятствует повышение давления в камере d . Из-за того, что при перемещении узла обе клапанные щели открыты в камеру d проскакивает воздух под высоким давлением из камеры питания. Это приводит не только к затягиванию процесса включения МПУ, но и к непроизводительным потерям рабочей среды. Для устранения этого недостатка МПУ предлагается конструкция клапанного узла, состоящего из двух подвижных относительно друг друга частей (рис.2). Такая конструкция обеспечивает при включении усилителя последовательное закрытие сливной и открытие наливной щелей, что практически исключает сообщение камеры питания с камерой d и далее с атмосферой. При выключении МПУ, когда давление в камере d способствует ускорению процесса, обе части клапанного узла перемещаются одновременно.

В главе 3 приводятся результаты экспериментального исследования характеристик усилителей ПФ67-2I, ПФ67-2IP и золотникового усилителя П-РОЗПИ-С. Экспериментальное исследование проводилось с целью проверки адекватности математической модели МПУ и выводов, сделанных на основании теоретического анализа, а также для определения входящих в математическую модель коэффициентов и зависимостей, которые невозможно было установить на основе справочных данных или расчётным путём. Эти коэффициенты и зависимости определялись на макетах, собранных из деталей усилителя ПФ67-2I.

Экспериментальные исследования показали, что расчёты, проведенные на ЭВМ по математической модели, достаточно правильно отражают характер переходных процессов МПУ. Некоторые расхождения в форме кривых изменения давлений в камерах усилителя могут быть объяснены теми допущениями, которые были приняты при составлении математической модели. Хорошее совпадение результатов расчётов и экспериментов подтверждает адекватность модели и возможность замены факторного эксперимента на натурной модели МПУ расчётами на ЭВМ по математической модели.

Последующие эксперименты, в ходе которых исследовалось влияние на быстродействие МПУ его геометрических параметров (которые можно было изменять в лабораторных условиях), давления питания и управления, подтвердили выводы, сделанные на основе теоретического

анализа. После увеличения площади дросселя IO с 2 мм² до 4,4 мм² и диаметра сопла с 0,8 мм до 1,2 мм время срабатывания МПУ уменьшилось и он мог пропускать импульсные сигналы, следующие с частотой до 21 Гц ($p_{\text{пит}} = 0,3$ МПа, абсолютное). С ростом $p_{\text{пит}}$ пропускаемая частота, как и у прототипа, падала.

Экспериментальная проверка работоспособности МПУ с составным клапанным узлом подтвердила его экономичность: при включении потери рабочей среды из камеры питания через камеру d в атмосферу отсутствовали. Быстродействие МПУ повысилось незначительно, очевидно из-за недостаточной эластичности уплотняющего кольца и возросшего сухого трения между деталями клапанного узла. Применение более эластичных колец и тщательная обработка посадочных поверхностей может привести к повышению быстродействия таких усилителей.

В ходе экспериментов были уточнены оптимальные диапазоны изменения геометрических размеров элементов МПУ, которые необходимо знать при проведении факторного эксперимента: максимальный ход мембранно-клапанного узла - 0,6...1,2 мм; диаметр седла клапана - 8...10 мм; площадь сопла - 0,5...2,0 мм²; площадь дросселя 7 - 0,07 мм²; площадь дросселя IO - 2...8 мм²; площадь канала 8 - 10...30 мм²; площадь мембраны 2 - 450...600 мм². Эти геометрические размеры охватываются пятью безразмерными параметрами: $\alpha_5 = \alpha_6 = \pi \cdot d_{\text{кл}} \cdot X_0 / f_1$, $\alpha_3 = f_3 / f_1$, $\alpha_{10} = f_{10} / f_1$, $\alpha_7 = f_7 / f_1$ и $\beta_2 = F_2 / F_0$. Значительное влияние на быстродействие МПУ оказывает величина $p_{\text{пит}}$. Но, поскольку при проектировании усилителя величина номинального давления питания будет приниматься в зависимости от конкретного применения его в системе того или иного пневмопривода, целесообразнее провести оптимизацию параметров МПУ для ряда значений $p_{\text{пит}}$.

Глава 4 посвящена оптимизации параметров МПУ по быстродействию методом крутого восхождения. В математическую модель усилителя, которая использовалась при оптимизации, были внесены изменения, позволившие избежать недостатков конструкции П067-21: холостой ход мембраны первого каскада и мембранно-клапанного узла (из-за деформации уплотняющих колец), утечки через сопло и др. На рис.3 показана матрица планирования и результаты опытов (расчётов на ЭВМ) первого этапа оптимизации, на котором строилась линейная модель процессов включения и выключения МПУ в виде полиномов

$$T_{\text{вкл}} = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5,$$

$$T_{\text{вкл}} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5, \quad (2)$$

где $a_0, a_1 \dots a_5$ и $b_0, b_1 \dots b_5$ — коэффициенты регрессии; $x_1 \dots x_5$ — соответствующие параметрам $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_2$ кодированные значения факторов, изменяющиеся в пределах $+1 \dots -1$ (в матрице вместо $+1$ и -1 подставлены знаки "+" и "-").

Матрица планирования (рис.3), представляющая собой полуреплику полного факторного эксперимента для пяти факторов (фактор x_5 заменяет полное взаимодействие первых четырех факторов — $x_1 x_2 x_3 x_4 = x_5$), позволяет определить коэффициенты полиномов (2) с минимальной погрешностью: коэффициенты $a_1 \dots a_5$ и $b_1 \dots b_5$ при линейных членах равны произведениям "истинных" значений коэффициентов при линейных членах на значения коэффициентов при взаимодействиях факторов третьего порядка, которыми можно пренебречь. Например, $a_1 = \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_{2345}$, где $\bar{a}_1$ — "истинное" значение коэффициента при факторе x_1 , которое может быть определено только в результате полного факторного эксперимента.

После обработки результатов первого этапа оптимизации получены уравнения, связывающие время включения и выключения МПУ с геометрическими размерами его элементов, в которые после проверки значимости коэффициентов по критерию Стьюдента включены значимые эффекты взаимодействия и отброшены незначимые линейные эффекты:

для $P_{\text{пит}} = 0,3 \text{ МПа}$

$$T_{\text{вкл}} = 25,5 + 10,8 \cdot x_1 + 1,8 \cdot x_2 - 5,0 \cdot x_4 + 1,9 \cdot x_5 - 4,7 \cdot x_1 \cdot x_4;$$

$$T_{\text{выкл}} = 30,1 - 18,5 \cdot x_2 + 1,7 \cdot x_3 + 4,4 \cdot x_5 - 2,8 \cdot x_2 \cdot x_3;$$

для $P_{\text{пит}} = 0,5 \text{ МПа}$

$$T_{\text{вкл}} = 25,5 + 11,9 \cdot x_1 + 2,3 \cdot x_2 - 1,3 \cdot x_3 - 6,4 \cdot x_4 - 5,4 \cdot x_1 \cdot x_4 - 1,7 \cdot x_2 \cdot x_5;$$

$$T_{\text{выкл}} = 33,2 - 1,4 \cdot x_1 - 23,6 \cdot x_2 + 1,4 \cdot x_4 + 4,5 \cdot x_5 - 1,6 \cdot x_1 \cdot x_5 - 3,5 \cdot x_2 \cdot x_5. \quad (3)$$

Уравнения (3) адекватно описывают процессы включения и выключения МПУ (проверка адекватности проводилась по критерию Фишера) и позволяют установить характер и степень влияния факторов на изучаемые процессы. О характере влияния факторов говорят знаки коэффициентов регрессии, а величины коэффициентов являются количественной мерой этого влияния. Для увеличения скорости действия МПУ следует увеличивать значения факторов, коэффициенты при которых имеют знак "-", а факторы со знаком "+" следует уменьшать. В первую очередь надо уменьшить значение параметра α_4 (фактор x_1) и увеличить значение α_3 (фактор x_2) по сравнению с их средним значением, т.е. значением в центре эксперимента.

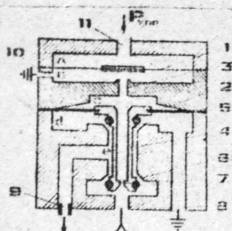


Рис.1. Принципиальная
схема усилителя ПФ67-21

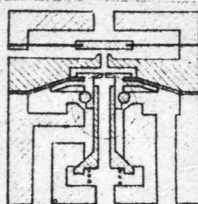


Рис.2. Принципиальная
схема усилителя с составным
клапаным узлом

№ П.П.	Кодированные значения факторов											$P_{гид} = 0.3 \text{ МПа}$		$P_{гид} = 0.5 \text{ МПа}$		
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_5	$T_{вкл}, \text{мс}$	$T_{выкл}, \text{мс}$	$T'_{вкл}, \text{мс}$	$T'_{выкл}, \text{мс}$
I	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	14,4	50,4	14,4	68,4
2	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	40,8	38,4	43,2	43,2
3	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	16,4	9,1	17,3	8,0
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	52,0	10,8	57,6	10,8
5	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	13,2	40,8	13,2	46,8
6	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	46,8	52,0	49,2	55,2
7	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	16,2	13,2	13,5	9,6
8	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	44,4	12,0	46,8	8,4
9	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	12,0	42,0	10,8	54,0
10	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+	26,4	55,1	24,0	60,1
11	+	-	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	17,8	10,8	17,5	10,3
12	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	27,5	10,9	30,0	9,6
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	13,0	58,9	9,6	70,1
14	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	22,9	46,7	21,6	50,4
15	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	15,1	12,0	13,0	8,2
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	29,6	14,2	27,0	12,0

Рис.3. Матрица планирования и результаты расчётов первого
этапа оптимизации

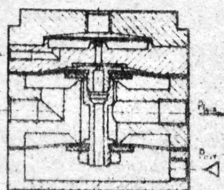


Рис.4. Принципиальная
схема нового усилителя

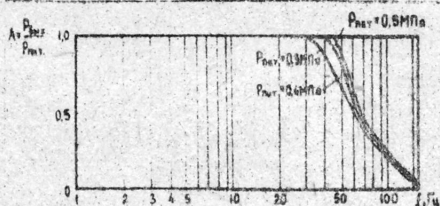


Рис.5. Зависимость без-
размерной амплитуда выходного
сигнала от частоты срабатывания

Интерпретация эффектов взаимодействия не так однозначна, как линейных эффектов. В нашем случае все эффекты взаимодействия имеют знак "-", поэтому следует одновременно уменьшать или увеличивать значения входящих в них факторов, учитывая знаки линейных эффектов. Поскольку для каждого взаимодействия, входящего в уравнения (3), знаки линейных эффектов различны, приходится учитывать численные значения коэффициентов. Для минимизации $T_{\text{вкл}}$ следует уменьшать значение фактора X_1 и увеличивать X_4 , для $T'_{\text{вкл}}$ - увеличивать X_2 и уменьшать X_5 , для $T'_{\text{вкл}}$ - уменьшать X_1, X_2, X_3 и увеличивать X_4 , а для $T'_{\text{вкл}}$ - увеличивать X_2 и уменьшать X_1 и X_5 . Противоречивый характер влияния факторов и наличие в уравнениях (3) эффектов взаимодействия (требуется линейная модель) делает оптимизацию методом крутого восхождения малоэффективной. Поэтому, на втором этапе, была реализована ещё одна матрица для факторов X_3, X_4 и X_5 , состоящая из восьми опытов. Фактор X_1 фиксировался на нижнем уровне ($X_1 = -1$), а фактор X_2 - на верхнем ($X_2 = +1$). Такое сочетание факторов X_1 и X_2 дало наилучшие результаты на первом этапе (опыты № 3, 7, 11 и 15): пропускаемая частота МПУ составляет 27,8...32,1 Гц при $p_{\text{пит}} = 0,3$ МПа и 23,8...37,9 Гц при $p_{\text{пит}} = 0,5$ МПа, тогда как для остальных опытов - 6,3...18,5 Гц. Пропускаемая частота определялась как $f_{\text{пр}} = 1/T_{\text{max}}$, где T_{max} - большее из значений $T_{\text{вкл}}$ и $T_{\text{выкл}}$ для данного опыта.

Поскольку в параметр α_5 входят величины $d_{\text{кл}}$ и X_0 , исследовалось также влияние на быстродействие МПУ соотношения между ними при неизменном значении α_5 ($X_0/d_{\text{кл}} = 0,050; 0,075; 0,133$). Лучшие результаты были получены при $X_0/d_{\text{кл}} = 0,075$.

На втором этапе были получены адекватные линейные модели процессов включения и выключения МПУ. Так как необходимо было минимизировать одновременно $T_{\text{вкл}}$ и $T_{\text{выкл}}$, для расчёта крутого использовалась линейная модель общего времени срабатывания МПУ, полученная путём объединения моделей для $T_{\text{вкл}}$ и $T_{\text{выкл}}$ с учётом влияния всех факторов

$$T_{\text{ср}} = T_{\text{вкл}} + T_{\text{выкл}} = 27,5 - 0,6 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 + 1,25 \cdot X_5. \quad (4)$$

Модель получена для $p_{\text{пит}} = 0,3$ МПа. Поскольку в области факторного пространства второго этапа оптимизации наблюдалось увеличение быстродействия МПУ с ростом $p_{\text{пит}}$, минимизация полинома (4) позволит получить оптимальные значения факторов, которые будут справедливы и для более высоких значений $p_{\text{пит}}$.

В результате расчёта крутого восхождения определены следу-

щие оптимальные по быстродействию значения безразмерных параметров усилителя: $\alpha_1 = \alpha_6 = 215,4$; $\alpha_3 = 28,5$; $\alpha_0 = 126$; $\alpha_2 = 246$; $\beta_2 = 0,317$, которые легли в основу методики расчёта двухкаскадных МПУ по заданным значениям выходного расхода, давления питания и управления. Разработанная методика позволяет рассчитывать МПУ с хорошими динамическими характеристиками в широком диапазоне типоразмеров. По предлагаемой методике был рассчитан МПУ на те же диапазоны давлений питания и управления и условный проход, что и усилитель ПФ67-21. Новый МПУ (рис.4), обладая лучшими статическими характеристиками, чем прототип (выходной расход увеличился в 1,5 раза, мощность выходного потока - в 1,3 раза), имеет хорошие динамические характеристики: $T_{вкл} = 12...26$ мс, $T_{выкл} = 5...10$ мс, $f_{ср}$ до 50 Гц, в зависимости от значения $p_{пит}$ (по паспорту у ПФ67-21 50 мс и 13 Гц, соответственно). По значению пропускаемой частоты ($f_{ср}$ возрастала с ростом $p_{пит}$, что подтверждает результаты расчётов на ЭВМ - рис.5) новый МПУ превосходит известные зарубежные усилители аналогичного типа.

В главе 5 рассмотрена работа МПУ в системе силового шагового пневмопривода, имеющего ПШД с конической зубчатой передачей и качающейся ведущей шестерней. Уравнения, описывающие изменение давления в сильфоне и движение его подвижной стенки с толкателем, представлены в безразмерной форме

$$\begin{aligned} \dot{b}_{сф} &= [\alpha_1 \cdot q_{сф} \cdot \Psi(b_{сф}, b_0) - b_{сф} \beta_{сф} s_{сф} \alpha_{сф}] k / (\gamma_{сф} + \beta_{сф} h_{сф} \alpha_{сф}); \\ \dot{s}_{сф} &= \{ N_{сф} [\beta_{сф} (b_{сф} - b_{ст}) + M - X] - c (3h_{сф} - 1.5) \} \alpha_2^2 / \alpha_{сф}^2 \beta_{сф}^2; \\ h_{сф} &= s_{сф}; \end{aligned} \quad (5)$$

где $b_{сф}$, $s_{сф}$, $h_{сф}$, $\beta_{сф}$, $\gamma_{сф}$ - безразмерные давление в сильфоне, скорость и перемещение подвижной стенки сильфона, площадь подвижной стенки сильфона и его начальный объём, соответственно; $\alpha_{сф} = L/x_0$, где L - полный ход подвижной стенки сильфона; χ - параметр, учитывающий нагрузку; $N_{сф}$ - параметр, аналогичный N_1 и N_2 в системе (I); M - параметр, учитывающий вес толкателя; c - параметр, учитывающий жёсткость сильфона.

Для совместного численного интегрирования систем (I) и (5) их следует привести к одной базовой единице времени. Связь между базовыми единицами времени МПУ ($t_{б1} = F_0 x_0 / f_1 \sqrt{k R T_0}$) и сильфона ($t_{б2} = F_{сф} L / \pi d_{кл} x_0 \sqrt{k R T_0}$) имеет вид: $t_{б2} = t_{б1} \beta_{сф} \alpha_{сф} / \alpha_6$. Численное интегрирование систем (I) и (5) для различных МПУ показало, что применение новых усилителей позволяет в 2 раза повысить частоту работы ПШД и скорость вращения вала двигателя, по сравнению

нию с приводом, в котором используются усилители ПФ67-21. Расчёты проводились для ряда значений $\rho_{\text{плт}}$ и нагрузки на толкатель.

Экспериментальное исследование работы ПШП с усилителями ПФ и работы отдельно взятого канала ПШД с различными усилителями подтвердило результаты теоретического анализа. Установлено, что для более полного использования преимуществ нового МПУ необходимо уменьшать вредные объёмы сильфонов двигателя. Поскольку вредный объём сильфона исследуемого ПШД составлял 21 см^3 при полном объёме сильфона 28 см^3 , выигрыш от применения новых МПУ оказался немного меньше, чем это показали результаты расчётов на ЭВМ. В целом же применение оптимизированных по быстродействию МПУ позволило почти в 2 раза увеличить частоту работы привода и скорость вращения вала ПШД, расширяя тем самым область применения шаговых пневмоприводов.

В заключении формулируются основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. На основании анализа характеристик известных МПУ и исследования работы МПУ в системе шагового пневмопривода показана необходимость разработки методов расчёта МПУ на заданное быстродействие.

2. Разработаны математическая модель двухкаскадного МПУ и алгоритм исследования этой модели на ЭВМ с учётом основных существенно нелинейных факторов и особенностей функционирования устройств такого типа. Адекватность модели подтверждена экспериментальными исследованиями нескольких вариантов МПУ.

3. Проведен анализ влияния конструктивных и эксплуатационных параметров МПУ на его характеристики. Установлено, что наибольшее влияние на быстродействие усилителя оказывают следующие параметры: диаметр седла клапана, ход мембранно-клапанного узла, эффективные площади дросселя в клапане, каналов из подмембранных камер первого и второго каскадов, сопла и мембраны второго каскада, а также давление питания.

4. Создан новый МПУ с составным клапаным узлом, который позволяет при включении усилителя избежать соединения камер питания с подмембранной камерой второго каскада и далее с атмосферой. При такой конструкции клапанного узла уменьшаются потери рабочей среды и увеличивается быстродействие усилителя.

5. На основании анализа результатов факторного эксперимента, проведенного с помощью математической модели МПУ, получены описывающие процессы включения и выключения усилителя линейные

уравнения регрессии для оценки характера и степени влияния геометрических параметров МПУ на его быстродействие.

6. Методом круглого восхождения получены оптимальные по быстродействию значения безразмерных геометрических параметров МПУ: $\alpha_1 = \alpha_6 = 215,4$; $\alpha_3 = 28,5$; $\alpha_{10} = 126$; $\alpha_8 = 246$; $\beta_2 = 0,317$ (для ПФ67-21 $\alpha_5 = \alpha_6 = 386$; $\alpha_3 = 7,14$; $\alpha_{10} = 28,6$; $\alpha_8 = 180$; $\beta_2 = 0,432$).

7. Разработана методика расчёта двухкаскадных МПУ с использованием полученных в результате оптимизации безразмерных параметров, которая позволяет по заданным значениям выходного расхода, давления питания и управления рассчитать размеры основных элементов усилителя. При этом достигается заданное быстродействие.

8. Экспериментальное исследование характеристик МПУ, рассчитанного по предлагаемой методике, показало, что новый усилитель обладает большим быстродействием и имеет большую частоту пропускания импульсных сигналов, чем известные аналогичные МПУ.

9. Применение оптимизированного по быстродействию МПУ в системе шагового пневмопривода приводит к увеличению скорости вращения вала ПНД почти в два раза, по сравнению с приводом, в котором используются усилители ПФ67-21.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Пневматический шаговый привод с волновой конической передачи / В.Н.Стобецкий, Е.В.Александрович, Д.Н.Попов, Э.А.Микиртумов, С.В.Сулига: Тез. докл. IV Всесоюзн. симп. по пневматическим приводам и системам управления. Тула, 1981, с.41.

2. Сулига С.В. Экспериментальное исследование характеристик пневматических усилителей. - Москва, 1981. - 12 с. - Рукопись представлена МВТУ им.Н.Э.Баумана. Деп. в НИИМаш 22.9.81, №232-81.

3. Сулига С.В. Высокомоментный пневматический шаговый привод. - Москва, 1981. - 13 с. - Рукопись представлена МВТУ им.Н.Э.Баумана. Деп. в НИИМаш 22.9.81, №233-81.

4. Попов Д.Н., Сулига С.В. Основы расчёта и выбора оптимальных параметров мембранных пневматических усилителей. - Вестник машиностроения, 1982, №4, с.7-10.

5. Сулига С.В. Исследование переходных процессов в мембранном пневмоусилителе с помощью ЭВМ. - ИВУЗ. Машиностроение, 1982, № 6, с.53-58.

Сулига

