

6
А-65

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ТАТЕВОСЯН М.М..

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ,
УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СДВИГОМ
МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ

/05.230 - электрические машины/

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1970

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском институте автоматизации производственных процессов химической промышленности и цветной металлургии (НИИАВ-томатика) г. Кировакана.

Научный руководитель д.т.н. профессор СВЕЧАРИК Д.В.

Официальные оппоненты:

д.т.н. профессор КОПЫЛОВ И.П.

к.т.н. доцент АРЕШЯН Г.Л.

Ведущая организация указана в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан "2" августа 1970 г.

Защита диссертации состоится в "4" августа 1971 г. на заседании Совета электромеханического факультета при Московском ордена Ленина энергетическом институте.

Отзыв в двух экземплярах просим направлять по адресу: Москва Е-250, Красноказарменная ул., д. 14, Совет МЭИ. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА МЭИ

КОЧЕМАРОВ Н.А.

С появлением новых промышленных объектов, требующих сравнительно быстрого и точного воздействия на процесс, к средствам и устройствам автоматики предъявляются все более высокие требования по точности, надежности и простоте управления. В связи с этим Государственной системой приборов /ГСП/ ставится задача наряду с другими исполнительными устройствами создать также ряд общепромышленных электрических устройств /ЭИУ/ переменной скорости с высокой надежностью и высокими динамическими и статическими показателями. Одновременно блочно-модульный принцип построения систем требует изыскания новых принципов и конструкций, позволяющих универсально использовать средства и элементы ЭИУ.

Одним из путей обеспечения указанных требований можно считать применение в ЭИУ исполнительных двигателей, объединяющих в себе и другие элементы, например, оконечные усилители /двигатели-усилители разработки МЭИ/, или совмещающих функции нескольких элементов устройства - двигатели, управляемые пространственным сдвигом магнитных полей /ДУПС/. Применение ДУПСов позволяет исключить из ЭИУ оконечные усилители, элементы обратных связей по положению, а в ряде случаев и входные преобразующие устройства в системах с сигналом управления в виде механического перемещения.

ДУПС представляют собой двухфазную асинхронную машину с полым немагнитным ротором и обмотками на наружном и внутреннем статорах. Внутренний статор имеет возможность поворота относительно наружного. Управление таких двигателей осуществляется поворотом внутреннего статора, в результате



чего в двигателе создается пространственный сдвиг θ между магнитными полями статоров.

При пространственном сдвиге $\theta = \frac{\pi}{2}$ ДУПС становится обычным управляемым двигателем. При произвольно фиксированном угле $\theta \neq \frac{\pi}{2}$ ДУПС является несимметричной асинхронной машиной.

Теория указанных машин подробно исследована Ю.С.Чечетом, Е.М.Лопухиной, Н.П.Ермолиным, В.В.Хрущевым, А.А.Вайнфельдом, Ю.М.Пульером, Ю.П.Каасиком, Е.Д.Несговоровой, Г.Л.Арешьяном, И.А.Вевярко, В.А.Ивановым-Смоленским, А.И.Адаменко, Ф.М.Юферовым, А.А.Войтехом и другими учеными и служит основой для развития и решения теоретических и практических вопросов в двигателях с пространственным управлением.

Вопросы пространственной несимметрии в электрических машинах рассмотрены и зарубежными учеными *Tha C., Krause P., Conelly D.*, Сливинским Т. и рядом других.

Вопросы теории и применения ДУПС с полым немагнитным ротором впервые рассмотрены Д.В.Свечарником, использовавшим метод пространственного управления в совмещенном сельсин-двигателе /ССД/, изобретенном в 1956 г.

Исследованию ССД в схемах синхронной передачи угла посвящены работы И.А.Бабанова, Л.Л.Шидловича, А.А.Белоглазова.

В работе Ю.М.Келина рассматриваются исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором при комбинированном управлении.

Состояние развития электрических исполнительных устройств и анализ приведенных выше работ показывают целесообразность исследования ДУПС в качестве исполнительного двигателя для общепромышленных ЭИУ.

В реферируемой работе исследуются двигатели, управляемые пространственным сдвигом магнитных полей (ДУПС) с полым немагнитным ротором, полым ротором с ферромагнитными вставками для применения в общепромышленных ЭИУ переменной скорости.

При анализе ЭИУ использованы работы О.И.Авена, С.М.Доманицкого, И.П.Копылова, А.С.Сандлера, а также работы СКБ Автоматика г. Кировакана по ЭИУ переменной скорости, выполненные с участием автора.

В первой главе дано обобщение конструктивных схем и целесообразных форм ДУПС-ов. Выявлены и систематизированы требования, предъявляемые к ДУПС-ам, и на основе структурных схем показана возможность применения их в ЭИУ общепринятого назначения.

Двигатель с пространственным управлением представлен как индукционная машина с двумя системами обмоток, расположенных на разных магнитопроводах, которые образуют наружный и внутренний статоры и имеют возможность поворота друг относительно друга.

В зазоре между статорами вставлен полый ротор (рис. I).

Электропитание ДУПС осуществляется по схеме, обеспечивающей временной сдвиг между результирующими полями, возбужденными от каждой системы обмоток. При совпадении этих полей

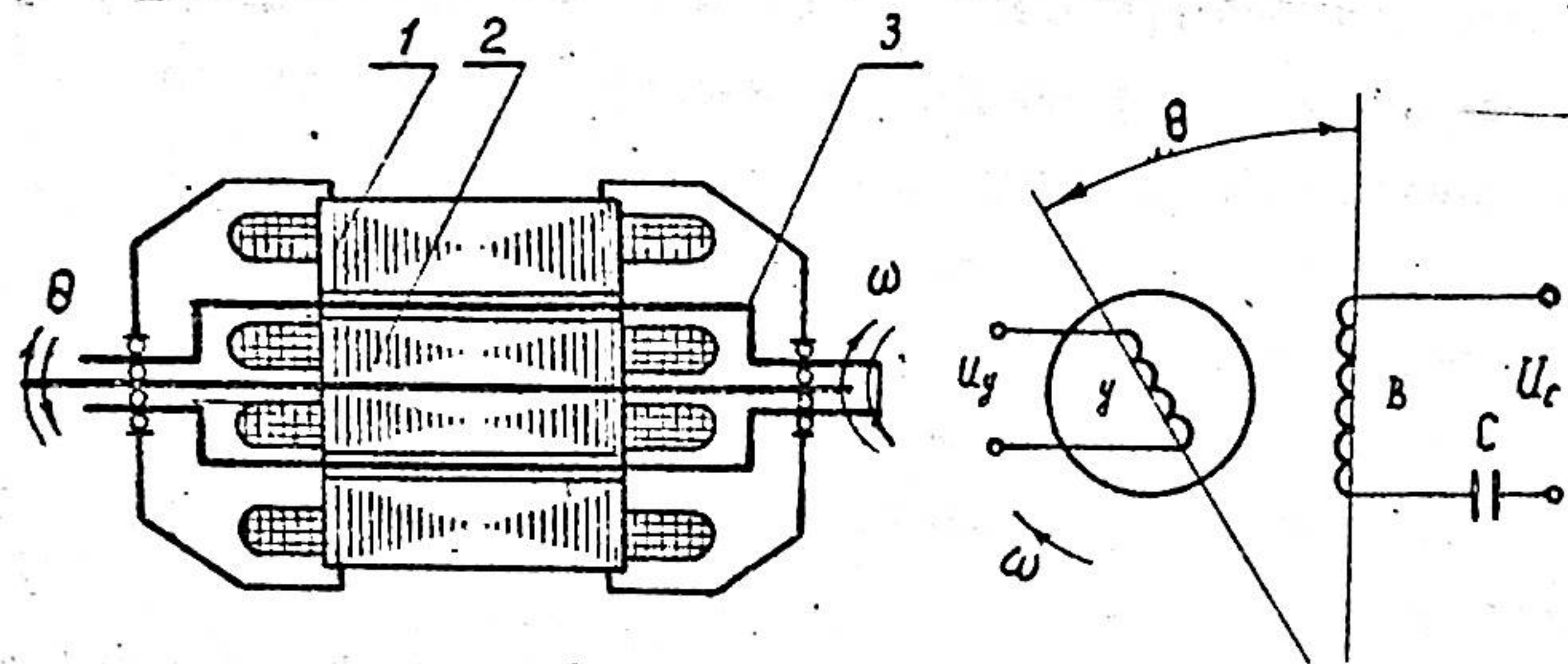


Рис. 1. Конструктивная и принципиальная схемы

ДУПС с однофазной системой обмоток

- 1 - наружный статор,
- 2 - внутренний статор,
- 3 - полый ротор.

в пространстве в зазоре машины имеет место пульсирующее поле и вращающий момент на полой роторе отсутствует. При введении пространственного сдвига между полями в зазоре создается вращающееся магнитное поле, в результате возникает электромагнитный момент, который приводит полый ротор во вращение.

Скорость вращения и величина момента зависят от угла пространственного сдвига.

При трехфазном выполнении систем обмоток ДУПС представляет собой дифференциальный совмещенный сельсин-двигатель /ДССД/, при однофазной и трехфазной системах обмоток он является совмещенным сельсин-двигателем /ССД/. В ДССД и

ССД полый ротор и внутренний статор связаны механической передачей.

Управление этими машинами осуществляется пространственным сдвигом результирующих магнитных полей систем обмоток, который создается в результате изменения токов в фазных обмотках, соединенных с электромеханическим преобразователем /сельсин-датчиком/. При однофазном выполнении систем обмоток /двухфазный ДУПС/ пространственный сдвиг вводится непосредственно поворотом одного из статоров /обычно внутреннего/.

Приведены критический анализ отечественных и зарубежных конструкций исполнительных двигателей с различными типами роторов и сравнение их по основным характеризующим показателям.

В результате определены конструктивные формы двигателей с пространственным управлением для ЭИУ - ДУПС с полым немагнитным ротором и полым ротором с ферромагнитными вставками, /комбинированный ротор/.

Установлен диапазон мощностей исполнительных двигателей для общепромышленных ЭИУ переменной скорости /0,25-400 вт/. В результате анализа схем ЭИУ с применением ДУПС определены основные требования: динамическая добротность $\frac{M_n}{J} = 5000 \text{ сек}^{-2}$, кратность регулирования скорости $K_p = 5+50$ (в зависимости от назначения ЭИУ), зона пропорционального изменения скорости не менее 30% от номинального сигнала управления θ_n , кратность пускового момента $K_n = \frac{M_n}{M_n} \geq 1,7$, нелинейность механических характеристик $10+25\%$, жесткость меха-

нических характеристик порядка $\pm 10-20\%$ при переменной нагрузке. ДУПС-ы должны обеспечить также возможность сравнительно простого осуществления обратных связей по скорости и по положению, настройки предельного момента и т.д.

Исходя из принципа работы ДУПС и их назначения показано, что двигатели с пространственным управлением, кроме показателей, свойственных обычным управляемым двигателям, должны характеризоваться также специфическими показателями: отношением потребляемой мощности при отсутствии сигнала ($\theta = 0$) к потребляемой мощности при пуске и максимальном сигнале управления $\frac{P_{\theta=0}}{P_{n\theta_{max}}}$, отношение пускового момента при θ_{max} к моменту на управляющем статоре $\frac{M_{n\theta_{max}}}{M_{bc}}$, изменение пускового момента к изменению сигнала $\frac{\Delta M_n}{\Delta \theta}$.

Показано, что благодаря возможности одновременного осуществления пространственного, амплитудного, фазового и амплитудно-фазового управлений, может быть обеспечена гибкость и универсальность применения ДУПС-ов.

Важной предпосылкой для улучшения динамических и статических показателей и повышения надежности ЭИУ в целом является возможность совмещения в одной машине функций окончательных усилителей и преобразующих, ограничительных элементов.

Приведены общие структурные схемы применения пространственного метода управления. Для выявления эффективного использования возможностей этого метода в ЭИУ общепромышленного назначения необходимо теоретическое и экспериментальное исследование особенностей ДУПС-ов, которое приводится в последующих главах.

Особое внимание уделено исследованию полных комбинационных роторов, поскольку этот вопрос недостаточно освещен в литературе даже для обычных типов двигателей и совершенно не рассмотрен для ДУПС-ов.

Во второй главе приведено теоретическое исследование ДУПС-ов. Для анализа рабочих и регулировочных свойств, режимов работы и определения возможности получения ДУПС-ов с заданными характеристиками получены уравнения токов в фазах, вращающих моментов на полом роторе, внутреннем и наружном статорах в зависимости от сигналов управления, параметров машины и скольжения ротора. Исследование проведено для двухфазных или приведенных к двум фазам ДУПС-ов на основе метода вращающихся в противоположные стороны полей при обычных для микромашин допущениях.

При наличии конденсатора в цепи возбуждения комплексы токов возбуждения и управления получены в виде:

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_c (A + jB)}{H + jQ}; & \dot{I}_Y &= \frac{\dot{U}_c (C + jD)}{H + jQ}; \\ A &= R'_Y - \alpha_e (R_1 + R_2) \cos \theta + \alpha_e (X_1 - X_2) \sin \theta \\ B &= X_Y - \alpha_e (R_1 - R_2) \sin \theta - \alpha_e (X_1 + X_2) \cos \theta \\ C &= \alpha_e (R_B + Z_e) - (R_1 + R_2) \cos \theta - (X_1 - X_2) \sin \theta \\ D &= \alpha_e (X_B - X_C) - (X_1 + X_2) \cos \theta + (R_1 - R_2) \sin \theta \\ H &= X_Y X_C + 4 (R_1 R_2 - X_1 X_2) \sin^2 \theta \\ Q &= R_Y X_C - 4 (R_1 R_2 + R_2 X_1) \sin^2 \theta \\ R_B &= Z_B + R_1 + R_2 & X_B &= X_B + X_1 + X_2 \\ R_Y &= Z'_Y + R_1 + R_2 & X_Y &= X'_Y + X_1 + X_2 \end{aligned}$$

где r_B, x_B - активное и индуктивное сопротивления обмотки возбуждения,
 r_y, x_y - активное и индуктивное сопротивление обмотки управления,
 R_1, x_1, R_2, x_2 - результирующие сопротивления намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для "прямого" и "обратного" полей.

$$R = \frac{\frac{r_p'}{s} x_m^2}{\left(\frac{r_p'}{s}\right)^2 + (x_m + x_p')^2}; \quad X_r = \frac{\left(\frac{r_p'}{s}\right)^2 x_m^2}{\left(\frac{r_p'}{s}\right)^2 + (x_m + x_p')^2};$$

Для R_2 и x_2 скольжение s заменяется на $s-2$.

Из рассмотрения зависимости токов J_B, J_y и временных сдвигов ψ_B и ψ_y от угла θ видно, что при пространственном сдвиге обмоток из-за э.д.с. взаимной индукции в фазах ДУПС-а, питание которых осуществляется по конденсаторной схеме, имеет место пространственно-амплитудно-фазовое управление.

В схемах, предусматривающих воздействие на ДУПС несколькими сигналами (θ, α, ψ) э.д.с. взаимной индукции нежелательна, поскольку ухудшает условия работы управляющих устройств. На основании анализа причин, вызывающих наведение э.д.с. в фазах и в роторе ДУПС-ов, сделано заключение о целесообразности конструкции с разделенными магнитопроводами для фаз (обмотки В и У), которая позволяет исключить составляющие э.д.с. взаимной индукции непосредственно между фазами.

Выражение вращающего момента на полном роторе получено в виде

$$M = C_1 \left[(J_B^2 + J_y^2) (R_1 - R_2) + 2 J_B J_y (R_1 - R_2) \cos \psi \cos \theta + 2 J_B J_y (R_1 + R_2) \sin \psi \sin \theta \right] \text{ кг.см}$$

Пусковой момент на полном роторе равен

$$M_n = 4 C J_B J_y R_n \sin \psi \sin \theta \text{ кг.см.}$$

где $R_n = R_1 = R_2$ при $s = 1$

Вращающие моменты на наружном и внутреннем статорах выражены в функции потребляемой мощности для каждого статора. Показано распределение момента на статорах и полном роторе в зависимости от сигнала θ и скольжения ротора. При определенных соотношениях параметров машины, временного и пространственного сдвигов момент на управляющем статоре можно свести к минимуму, что имеет существенное практическое значение, так как позволяет увеличить коэффициент усиления по моменту $K_m = \frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}}$.

Для анализа механических и регулировочных характеристик выведено уравнение, выражающее в явной форме зависимость вращающего момента на полном роторе от угла пространственного сдвига θ сигнала управления $\alpha_e = \frac{\psi_y}{\psi_c}$ и относительных параметров машины ε и β при $r_B = r_y = 0, x_B = x_y = 0,$

$$x_p = 0, r_m = 0, r_c = 0.$$

$$M = \frac{\alpha_e \beta \cdot U_c^2 \cdot 10^2}{9,81 \omega_1 x_m [\varepsilon^2 (\sin \theta - \beta)^2 + \beta^2]} \left\{ (1 - \nu^2) (1 - \alpha \cos \theta) \cdot \sin \theta - \left[\frac{\alpha_e \beta (1 + \varepsilon^2 + \nu^2)}{2\varepsilon} + \frac{\varepsilon (1 + \alpha^2) \cdot \sin^2 \theta - 2\varepsilon \sin^2 \theta \cos \theta}{2\alpha_e \beta} - \frac{\alpha_e (\beta + \varepsilon \sin^2 \theta)}{\varepsilon} \right] \nu \right\}$$

где $\varepsilon = \frac{r_e}{x_m}$; $\beta = \frac{x_e}{2x_m}$; $\nu = \frac{\omega_p}{\omega_1}$

Данное выражение позволяет при проектировании ДУПС-ов определить диапазон изменения основных параметров для получения заданных характеристик и условия целесообразного управления при практическом применении. В результате решения уравнения вращающего момента на вычислительной машине "РАЗДАН-2" при параметрах $0,5 \leq \varepsilon \leq 3$ и $0,5 \leq \beta \leq 1,5$ с шагом 0,5 и для сигналов управления $\frac{\pi}{8} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ с шагом $\frac{\pi}{8}$ $0,25 \leq \alpha \leq 1,5$ с шагом 0,25 сделана оценка влияния параметров ДУПС на скорость теоретического холостого хода ν_0 , механические и регулировочные характеристики при сочетании различных способов управления.

Скорость ν_0 пропорциональна сигналу управления при относительных параметрах ротора $\varepsilon \geq 1$. С увеличением сигнала управления α от 0,5 и относительного сопротивления β от 0,5 до 1, скорость ν_0 возрастает и зона пропорциональности между ν_0 и θ увеличивается. Нелинейность механических характеристик уменьшается с увеличением сопротивления ротора, но при уменьшении угла θ нелинейность возрастает. Наиболее благоприятные условия для получения сравнительно большой зоны пропорциональности для ν_0

и механических характеристик, имеющих допустимую нелинейность, при управлении сигналами θ или α можно создать выбором сопротивления ротора $\varepsilon = 1+2/$ и емкости в цепи возбуждения $\beta = 0,5-1/$. При больших относительных сопротивлениях ротора в зоне малых сигналов θ и при небольших сигналах α может происходить вращение ротора в обратном направлении.

Пусковой момент при различных входных углах θ увеличивается с уменьшением сопротивления ротора и увеличением сигнала α . С уменьшением сигнала α относительный пусковой момент $\frac{M_{пз}}{M_{пг}}$ увеличивается.

При управлении пространственным сдвигом θ , когда $\alpha = \text{const}$ выбор параметров позволяет обеспечить достаточную зону пропорциональности регулирования скорости, заданную нелинейность механических и регулировочных характеристик;

При одновременном управлении сигналами θ и α выбор условий для получения необходимых характеристик затрудняется. Выбор оптимальных параметров можно осуществить при ограничении диапазона изменения одного из сигналов управления $\alpha = 0,5-1,5$ или $\theta = \frac{\pi}{12} \div \frac{\pi}{2}$ /

В работе рассмотрены также условия, которые позволяют получить круговое поле на любом участке механической характеристики. Получены соотношения между сигналами θ и α , обеспечивающие круговое поле

$$\alpha_e = \frac{(x'_y + 2x_1) \sin \theta - r'_y \cos \theta}{(r'_y + r_c + R_1) - R_1 \cos 2\theta + x_1 \sin 2\theta}$$

и величина емкости в цепи возбуждения, которая обеспечивает необходимый временной сдвиг фаз при данном пространственном сдвиге обмоток. Для пускового режима получены

$$x_{en} = \frac{1}{\alpha_{en}} \left(x'_y + x'_y + 2R_n \right) \cos \theta + x_\beta - x_n (1 + \cos 2\theta) - R_n \sin 2\theta$$

$$\alpha_{en} = \frac{(x'_y + 2R_n) \sin \theta - x'_y \cos \theta}{(x_\beta + x_c + R_n) - R_n \cos 2\theta + x_{12} \sin 2\theta}$$

При любом угле θ круговое поле получается, если

$$\psi + \theta = \arccos \left(- \frac{J_\beta K_{w\beta} W_\beta}{J_y K_{wy} W_y} \right)$$

При $\varepsilon = \beta$ можно обеспечить круговое поле в режиме пуска при любом сигнале θ путем воздействия сигнала α , пропорционального входному углу θ .

Третья глава посвящена исследованию полых комбинированных роторов с целью определения условий для выбора геометрических соотношений в роторе, пригодных для инженерных расчетов.

Полый комбинированный ротор представляет собой цилиндрический стакан с прорезями вдоль образующих цилиндра, в которые вставлены полоски из ферромагнитного материала (рис. 2). Включение ферромагнитных полосок последовательно в магнитную цепь машины уменьшает сопротивление на пути магнитного потока, а следовательно и намагничивающий ток двигателя.

На основании сравнительного анализа комбинированного ротора показана его аналогия с короткозамкнутыми роторами с

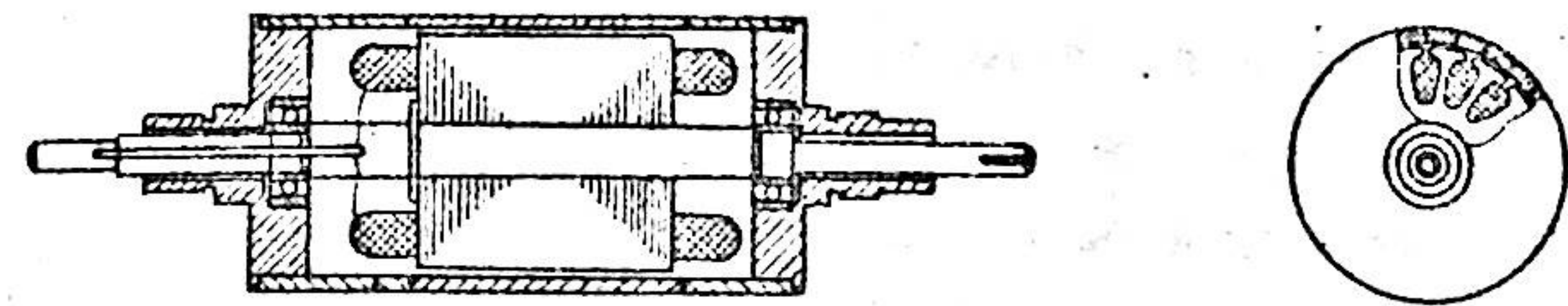


Рис. 2. Полый ротор с ферромагнитными вставками.

"беличьей клеткой" и особенности, из которых вытекает необходимость специального его исследования. Ток в полном комбинированном роторе можно принять распределенным по длине и толщине стакана как в обычных короткозамкнутых двигателях. Исходя из этого, при расчетах параметров комбинированного ротора можно использовать формулы для определения параметров короткозамкнутых роторов с беличьей клеткой. В машине с комбинированным ротором имеет место увеличение неравномерности магнитного поля в зазоре.

Установлено, что применение комбинированного ротора в ДУПС-ах требует более тщательного выбора соотношений числа пазов наружного, внутреннего статоров и числа ферромагнитных вставок. Появление синхронных моментов и радиальных сил при пуске увеличивает зону нечувствительности ДУПС-ов и создает дополнительный тормозной момент на входном валу. Выбор ферромагнитных вставок Z_p можно произвести исходя из известных условий для обычных микромашин с короткозамкнутым ротором

$$Z_p \leq 1,25 \left(K \frac{Z_{en}(\theta)}{p} + 1 \right); \quad Z_{en} \neq Z_{св}$$

где z_s — число пазов наружного (внутреннего) статора;
 k — коэффициент, равный ± 1 , ± 2 , ± 3 и т.д.
 p — число пар полюсов.

В конструкции с разделенными магнитопроводами выбор количества вставок и пазов статора облегчается и устраняются потери и тормозные моменты на входном валу, связанные с дополнительной неравномерностью поля в зазоре δ . С помощью наложения полей при гладком и зубчатом статорах и роторе получен общий коэффициент воздушного зазора K_δ , учитывающий изменение эквивалентного зазора в зависимости от ширины ферромагнитных вставок.

В результате исследований установлено, что уменьшение ширины ферромагнитных вставок, хотя и способствует уменьшению момента инерции ротора, но может привести к ухудшению свойств двигателя за счет увеличения эквивалентного воздушного зазора. Предложенная автором конструкция полого комбинированного ротора /авт.свид. №222519/ позволяет ограничить увеличение эквивалентного зазора при вариациях средней ширины вставок.

Влияние ферромагнитных вставок и относительной большой толщины полого ротора на момент инерции, пусковые и рабочие свойства двигателя при комбинированном роторе компенсируется уменьшением диаметра ротора и увеличением его длины. Вследствие этого возникает вопрос разработки конструкции полых роторов, допускающей значительное его удлинение. При совместном рассмотрении условий обеспечения заданного пускового момента в стопорном режиме и момента инерции ротора получена связь диаметра ротора D_p с другими геометрическими размерами статора.

При обеспечении монотонно-падающей механической характеристики и условия отсутствия самохода связь диаметра ротора с его толщиной Δp выражается следующим образом:

$$\Delta p = \frac{1,6 \cdot p^2}{\alpha \cdot p_a \cdot z_p} \cdot \frac{K_\delta \cdot \delta}{D_p \cdot \ell_0} \left(\frac{\ell_0}{t_p - b_p} + \frac{\delta t_p}{2 \ell_p \sin^2 \frac{\pi}{z_p}} \right) \text{ см}$$

где ℓ_0 — активная длина пакета статора,
 ℓ_p — длина ротора,
 t_p — зубцовое деление ротора.

Показано, что получение максимальной динамической добротности возможно при толщине стакана не более 5% от диаметра ротора. Эта величина совпадает с толщиной подобных роторов зарубежных малоинерционных двигателей.

Для получения малоинерционных ДУПС-ов рекомендуется выполнить двигатель с полым комбинированным ротором с отношением длины ротора к диаметру порядка 2+2,5. Полученные соотношения использованы при выполнении ДУПС-ов для экспериментальных исследований и могут служить основой при проектировании двигателей с подобными роторами.

Выводы теоретических исследований и расчетные формулы проверены экспериментальными исследованиями, результаты которых изложены в 4-ой главе.

Для выявления возможности применения пространственного способа управления в ДУПС-ах выполненных на основе обычных двигателей использованы двигатели типа АОЛ, а для верхних пределов требуемых мощностей — двигатель типа ДАЦ2-350/50.

Экспериментальное исследование ДУПС-ов проведено в сле-

двух схем пространственного управления:

1. ССД при работе от мощного преобразователя для анализа общих свойств ДУПС;

2. ССД при работе от сельсин-датчика для заключения о применении в практических схемах;

3. Двухфазный двигатель с полым немагнитным ротором при повороте внутреннего статора; для выявления возможностей ДУПС при одновременном воздействии сигналов θ и α .

На 9 макетах ДУПС-ов с полым немагнитным и комбинированным роторами сняты семейства механических и регулировочных характеристик при пространственном, амплитудном, амплитудно-фазовом управлениях.

Лучшими регулировочными свойствами при пространственном управлении обладают ДУПС-ы с двухфазной схемой питания. Схема двухфазного питания обеспечивает также пропорциональное регулирование в широком диапазоне одновременного изменения сигналов θ и α .

Цуем сопоставления экспериментальных данных с результатами проверочного расчета проверена правильность теоретических выводов относительно свойств ДУПС-ов и возможностей их применения в ЭМУ. Установлено, что расчетные формулы обеспечивают достаточную для инженерных расчетов точность.

Проверен закон изменения вращающего момента на внутреннем статоре. При вращении полого ротора момент на внутреннем статоре претерпевает резкие изменения и может быть знакопеременным. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе привода управляющего ДУПС-ом.

Анализ осциллограмм разгона показывает, что влияние скорости подачи управляющего сигнала θ на время разгона ДУПС-а будет незначительным, если время подачи номинального сигнала θ_n будет в пределах постоянной времени двигателя при обычном его использовании.

При разработке макетов ДУПС-ов с комбинированным ротором решен ряд вопросов конструктивного и технологического характера.

Экспериментальным исследованием 10 макетов полых комбинированных роторов проверено влияние количества вставок, отношения чисел пазов внутреннего и внешнего статоров, а также материала ротора на пусковые и рабочие свойства ДУПС-ов.

Вставки из стали ст. 3, ст. 5 увеличивают пусковой момент и полезную мощность на 20-30% по сравнению с ДУПСами в том же габарите с полым немагнитным ротором, но не позволяют уменьшить сколь-нибудь значительно вес ротора и увеличить динамическую добротность.

Исследование вариантов комбинированных роторов со вставками из кобальтовых сплавов с высокой индукцией накаливания показало, что требуется разработка специальной технологии изготовления подобных роторов и получения недеформируемых и легко обрабатываемых сплавов, оправдывающих их применение для общепромышленных устройств.

Для уменьшения потерь в ферромагнитных вставках и улучшения пусковых и рабочих свойств ДУПС-ов выполнен полый комбинированный ротор из вихревого железа с полувихревым пазом, который заливался немагнитным сплавом и образует комбинированный ротор.

ванный стакан. Стакан с двух концов опирается на крышки, свободно поворачивающиеся на подшипниках. Предложенная конструкция полых роторов позволяет выполнить ДУПС сравнительно с большим соотношением длины ротора к диаметру, что дает возможность увеличить коэффициент использования и динамическую добротность двигателя.

В результате исследования сделано заключение о реальной возможности обеспечения требований, предъявляемых к ДУПСам как к исполнительным двигателям общепромышленных ЭИУ переменной скорости. Выполнение их на базе серийно выпускаемых обычных двигателей может быть оправдано при отсутствии серийного выпуска полного ряда исполнительных двигателей переменной скорости.

Улучшение динамических и энергетических показателей требует специальной разработки ДУПСов. По результатам проведенных исследований даны некоторые рекомендации по разработке ДУПСов с полым немагнитным и полым комбинированным роторами.

Для исследования свойств ДУПСов в схемах ЭИУ и выявления требований, связанных с построением реальных схем в 5 главе проанализированы следующие схемы применения ДУПСов в ЭИУ:

1. ССД при работе в паре с соответствующим сельсин-датчиком;
2. ССД при работе от маломощного сельсин-датчика с усилительным устройством в цепи синхронизации;
3. ДУПС с непосредственным вводом сигнала управления;
4. ДУПС с маломощным управляющим приводом;
 - а) приводом на основе ССД;
 - б) приводом с шаговым двигателем;

в) приводом с управляемым двигателем.

Установлено, что ССД могут применяться в ЭИУ, предназначенных для работы в многообходных следящих системах с усилением момента. При этом от ССД требуется высокая крутизна пускового момента (кг. см./градус)

Для получения сравнительно меньших статических погрешностей могут применяться ССД с усилительным устройством в цепи синхронизации. Но при этом понижается статическая и динамическая добротность устройства.

Показано, что в системах автоматической стабилизации и регулирования могут быть успешно применены ЭИУ на основе ДУПСов. При этом для сохранения величины заданного сигнала при изменениях момента на внутреннем статоре необходимо предусмотреть самотормозящие элементы, обеспечивающие необратимость входного узла.

Для получения требуемой жесткости механических характеристик ЭИУ с ДУПС-ами предложена схема осуществления обратной связи по скорости /ОСС/ с помощью магнитного усилителя в цепи одной из обмоток (управляющей) ДУПС-а. (Авт.свид. №205101).

Показана возможность осуществления ОСС также путем сравнения скоростей управляющего привода и ДУПС-а с помощью механического дифференциала на входном валу ДУПС. При этом сигнал θ соответствует заданному, если скорости управляющего привода (пропорционального входному токовому сигналу) и ДУПС равны. Изменение момента нагрузки приводит к изменению скорости вращения ротора ДУПС, а следовательно изменению θ в направлении стабилизации этой скорости, обеспечивая этим высокую

жесткость механической характеристики ЭИУ.

Даны методы выбора ДУПСа и управляющего привода и оценки динамических свойств ЭИУ. На основе разработанных макетов ДУПС /СС-2, ДУПС-I/ выполнены и испытаны реальные схемы ЭИУ с исполнительными механизмами МЭМ 4/6,3-10, МЭП-10/6,3-10, МЭО-4/100.

При этом управление ДУПС-I осуществлялось различными управляющими приводами.

Путем сопоставления динамических и статических показателей указанных ЭИУ при пространственном управлении и при управлении от дроссельного привода показано, что ЭИУ с ДУПС обеспечивают меньшее время разгона /0,2+0,3 сек/ и могут удовлетворить требованиям общепромышленных быстродействующих систем управления; имеют более высокую надежность /время безотказной работы при одной и той же вероятности на 30+40% больше/. Общий вес ЭИУ с ДУПСами в 1,5 раза меньше, по сравнению с ЭИУ с дроссельным приводом, но вес исполнительного механизма получается несколько больше. Результаты исследований, проведенных в реферируемой работе использованы в разработках СКБ Автоматики г. Кировакана при рассмотрении ДУПСов в качестве модуля ЭИУ, построенных по блочно-модульному принципу. В работе рассмотрены также другие области применения ДУПСов в качестве электрического вала в двигателе постоянного тока с вынесенным коллектором, разработанном в Московском институте инженеров транспорта (МИИТ) при участии автора;

в сумматоре расхода руды в качестве интегратора конвейерных весов и в качестве вычислительного элемента в приборе определения длины электрода, разработанных автором в НИИ Авто-

матика г. Кировакана.

В результате реферируемой работы сделаны следующие выводы:

1. К характеристикам исполнительного двигателя с пространственным управлением предъявляются такие же требования, как и к обычным управляемым двигателям. Характеризующие показатели и характеристики, связанные с сигналами управления, нужно рассматривать относительно сигнала пространственного управления. Исходя из принципа управления ДУПСы характеризуются такими специфическими показателями как отношение потребляемой мощности при $\theta = 0$ к потребляемой мощности при пуске и максимальном сигнале управления, отношение пускового момента при максимальном сигнале к моменту на входном валу и т.д.

2. Двигатели с пространственным управлением допускают управление одновременно другими известными способами. Форма механических и регулировочных характеристик ДУПСов определяется не только параметрами двигателя, но и сигналами управления (в зависимости от схемы питания). Лучшими регулировочными свойствами обладают ДУПСы с двухфазной схемой питания. Выбор параметров позволяет обеспечить достаточную зону пропорциональности регулирования и заданную нелинейность механических и регулировочных характеристик при воздействии одновременно сигналами θ и α . При конденсаторной схеме питания выбор условий для получения необходимых характеристик при одновременном управлении сигналами θ и α затрудняется и возможно осуществить при ограничении диапазона изменения одного из сигналов управления.

3. Пространственное управление создает условия для получения кругового поля на любом участке механических характеристик. При определенных соотношениях параметров машины и емкости в цепи возбуждения круговое поле при пуске можно получить при любом пространственном сдвиге, если обеспечить в схеме ЭИУ изменение напряжения на управляющей обмотке, пропорциональное входному углу θ . Это дает более широкие возможности совместного рассмотрения схемы управления и исполнительного двигателя при разработке ЭИУ.

4. При изменении сопротивления ротора и фазосдвигающей емкости изменяется крутизна зависимости пускового момента от входного угла.

5. Момент на управляющем статоре зависит как от угла поворота θ , так от скольжения ротора. Значительные изменения входного момента от скольжения требуют необратимое сочленение управляющего привода. Для применения ДУПСов в ЭИУ, работающих в схемах стабилизации и регулирования, входной момент должен быть минимальным. Его можно свести к минимуму при определенных соотношениях параметров машины и емкости в цепи управления.

6. Полученные в работе расчетные формулы и оценка влияния параметров машины и сигналов управления на механические и регулировочные характеристики подтверждены экспериментальным исследованием. Они могут быть использованы для инженерных расчетов и могут служить основой при проектировании ДУПСов.

7. Требования, предъявляемые к двигателям при пространственном управлении достаточно полно обеспечиваются в конст-

рукциях с наружным и внутренним статорами с полым немагнитным и полым комбинированным роторами.

Комбинированный ротор позволяет увеличить выходную мощность на 20+30% и обеспечить требуемую динамическую добротность двигателя. Толщина полого комбинированного ротора должна быть не более 5% от его диаметра. Соотношение чисел ферромагнитных вставок комбинированного ротора и зубцов наружного и внутреннего статоров влияет на чувствительность ДУПСов, поэтому требуется более тщательный выбор количества вставок.

8. При использовании ДУПСов в ЭИУ необходимо предусмотреть элементы или узлы для сочленения двигателя с управляющим устройством и для осуществления обратных связей по положению и по скорости.

9. Требуемая жесткость механических характеристик ЭИУ может быть обеспечена либо воздействием в цепи управления ДУПСа сигналом обратной связи по скорости, либо с помощью механического дифференциала путем сравнения скоростей управляющего привода и ДУПСа.

10. ССД должны работать в паре с сельсин-датчиком и могут применяться в ЭИУ, предназначенных для работы в многообходных следящих системах с усилением момента. Управление двухфазными ДУПСами может быть осуществлено с помощью маломощных приводов. Управляющая схема не вносит значительных запаздываний в устройство. Влияние скорости подачи входного сигнала на время разгона двигателя может быть незначительным, если время подачи максимального сигнала находится в пределах по-

стоянной времени ДУПСа при использовании его как обычный исполнительный двигатель ($\theta = \frac{\pi}{2}$).

ДУПСы переменной скорости мощностей до 400 лт можно управлять маломощным приводом до 10 лт. При этом время подачи входного сигнала не превосходит 0,15 сек. При использовании управляющего привода с шаговым двигателем может быть обеспечена работа общепромышленных ЭИУ переменной скорости в дискретных системах автоматики без дополнительных цифро-аналоговых преобразователей.

II. ЭИУ переменной скорости, построенные на основе двигателей с пространственным управлением, согласно сделанному анализу реальных схем могут обеспечить сравнительно высокие статические и динамические показатели, просты и надежны в эксплуатации.

Проведенные исследования позволяют сделать заключение о целесообразности применения в ЭИУ исполнительных двигателей с пространственным управлением и необходимости разработки ДУПСов как модуля ЭИУ переменной скорости, предназначенных для общепромышленных быстродействующих систем автоматической стабилизации и регулирования.

Вопросы, рассмотренные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на Всесоюзном совещании "О развитии ИУ общепромышленного назначения" /г. Кировакан, 1960 г./, на второй конференции по применению информационной и управляющей вычислительной техники в комплексной автоматизации нефтяной, нефте-технической и химической промышленности /г. Сумгаит, 1967 г./, на Всесоюзном совещании "О развитии исполнитель-

ных механизмов" /г. Кировакан, 1967 г./,

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. ТАТЕВОСЯН М.М., МИКАЭЛЯН Н.А., Основные уравнения и характеристики двигателей, управляемых пространственным сдвигом магнитных полей". Труды института НИИАвтоматики г. Кировакан, выпуск 39, 1969 г.
2. ТАТЕВОСЯН М.М., Двигатели, управляемые пространственным сдвигом магнитных полей, в схемах исполнительных устройств" Труды института НИИАвтоматика, г. Кировакан (принята к печати).
3. ТАТЕВОСЯН М.М., Исполнительные двигатели, регулируемые поворотом оси управляющего потока, и их применение. Труды II конференции по применению информационной и управляемой вычислительной техники НИПИ "Нефтехимавтомат" г. Сумгаит (принята к печати).

По теме диссертации получены авторские свидетельства на следующие изобретения:

1. Устройство для передачи угла, авт.свид. №205101. Бюллетень изобретений, 1968, №23 (в соавторстве со Свечарником Д.В., Седрабяном М.Г., Микаэлян Н.А.).
2. Сельсин-двигатель, авт.свид. №222519 Бюллетень изобретений, 1968, №23 (в соавторстве с Микаэлян Н.А.)