

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ТОДАРЕВ Валентин Васильевич

УДК62-82/.-83:621.313.333 (043.3)

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОГИДРОПРИВОДА**

Специальность 05.09.03 — Электрические комплексы и системы,
включая их управление и регулирование

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Гомельском политехническом институте.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
В. И. Луковников.

Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор **Ю. З. Ковалев,**
кандидат технических наук, доцент
В. П. Беляев.

Ведущее предприятие — Гомельское ПО «Гидроавтоматика».

Защита диссертации состоится «...» 1990 г.
в часов на заседании специализированного совета
К056.02.02 по присуждению ученой степени кандидата технических
наук в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политех-
ническом институте по адресу: 220027, г. Минск, Ленинский про-
спект, 65, уч. корпус № 2, ауд. 201.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим на-
правлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря со-
вета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-
го политехнического института.

Автореферат разослан «...» 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук, доцент

А. Н. Герасимович

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Перспективным направлением совершенство-
вания механизмов и машин является использование электроприводов
специального (шагового, колебательного и т.п.) движения, выпол-
ненных на базе общепромышленных, серийно выпускаемых электро-
двигателей.

Ликвидация или упрощение сложного механического редуктора,
преобразующего вращение вала электродвигателя в специальное пе-
ремещение рабочего органа или инструмента, позволит модернизи-
ровать существующие механизмы и машины, либо создать принципи-
ально новые с лучшими энергетическими и массо-габаритными пока-
зателями. Такая задача наиболее остро стоит перед создателями
мобильных автономных вибрационных электрогидропреобразователей,
нашедших в настоящее время широкое применение — от испытаний
элементов конструкций до сейсмического зондирования земных недр.

Эффективность новых механизмов и машин в значительной сте-
пени обусловлена научно обоснованным правильным выбором мощно-
сти электродвигателей и пускорегулирующей аппаратуры к ним, что
невозможно без глубокого анализа процессов энергообмена в спе-
циальных электроприводах.

Существующая теория энергообмена в колебательных электро-
приводах недостаточно полно и глубоко раскрывает энергетические
процессы, протекающие в элементах электропривода. Отсутствуют
достаточно четкие рекомендации по выбору в конкретном случае
способа создания колебательного движения вала электродвигателя,
его типа и мощности. Недостаточно полно сформулированы критерии
оценки энергетической эффективности работы электродвигателя в
составе колебательного электропривода. Не определены направле-
ния разработки электродвигателей колебательного движения с вы-
сокими энергетическими характеристиками.

Актуальность этой задачи подтверждается резолюциями и ре-
шениями всесоюзных и региональных научно-технических конференций
семинаров, и совещаний по проблемам современного электроприво-
да. Так, на конференциях в городах Свердловске (1986), Томске
(1986), Комсомольске-на-Амуре (1986), Новосибирске (1987), Смо-
ленске (1987), Ленинграде (1987), Москве (1989) указывалось на
необходимость проведения работ по углублению теории энергооб-
мена в электроприводах. В рекомендациях Всесоюзной научно-тех-

нической конференции по проблемам автоматизированного электропривода (Воронеж, 1987) предложено разработать единую общесоюзную программу повышения технического уровня электроприводов, их надежности и экономической эффективности, обратив особое внимание на "повышение энергетических характеристик, экономию электроэнергии, снижение загрузки сетей реактивной мощности и мощностью искажений". На 5-й Всесоюзной научно-технической конференции "Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов" (г. Каунас, 1988г.) одной из основных обсуждаемых проблем была проблема создания электродвигателей для динамических, в том числе специальных режимах работы.

Вопросы энергетики колебательного электропривода, применительно к вибрационному электрогидропреобразователю, рассматриваются в настоящей работе, выполнявшейся на кафедре "Теоретические основы электротехники" Гомельского политехнического института в рамках научно-технической программы "ОПТИМУМ", организованной согласно приказу Министерства высшего и среднего специального образования СССР за № 339 от 17 апреля 1980г.

ЦЕЛЮ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ является разработка теоретической базы для анализа процессов энергообмена в асинхронных электродвигателях колебательного движения и получение на ее основе научно обоснованных рекомендаций по анализу, синтезу, созданию и практическому применению высокоэнергетических колебательных электроприводов в составе электрогидропреобразователей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При выполнении работы использовались аналитические и численные (с использованием ЭВМ) методы теории дифференциальных уравнений, а также экспериментальная проверка достоверности полученных результатов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ заключается в следующем:

- разработана новая математическая модель асинхронного электродвигателя колебательного режима работы, учитывающая как несимметрию электродвигателя и источника питания, так и несимметричность параметров схемы замещения;

- расширена система критериальных оценок эффективности процессов энергообмена в электромеханических преобразователях в режиме вынужденных колебаний;

- впервые проанализирован процесс энергообмена в асинхронном электродвигателе кругового колебательного движения различной степени эллиптичности поля в составе электрогидропривода;

- предложены новые способы возбуждения колебательного режима работы асинхронного электродвигателя с улучшенными энергетическими показателями;

- предложены новые варианты конструкций асинхронного электродвигателей, обладающих повышенными энергетическими показателями в колебательном режиме.

Перечисленные результаты исследований выносятся на защиту.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ состоит в том, что полученные результаты позволяют улучшить энергетические характеристики асинхронного электродвигателя колебательного движения, работающего в составе электрогидропривода за счет:

- выбора оптимальных соотношений параметров нагрузки и электродвигателя;

- использования наиболее эффективного для заданного режима эксплуатации способа возбуждения колебательного движения в соответствии с оптимальными параметрами электродвигателя;

- применения эффективных по энергетике способов управления колебательным электроприводом;

- использования новых вариантов конструкций асинхронных электродвигателей, обладающих улучшенными энергетическими показателями в колебательном режиме.

РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. По результатам работы разработан электромеханический преобразователь для электрогидравлических вибросистем ИПО "Сейсмостехника" г. Гомеля, что подтверждено соответствующим актом.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные материалы докладывались и получили одобрение на:

- всесоюзном семинаре "Электромеханические системы с постоянными магнитами" (г. Златоуст, 1985);

- краевой научно-технической конференции "Автоматизированный электропривод и оптимизация режимов электропотребления" (г. Красноярск, 1985);

- научно-технических конференциях Гомельского политехнического института (1986, 1988);

- республиканской межотраслевой научно-практической конференции "Проблемы прогресса в области автоматизации и механи-

зации производственных процессов" (г.Уфа, 1986);
 - всесоюзной научно-технической конференции "Динамические режимы работы электрических машин" (г.Каунас, 1988);
 - всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы электромеханики" (г.Москва, 1989).

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам выполненных исследований в научно-технических изданиях опубликовано 8 печатных работ, получено 3 авторских свидетельства и 5 положительных решений по заявкам на изобретения.

СТРУКТУРА РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Содержит: страниц - 172, из них основного машинописного текста страниц - 142, таблиц - 3, рисунков - 58, 30 страниц приложений и библиографический список на 7 страницах, состоящий из 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении отражена актуальность темы, цель и научная новизна решаемой задачи, дана краткая аннотация работы.

В первой главе обосновывается целесообразность использования в качестве электромеханических преобразователей (ЭМП) мобильных и автономных электрогидровибраторов асинхронных электродвигателей колебательного движения.

Отмечено, что с ростом мощности современных гидроагрегатов в них увеличивается число каскадов усиления, а это в мобильном и автономном варианте исполнения, связанном с работой в полевых условиях, создает сложности в эксплуатации, ремонте и наладке. Улучшение эксплуатационных характеристик в этом случае может осуществляться путем упрощения конструкции электрогидропреобразователя за счет усиления гидроагрегата, что в свою очередь, возможно при использовании более мощных ЭМП.

Сопоставление технических требований к электромеханическим преобразователям и характеристик колебательных асинхронных электроприводов позволило сделать вывод о возможности использования последних в электроприводе золотника вибрационного гидроагрегата.

В главе приводится принципиальная схема пульсаторного электрогидравлического вибратора с асинхронным электродвигателем колебательного движения в составе ЭМП. Использование в составе ЭМП асинхронных электродвигателей колебательного движения в насто-

ящее время затруднено не только из-за отсутствия научно-обоснованных рекомендаций по выбору типа и мощности серийных или синтезу новых электродвигателей, ориентированных на применение в электрогидравлических вибраторах, но также из-за повышенных требований к их энергетическим и регулировочным характеристикам.

Решению этих задач и посвящаются остальные главы диссертационной работы.

Во второй главе изложены теоретические основы анализа энергетики асинхронных колебательных электроприводов. При анализе особенностей протекания энергетических процессов в двигателях, работающих в колебательном режиме выяснено, что энергообмен между двигателем и источником электроэнергии по фазам происходит различно в количественном и качественном отношении. В механической мощности можно выделить активную $P_{\text{мех.а}}$, реактивную $P_{\text{мех.р}}$ составляющие и мощность искажения $P_{\text{мех.и}}$.

При этом

$$P_{\text{мех}} = [P_{\text{мех.а}}^2 + P_{\text{мех.р}}^2 + P_{\text{мех.и}}^2]^{\frac{1}{2}}$$

В зависимости от характера нагрузки и целевой задачи привода любая из составляющих механической мощности участвует в совершении полезной работы. Наличие активной составляющей механической мощности не позволяет использовать традиционные энергетические показатели при оценке энергетики колебательного электропривода. Поэтому предлагается для дальнейшего использования новый энергетический показатель - обобщенный коэффициент полезного действия.

$$h_E = \frac{P_{\text{мех}}}{S_{\text{потр}}} = \left[\frac{P_{\text{мех.а}}^2}{S_{\text{потр}}^2} + \frac{P_{\text{мех.р}}^2}{S_{\text{потр}}^2} + \frac{P_{\text{мех.и}}^2}{S_{\text{потр}}^2} \right]^{\frac{1}{2}} = [h_{\text{а}}^2 + h_{\text{р}}^2 + h_{\text{и}}^2]^{\frac{1}{2}} = [h_{\text{а}}^2 \cdot K_{\text{ма}}^2 + h_{\text{р}}^2 \cdot K_{\text{мр}}^2 + h_{\text{и}}^2 \cdot K_{\text{ми}}^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (I)$$

где: $h_{\text{а}} = \frac{P_{\text{мех.а}}}{P_{\text{потр}}}$, $h_{\text{р}} = \frac{P_{\text{мех.р}}}{Q_{\text{потр}}}$, $h_{\text{и}} = \frac{P_{\text{мех.и}}}{T_{\text{потр}}}$

- $K_{\text{а}}$, $K_{\text{р}}$, $K_{\text{и}}$ по активной, реактивной составляющим и мощности искажения;

$K_{\text{ма}} = \frac{P_{\text{потр}}}{S_{\text{потр}}}$, $K_{\text{мр}} = \frac{Q_{\text{потр}}}{S_{\text{потр}}}$, $K_{\text{ми}} = \frac{T_{\text{потр}}}{S_{\text{потр}}}$ - коэффициент мощности по выше указанным составляющим полной мощности;

$$\zeta_{AE} = \frac{P_{мех.а}}{S_{потр}}, \zeta_{PE} = \frac{P_{мех.р}}{S_{потр}}, \zeta_{UE} = \frac{P_{мех.и}}{S_{потр}} \quad - \text{энергетический КПД по составляющим механической мощности};$$

$P_{потр}, Q_{потр}, T_{потр}, S_{потр}$ - потребляемые из источника электроэнергии активная, реактивная, искажения и полная мощность.

Обобщенный коэффициент полезного действия ζ_{AE} является комплексным критерием преобразования электроэнергии и позволяет оценить энергетику электродвигателя колебательного движения при любой по характеру и величине нагрузке и при различных способах возбуждения колебательного движения. Наряду с обобщенным коэффициентом полезного действия дополнительно используются известные качественные и количественные энергетические показатели, как альтернативные предложенному.

Исследование характеристик асинхронного электродвигателя колебательного движения электропривода золотника электрогидропреобразователя осуществлялось посредством математического моделирования различных физических процессов с последующей экспериментальной проверкой адекватности математической модели. Разработка математической модели производилась с учетом следующих особенностей работы асинхронных электродвигателей в колебательном режиме:

1. Большинство способов возбуждения колебательного режима разработаны с использованием двухфазных асинхронных электродвигателей, или трехфазных, переключенных в двухфазный режим.
 2. Фазные напряжения электродвигателей модулированы в общем случае периодическим сигналом с частотой Ω по амплитуде или частоте, или монотонным сигналом с угловой скоростью Ω по фазе.
 3. Двигатели с массивным или двухслойным ротором, обладающие улучшенными характеристиками в динамических режимах и, следовательно, перспективные для использования в режиме колебательного движения имеют нестационарные электромагнитные параметры, изменяющиеся наиболее существенно в функции скольжения. Это справедливо, хотя и в меньшей мере, и для двигателей с короткозамкнутым полем, ферромагнитным и другими типами роторов.
 4. Периодический характер движения ротора обуславливает периодичность изменения коэффициентов дифференциальных уравнений с комбинационными частотами сети и модуляции.
- Таким образом, в данном случае речь идет о моделировании двухфазного асинхронного электродвигателя с электрической несим-

метрией статора, несимметрией и несинусоидальностью фазных напряжений и переменными, зависящими от скольжения параметрами.

В настоящей работе предлагается новая, компактная математическая модель, основанная на использовании предложенного Фортеским К.Л. метода симметричных составляющих и разработанного проф. Луковниковым В.И. обобщенного комплексного преобразования.

В координатных осях " α ", " β " при известных допущениях, эта математическая модель обобщенного электрически несимметричного двухфазного асинхронного двигателя, записанная через симметричные составляющие мгновенных значений потокоцеплений в виде дифференциальных уравнений в форме Коши, выглядит следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{\alpha s1}}{dt} &= U_{\alpha s1} + A_1(S_1) \cdot \psi_{\alpha s1} + A_2(S_2) \cdot \psi_{\alpha s2} + A_3(S_1) \cdot \psi_{dr1} + A_4(S_2) \cdot \psi_{dr2} \\ \frac{d\psi_{\beta s1}}{dt} &= U_{\beta s1} + A_1(S_1) \cdot \psi_{\beta s1} - A_2(S_2) \cdot \psi_{\beta s2} + A_3(S_1) \cdot \psi_{qr1} - A_4(S_2) \cdot \psi_{qr2} \\ \frac{d\psi_{dr1}}{dt} &= A_5(S_1) \cdot \psi_{\alpha s1} + A_6(S_2) \cdot \psi_{\alpha s2} + A_7(S_1) \cdot \psi_{dr1} + A_8(S_2) \cdot \psi_{dr2} - \omega_R \cdot P \cdot \psi_{qr1} \\ \frac{d\psi_{qr1}}{dt} &= A_5(S_1) \cdot \psi_{\beta s1} - A_6(S_2) \cdot \psi_{\beta s2} + A_7(S_1) \cdot \psi_{qr1} - A_8(S_2) \cdot \psi_{qr2} + \omega_R \cdot P \cdot \psi_{dr1} \\ \frac{d\psi_{\alpha s2}}{dt} &= U_{\alpha s2} + A_2(S_1) \cdot \psi_{\alpha s1} + A_1(S_2) \cdot \psi_{\alpha s2} + A_4(S_1) \cdot \psi_{dr1} + A_3(S_2) \cdot \psi_{dr2} \\ \frac{d\psi_{\beta s2}}{dt} &= U_{\beta s2} - A_2(S_1) \cdot \psi_{\beta s1} + A_1(S_2) \cdot \psi_{\beta s2} - A_4(S_1) \cdot \psi_{qr1} + A_3(S_2) \cdot \psi_{qr2} \\ \frac{d\psi_{dr2}}{dt} &= A_6(S_1) \cdot \psi_{\alpha s1} + A_5(S_2) \cdot \psi_{\alpha s2} + A_8(S_1) \cdot \psi_{dr1} + A_7(S_2) \cdot \psi_{dr2} - \omega_R \cdot P \cdot \psi_{qr2} \\ \frac{d\psi_{qr2}}{dt} &= -A_6(S_1) \cdot \psi_{\beta s1} + A_5(S_2) \cdot \psi_{\beta s2} - A_8(S_1) \cdot \psi_{qr1} + A_7(S_2) \cdot \psi_{qr2} + \omega_R \cdot P \cdot \psi_{dr2} \\ \frac{d\omega_R}{dt} &= \frac{P}{J} \left\{ (\psi_{\alpha s1} + \psi_{\alpha s2}) [K_{21}(S_1) \cdot \psi_{\beta s1} + K_{22}(S_1) \cdot \psi_{qr1} + K_{21}(S_2) \cdot \psi_{\beta s2} + K_{22}(S_2) \cdot \psi_{qr2}] - (\psi_{\beta s1} + \psi_{\beta s2}) [K_{11}(S_1) \cdot \psi_{\alpha s1} + K_{12}(S_1) \cdot \psi_{dr1} + K_{11}(S_2) \cdot \psi_{\alpha s2} + K_{12}(S_2) \cdot \psi_{dr2}] - P_{ж1} \cdot \omega_R - C \cdot \varphi_R \right\} \\ \frac{d\varphi_R}{dt} &= \omega_R \end{aligned} \right\} (2)$$

$$K_{11}(S_{1,2}) = \frac{L_{dr}(S_{1,2})}{L_{dr}(S_{1,2}) \cdot L_{\alpha s}(S_{1,2}) - M_{\alpha d}^2(S_{1,2})}; \quad K_{12}(S_{1,2}) = \frac{M_{\alpha d}(S_{1,2})}{L_{dr}(S_{1,2}) \cdot L_{\alpha s}(S_{1,2}) - M_{\alpha d}^2(S_{1,2})};$$

$$K_{21}(S_{1,2}) = \frac{L_{qr}(S_{1,2})}{L_{qr}(S_{1,2}) \cdot L_{\beta s}(S_{1,2}) - M_{\beta q}^2(S_{1,2})}; \quad K_{22}(S_{1,2}) = \frac{M_{\beta q}(S_{1,2})}{L_{qr}(S_{1,2}) \cdot L_{\beta s}(S_{1,2}) - M_{\beta q}^2(S_{1,2})};$$

$$K_{31}(S_{1,2}) = \frac{L_{\alpha s}(S_{1,2})}{L_{dr}(S_{1,2}) \cdot L_{\alpha s}(S_{1,2}) - M_{\alpha d}^2(S_{1,2})}; \quad K_{41}(S_{1,2}) = \frac{L_{\beta s}(S_{1,2})}{L_{qr}(S_{1,2}) \cdot L_{\beta s}(S_{1,2}) - M_{\beta q}^2(S_{1,2})};$$

$$A_1(S_{1,2}) = -0,5 [R_{\alpha s} \cdot K_{11}(S_{1,2}) + R_{\beta s} \cdot K_{21}(S_{1,2})]; \quad A_5(S_{1,2}) = -0,5 [R_{dr}(S_{1,2}) \cdot K_{21}(S_{1,2}) + R_{qr}(S_{1,2}) \cdot K_{22}(S_{1,2})];$$

$$A_2(S_{1,2}) = -0,5 [R_{\alpha s} \cdot K_{11}(S_{1,2}) - R_{\beta s} \cdot K_{21}(S_{1,2})]; \quad A_6(S_{1,2}) = -0,5 [R_{dr}(S_{1,2}) \cdot K_{21}(S_{1,2}) - R_{qr}(S_{1,2}) \cdot K_{22}(S_{1,2})];$$

$$A_3(S_{1,2}) = -0,5 [R_{\alpha s} \cdot K_{12}(S_{1,2}) + R_{\beta s} \cdot K_{22}(S_{1,2})]; \quad A_7(S_{1,2}) = -0,5 [R_{dr}(S_{1,2}) \cdot K_{11}(S_{1,2}) + R_{qr}(S_{1,2}) \cdot K_{12}(S_{1,2})];$$

$$A_4(S_{1,2}) = -0,5 [R_{\alpha s} \cdot K_{12}(S_{1,2}) - R_{\beta s} \cdot K_{22}(S_{1,2})]; \quad A_8(S_{1,2}) = -0,5 [R_{dr}(S_{1,2}) \cdot K_{11}(S_{1,2}) - R_{qr}(S_{1,2}) \cdot K_{12}(S_{1,2})];$$

$U_{\alpha s 1,2}; U_{\beta s 1,2}$ - фазные напряжения прямой (1) и обратной (2) последовательностей. В общем случае

$$U_{\alpha s 1,2} = U_m \cdot \gamma_{1,2}(t) \cdot \sin[\omega t + \varphi_{1,2}(t)];$$

$$U_{\beta s 1,2} = U_m \cdot \gamma_{1,2}(t) \cdot \cos[\omega t + \varphi_{1,2}(t)];$$

$$\gamma_{1,2}^2(t) = 0,5 [1 \pm 2\gamma(t) \cdot \cos \varphi(t) + \gamma^2(t)]^{\pm};$$

$$\varphi_{1,2}^2(t) = \arctg \{ \gamma(t) \cdot \sin \varphi(t) [\gamma(t) \cos \varphi(t) \pm 1]^{-1} \};$$

здесь $\gamma(t)$ - модуляция амплитуды питающих напряжений;
 $\varphi(t)$ - линейный фазовый сдвиг питающих напряжений.

$R_{\alpha s}, R_{\beta s}, R_{dr}(S_{1,2}), R_{qr}(S_{1,2}), L_{\alpha s}(S_{1,2}), L_{\beta s}(S_{1,2}), L_{dr}(S_{1,2}), L_{qr}(S_{1,2}), M_{\alpha d}(S_{1,2}), M_{\beta q}(S_{1,2})$ - активные сопротивления, полные индуктивности фазных обмоток статора и ротора, взаимные индуктивности по осям " α " , " β " .

Фазные токи определялись из выражений для потокоцеплений обмоток двигателя:

$$L_{\alpha s} = K_{11}(S_1) \cdot \psi_{\alpha s 1} - K_{12}(S_1) \cdot \psi_{dr 1} + K_{11}(S_2) \cdot \psi_{\alpha s 2} - K_{12}(S_2) \cdot \psi_{dr 2};$$

$$L_{\beta s} = K_{21}(S_1) \cdot \psi_{\beta s 1} - K_{22}(S_1) \cdot \psi_{qr 1} + K_{21}(S_2) \cdot \psi_{\beta s 2} - K_{22}(S_2) \cdot \psi_{qr 2};$$

$$L_{dr} = K_{31}(S_1) \cdot \psi_{dr 1} - K_{12}(S_1) \cdot \psi_{\alpha s 1} + K_{31}(S_2) \cdot \psi_{dr 2} - K_{12}(S_2) \cdot \psi_{\alpha s 2};$$

$$L_{qr} = K_{41}(S_1) \cdot \psi_{qr 1} - K_{22}(S_1) \cdot \psi_{\beta s 1} + K_{41}(S_2) \cdot \psi_{qr 2} - K_{22}(S_2) \cdot \psi_{\beta s 2};$$

$S_1 = 1 - \omega_R |\omega_c|^{-1}$ - скольжение прямой последовательности;
 $S_2 = 2 - \omega_R |\omega_c|^{-1}$ - скольжение обратной последовательности;
 $|\omega_c|$ - модуль синхронной скорости.

Выражения (2) представляют собой систему нелинейных уравнений с периодическими коэффициентами. Аналитическое решение данной системы затруднено, использование различных допущений дает даже в простых случаях громоздкие выражения и результаты с невысокой точностью. Поэтому использовано численное решение с применением стандартной подпрограммы численного интегрирования по методу Рунге-Кутты 4-го порядка.

С этой целью разработана программа расчета, реализованная на алгоритмическом языке "ФОРТРАН". Определялись мгновенные, средние за период питающих напряжений и средние за период колебания энергетические показатели. В частности, мгновенная механическая мощность определялись как

$$P_{мех} = M_{эм}(t) \cdot \omega_R(t).$$

Полная механическая мощность

$$P_{мех} = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_0^T M_{эм}^2(t) dt \cdot \int_0^T \omega_R^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}; \quad T = 2\pi\Omega;$$

Ω - угловая частота колебательного движения.

Активная составляющая T механической мощности

$$P_{мех.а} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T M_{эм}(t) \cdot \omega_R(t) dt.$$

Реактивная составляющая механической мощности

$$P_{мех.р} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T M_{эм}(t) \cdot d\omega_R(t).$$

Механическая мощность искажения

$$P_{\text{мех.и}} = [P_{\text{мех}}^2 - P_{\text{мех.а}}^2 - P_{\text{мех.р}}^2]^{\frac{1}{2}}$$

Потребляемые мощности, а также мощности потерь определялись по общепринятым соотношениям. Количественный критерий электромеханического преобразования энергии в виде обобщенного К.П.Д. определялся в соответствии с выражением (1), качественным критерием был выбран коэффициент мощности

$$K_M = \frac{P_{\text{полт}}}{S_{\text{полт}}} = K_c \cdot K_u \cdot K_n,$$

где: K_c, K_u, K_n - соответственно коэффициенты сдвига, искажения и несимметрии определяемые по общепринятой методике.

В третьей главе представлены результаты исследования на математической модели колебательного движения электродвигателя 4А71А6УЗ в составе электропривода золотника электрогидропреобразователя. Рассматривался колебательный режим со смешанной нагрузкой - жидкое трение, инерционная (с суммарным моментом инерции ротора, редуктора и золотника) и позиционная, определяемая из условия механического резонанса. Колебательное движение вала создавалось разнородностью способа линейной фазовой модуляции - разночастотным питанием обмоток статора согласно выражений

$$U_A = U_m \cdot \sin \omega_1 t;$$

$$U_B = U_m \cdot \sin \omega_2 t.$$

Частота колебаний вала в этом случае

$$f_k = (2 \cdot k) \cdot |\omega_1 - \omega_2|.$$

Анализ полученных временных диаграмм скоростей электромагнитного поля, ротора, электромагнитного момента и механической мощности позволил выявить следующие факторы снижающие энергетические показатели двигателя колебательного движения и определить пути их устранения.

Качающееся электромагнитное поле в воздушном зазоре электродвигателя изменяется от пульсирующего в момент времени

$$t = \pi \cdot |\omega_1 - \omega_2| \cdot k, \quad \text{где } k = 0, 1, 2, 3, \dots \text{ натуральный ряд чисел, до кругового при } t = 0,5 \cdot \pi \cdot |\omega_1 - \omega_2| \cdot (1 + 2k).$$

В кривой скорости поля содержатся высокочастотные (по отношению к частоте колебаний) составляющие, (рис. 1, а) амплитуда которых возрастает к моменту смены направления вращения. Они же прояв-

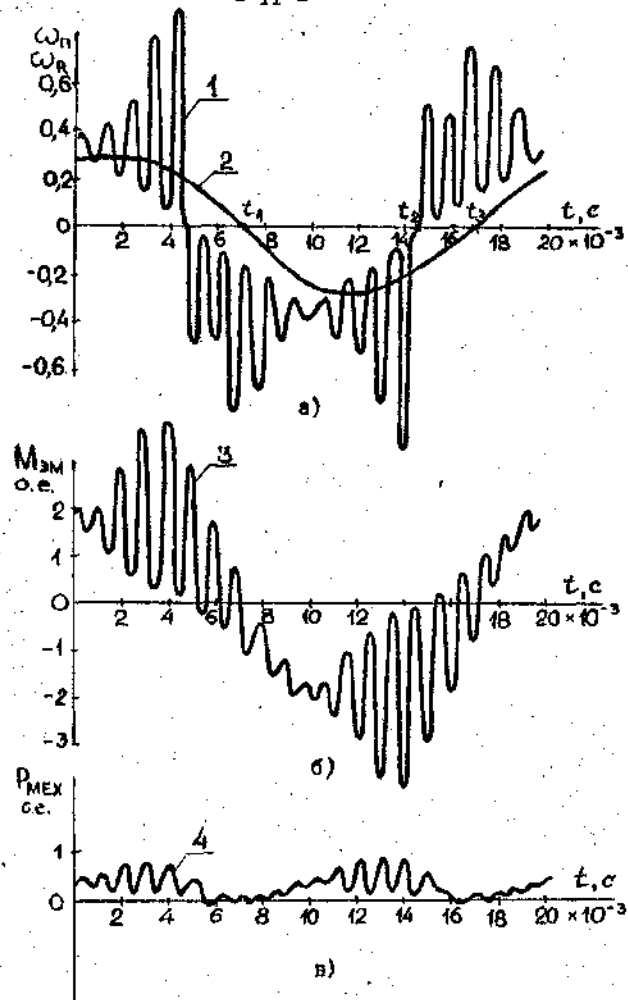


Рис. 1. Временные диаграммы скорости качания поля (1), ротора (2), величины электромагнитного момента (3), механической мощности (4) двигателя 4А71А6УЗ ($F_k = 5$ Гц, $L_{\text{мех}} = 2,686 \cdot 10^{-3}$ кг·м², механический резонанс, линейная фазовая модуляция).

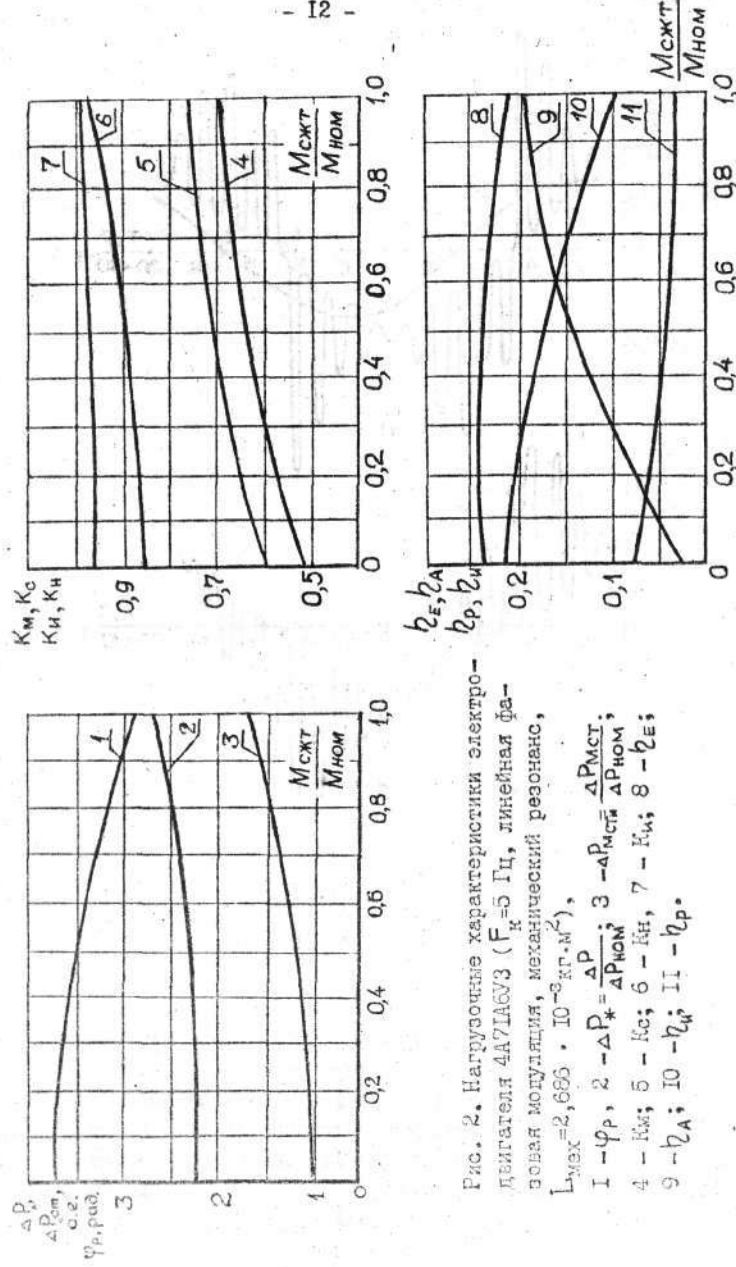


Рис. 2. Нагрузочные характеристики электро-
двигателя 4А71А6У3 (f = 5 Гц, линейная фа-
зовая модуляция, механический резонанс,
L_{мех} = 2,693 · 10⁻³ кг·м²),
I - φ_p; 2 - ΔP* = ΔP / ΔP_{ном}; 3 - ΔP_{мст} / ΔP_{ном};
4 - K_m; 5 - K_c; 6 - K_n; 7 - K_i; 8 - z_ε;
9 - z_α; 10 - z_p; 11 - z_η.

ляются затем в диаграммах электромагнитного момента (рис. 1,б) и механической мощности (рис. 1,в). Эллиптичность качающегося электромагнитного поля приводит к увеличению потерь мощности и увеличению составляющих обратной последовательности. Появление высокочастотных составляющих в механической мощности сопровождается дополнительными потерями мощности в активной части двигателя. Изложенное подтверждается средними за период колебания энергетическими показателями (рис. 2). Потери мощности на рабочем диапазоне в 2 + 2,3 раза превышают номинальные, соответственно низкие значения имеет обобщенный КПД. Так, для M_{жт} = M_{ном} z_ε = 0,21;
z_{αε} = 0,17; z_{pε} = 0,05; z_{ηε} = 0,09.

Предложения по улучшению энергетических показателей направлены на разработку способов создания колебательного движения, при которых устраняется или уменьшается влияние вышеуказанных факторов, а также применение двигателей, в которых проявление отрицательных факторов менее заметно.

Первое направление реализуется созданием способов возбуждения колебательного режима с круговым качающимся полем, а также импульсным питанием двигателя, когда электромеханическое преобразование энергии осуществляется в наиболее благоприятный по энергетике двигателя интервал колебания.

Этим условиям удовлетворяет разработанный автором способ возбуждения колебательного движения, названный балансной амплитудной модуляцией с круговым полем (БАМЦП).

При таком способе напряжение одной фазы модулируется по амплитуде периодическим сигналом, а напряжение другой - таким же, но выпрямленным сигналом.

$$U_{α} = U_m \cdot \sin \Omega t \cdot \sin \omega t;$$

$$U_{β} = U_m \cdot |\sin \Omega t| \cdot \cos \omega t.$$

Тогда частота колебаний
 $f_k = (2 \cdot \pi) \cdot \Omega$.

В воздушном зазоре электродвигателя создается круговое качающееся электромагнитное поле, а наибольшая интенсивность электро-механического преобразования энергии происходит в благоприятный по энергетике двигателя период - при малом скольжении, когда потребляемый ток мал, а электромагнитный момент достаточно велик в силу малого значения индуктивной составляющей тока ротора:

Изложенное подтверждается результатами исследования энерге-

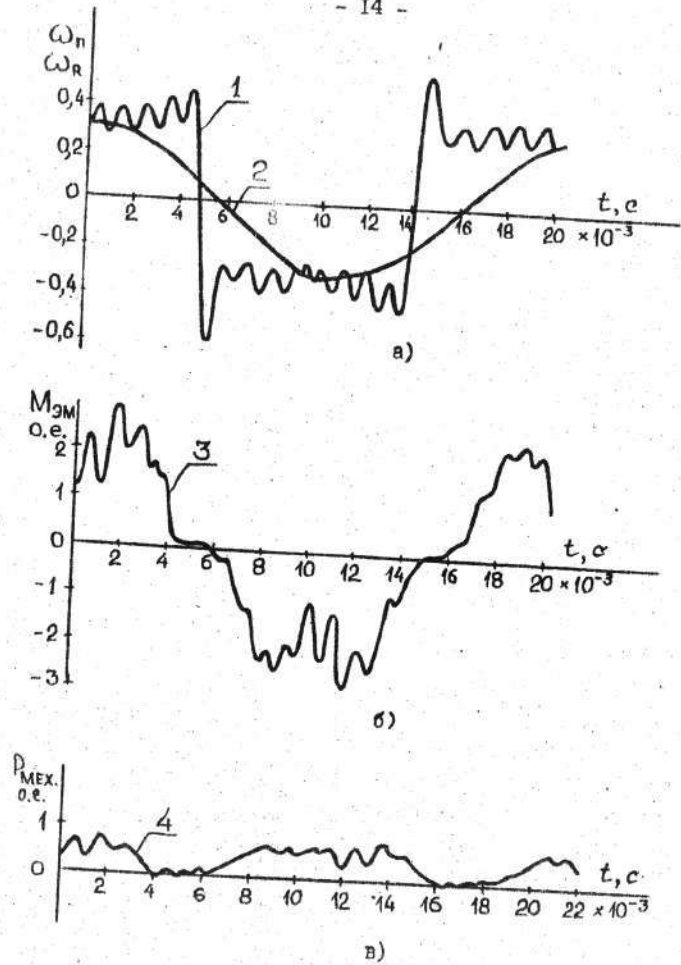


Рис. 3 Временные диаграммы скорости качания поля (1), ротора (2), величины электромагнитного момента (3), механической мощности (4) двигателя 4А71А6УЗ ($F_k = 5$ Гц, $L_{мех} = 2,686 \cdot 10^{-3}$ кг·м² механический резонанс, БАММП).

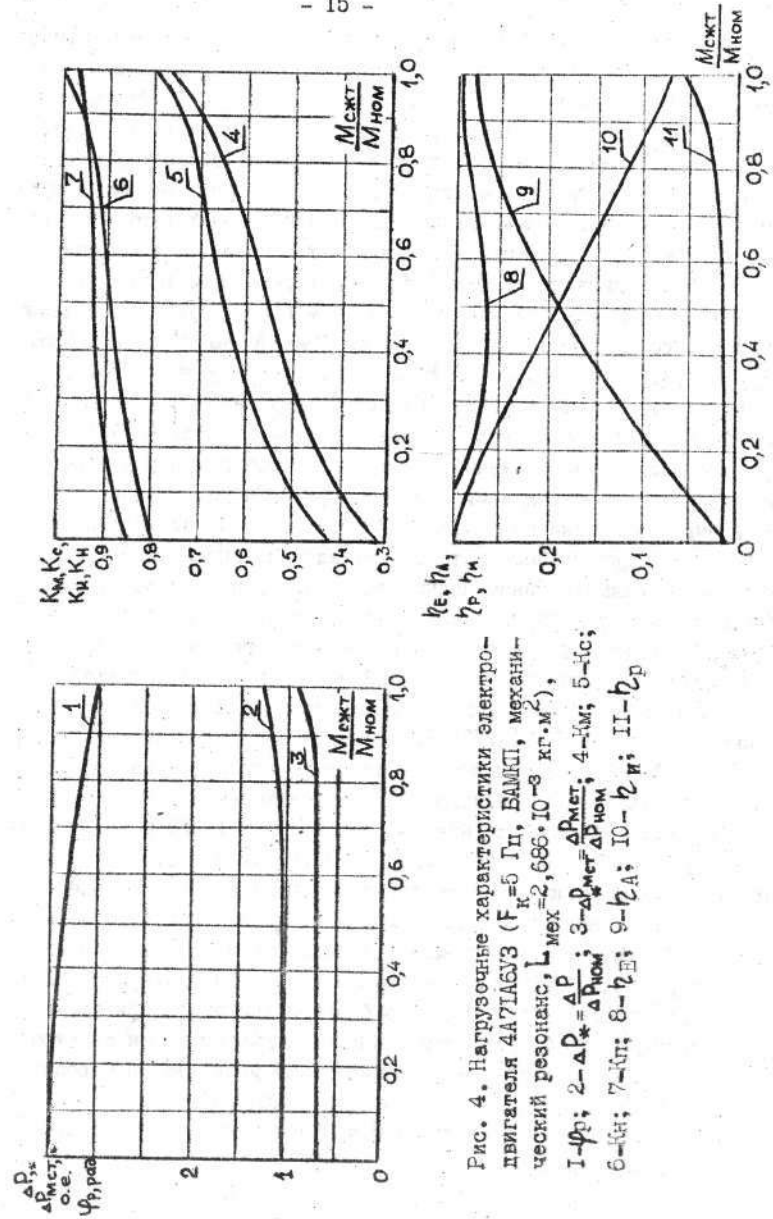


Рис. 4. Нагрузочные характеристики электро-двигателя 4А71А6УЗ ($F_k = 5$ Гц, БАММП, механи-ческий резонанс, $L_{мех} = 2,686 \cdot 10^{-3}$ кг·м²), I- ω_n ; 2- $\Delta P_{*} = \frac{\Delta P}{P}$; 3- $\Delta P_{*} = \frac{\Delta P_{мех}}{P_{ном}}$; 4- I_e ; 5- I_c ; 6- K_n ; 7- K_{τ} ; 8- τ_p ; 9- τ_A ; 10- τ_{II} ; 11- τ_D

ляются параметрами двигателя и после их оптимизации могут быть существенно расширены.

Помимо изложенных, был получен ряд полезных для теории и практики частных результатов. Например, для всех видов двигателей в электроприводе золотника и при всех способах создания колебательного движения отмечалось высокая жесткость частотных характеристик. При исследовании регулировочных характеристик для двигателя 4А71А6УЗ $\eta_{\text{емак}}$ наблюдался при определенных соотношениях нагрузки и напряжения питания. Для линейной фазовой модуляции $K_U = 2K_3$, для БМЦП $K_U = K_3$.

Далее в главе приведены технические предложения, направленные на улучшение энергетических показателей электродвигателей колебательного движения в частных случаях. Изложен способ создания экономического колебательного движения вала трехфазного асинхронного электродвигателя, основанный на разночастотном питании трех статорных обмоток.

$$U_A = U_m \cdot \sin \omega t ;$$

$$U_B = K_B \cdot U_m \cdot \sin(\omega + \Omega) t ;$$

$$U_C = K_C \cdot U_m \cdot \sin(\omega - \Omega) t ;$$

Здесь частота колебаний $f_k = (2 \cdot \pi)^{-1} \Omega$

K_B, K_C - поправочные коэффициенты для выполнения условия $I_A = I_B = I_C$.

Способ позволяет повысить удельную мощность колебательного электропривода за счет полного использования активной части силового трехфазного электродвигателя.

Описаны конструкции асинхронных электродвигателей: с одноосно симметричным двигателем и двухроторного. В первом случае наличие вырезов в полем ротора позволяет осуществить колебательное движение с электромагнитной фиксацией оси колебаний и, тем самым, снизить потери мощности при создании моментов на преодоление фиксирующей позиционной нагрузки в обычных двигателях. Внешнее расположение короткозамкнутого ротора двухроторного двигателя по отношению к статору позволяет при одном и том же питании обмоток, создав эллиптическое поле между статором и короткозамкнутым ротором получить его однонаправленное вращение при

колебательном движении внутреннего полого ротора. Вращательное движение короткозамкнутого ротора используется для вентиляции двигателя, тем самым, повышается его мощность в колебательном движении.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования электропривода колебательного движения золотника гидровибратора, проведенного с целью проверки адекватности математической модели и правильности полученных рекомендаций.

Для этого был изготовлен макет электропривода золотника, включающий частотный электромеханический преобразователь; имитатор механических нагрузок, состоящий из одноступенчатого цилиндрического редуктора, калиброванных дисков инерционной нагрузки и механического маятника в качестве позиционной нагрузки; тахогенератор постоянного тока; комплект измерительной аппаратуры и устройств измеряющих активную и реактивную мощности; собственно исследуемого двигателя. Определялись мгновенные потребляемые активные и реактивные мощности и скорость колебательного движения вала, которое создавалось способом разночастотного питания фазных обмоток статора. Результаты эксперимента обрабатывались на ЭВМ для получения полного объема информации. В таблице I приведены энергетические показатели одного режима работы колебательного электропривода золотника, определенные расчетным и экспериментальным путем.

Средние за период колебания энергетические показатели электродвигателя 4А71А6УЗ (о.е.).

Таблица I

опит	расчет	$F_{K_3} = 1 \text{ Гц}$ $L = 2,686 \cdot 10^{-3} \text{ кг м}^2$ $K_U = 0,176$																		
		ω_R	P_R	P_A	Q_A	Q_B	S_A	S_B	S_1	P_1	Q_1	$P_{\text{мех}}$	K_M	K_C	K_U	K_H	η_E	η_A	η_P	η_M
		0,361	0,029	0,023	0,038	0,022	0,053	0,0402	0,0932	0,052	0,050	0,02	0,559	0,657	0,866	0,982	0,220	0,0048	0,005	0,214
		0,35	0,032	0,0283	0,026	0,016	0,0602	0,052	0,112	0,0603	0,042	0,000796	0,538	0,82	0,761	0,873	0,00351	0,0033	0,00	0,0012

Можно отметить большое различие в определении составляющих механической мощности и, соответственно составляющих обобщенного КПД, расчетным и экспериментальным путем. Это вызвано тем, что из-за технических трудностей в экспериментальной установке не реализовано измерение высокочастотных составляющих электромагнитного момента, в то время как в численных расчетах они учитывались. Хорошая сходимость остальных энергетических показателей позволяет говорить об адекватности математической модели реальным физическим процессам, правильности полученных результатов и предложенных технических решений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Расширены и углублены основы теории энергообмена в асинхронном электродвигателе колебательного движения, в частности:
 - разработана система оценок энергетических показателей электродвигателей колебательного режима работы;
 - разработана математическая модель несимметричного асинхронного электродвигателя с переменными параметрами для колебательного режима работы, на ее базе составлена и реализована на алгоритмическом языке "ФОРТРАН" программа расчета энергетических показателей.
2. Результаты расчета на математической модели энергетических характеристик электродвигателя колебательного электропривода золотника электрогидровибратора позволяют сделать выводы и дать рекомендации по выбору и использованию двигателей:
 - наиболее просто реализуемый способ создания колебательного движения линейной фазовой модуляции является энергетически невыгодным, потери мощности на диапазоне нагрузок до номинальной достигают 2,3-х кратных номинальным потерям двигателя;
 - энергетические показатели практически постоянны на всем интервале рабочих частот;
 - лучшими энергетическими показателями обладают асинхронные электродвигатели введенные в колебательный режим способом балансной амплитудной модуляции с круговым полем, при котором энергетические показатели близки к номинальным;
 - асинхронные электродвигатели с двуслойным ротором целесообразно применять в области высоких скольжений и нагрузок;
 - разработанный способ линейной фазовой модуляции для трехфазных асинхронных двигателей большой мощности позволяет реализовать колебательный электропривод большей удельной мощности;

- применение асинхронных электродвигателей с одноосно симметричным ротором, а также двухроторных электродвигателей позволяет повысить энергетические показатели колебательного электропривода.

3. Основные теоретические выводы и рекомендации подтверждены экспериментально. Удовлетворительная сходимость расчетных и опытных данных свидетельствуют о том, что изложенные в работе теоретические положения адекватны действительным.

Предложенные в работе технические решения защищены авторскими свидетельствами, они реализованы при создании опытных образцов электроприводов колебательного движения золотника вибрационного электрогидропреобразователя.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.С. № I4I5400 СССР. Способ управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме колебательного движения/ В.И.Луковников, В.В.Тодоров, С.А.Грачев// Б.И. 1988 № 29.
2. А.С. № I4I7I59 СССР. Электропривод колебательного движения/ В.И.Луковников, В.В.Тодоров, С.А.Грачев// Б.И. 1988 № 30.
3. А.С. № I4I7I60 СССР. Способ возбуждения колебательного движения вала трехфазного двигателя/ В.И.Луковников, В.В.Тодоров, С.А.Грачев// Б.И. 1988 № 30.
4. Грачев С.А., Тодоров В.В., Калиновский Ю.А. Тепловой расчет асинхронного двигателя вентильного электропривода// Электромеханические системы с постоянными магнитами. Тез. докл. Всесоюзного семинара. Златоуст, 1985. I с.
5. Грачев С.А., Тодоров В.В. Определение потерь мощности в обмотках асинхронного электродвигателя колебательного движения// Динамика электрических машин. Омск, 1985. -с.70-73.
6. Грачев С.А., Тодоров В.В. Энергетические характеристики динамического и квазиустановившегося режимов колебательного электропривода// Динамические режимы работы электрических машин и электропривода. Тез. докл. Всесоюзной НТК. Каунас, 1988. -I с.
7. Луковников В.И., Грачев С.А., Погуляев М.Н., Тодоров В.В. Состояние и перспективы развития электромеханических преобразователей систем// Деп. в ВИНТИ. 1989. № 670-эп.
8. Луковников В.И., Соленков В.В., Грачев С.А., Тодоров В.В. Специальные электрические приводы робототехнических устройств// Проблемы внедрения достижений научно-технического прогресса в области автоматизации и механизации производственных процессов.

Тез. докл. Республиканской НПК. Уфа. 1986. -с.22.

9. Луковников В.И., Тодоров В.В. Математическая модель динамических рабочих режимов асинхронного двигателя непосредственного привода. //Проблемы электромеханики. Тез. докл. Всесоюзной НТК. Москва. 1988. -с.93-94.

10. Тодоров В.В. Характеристика двигателей серии 4 А в колебательном режиме работы // Задачи динамики электрических машин. Омск, 1987. -с.69-72.

11. Тодоров В.В., Чубриков Л.Г. Устройство для измерения размаха колебаний вала асинхронного двигателя // Деп. в ИНФОРМЭЛЕКТРО. 1987. №16-эт.

Имеются положительные решения ВНИИГПЭ по заявкам:

№ 4663053/24-07, СССР. Асинхронный электродвигатель колебательного движения / В.И.Луковников, В.В.Тодоров, С.А.Грачев и М.Н.Погоуляев; заявлено 11.05.89г.

№ 4651139/24-07/023234, СССР. Способ управления колебательным электроприводом с асинхронным двигателем. / В.И.Луковников, В.В.Тодоров, Н.И.Погоуляев; заявлено 13.02.89г.

№ 4718723/07 (096954) - СССР. Асинхронный электродвигатель / В.И.Луковников, В.В.Тодоров, В.И.Бурьяница; заявлено 14.07.89г.

№ 4744757/24-07 (097451), СССР. Асинхронный электродвигатель / В.И.Луковников, В.В.Тодоров, В.И.Бурьяница; заявлено 14.07.89г.

№ 4663053/24-07 (036610), СССР. Электромагнитный преобразователь углового движения. / В.И.Луковников, М.Н.Погоуляев, В.В.Тодоров; заявлено 15.03.89г.

Подписано в печать 23.11.90 г. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага писч. № 1. Печ. л. 1. Зак. № 3395. Тираж 100 экз.
Бесплатно.

Ротапринт типографии БелНИИЖТа, 246022, г. Гомель,
ул. Кирова, 34.