

6
А 66

3261

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ЗАОЧНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

СНЕГУЛЬСКИЙ Г.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ
АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГА-
ТЕЛЯ ПРИ НЕЗАТУХШЕМ ПОТОКЕ В РОТОРЕ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.230 - ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1971 г.

Работа выполнена на кафедре электропривода Днепропетровского инженерно-строительного института и на Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени электромеханическом заводе имени Владимира Ильича.

Научные руководители:

Лауреат Государственной премии, кандидат технических наук, доцент Радин В.И.,

кандидат технических наук, доцент Танатар А.И.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Сандлер А.С.

Кандидат технических наук, доцент Аносов Ю.И.

Ведущее предприятие: Днепропетровский Южный машиностроительный завод.

Автореферат разослан " 15 " февраля 1971 г.

Защита диссертации состоится " 15 " марта 1971 г.

на заседании советов энергетического и электрофизического факультетов Всесоюзного заочного политехнического института (ул. Павла Корчагина, 22).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат направляется Государственная Всесоюзная библиотека СССР им. В. И. Ленина

Просим Вас и всех заинтересованных лиц Вашего учреждения принять участие в заседании Ученого Совета, посвященного публичной защите диссертации, или прислать свои отзывы в 2-х экз. по адресу: Москва, И-278, ул. Павла Корчагина, дом 22, Всесоюзный заочный политехнический институт, ученому совету.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

/Г. СВИРИДЕНКО/

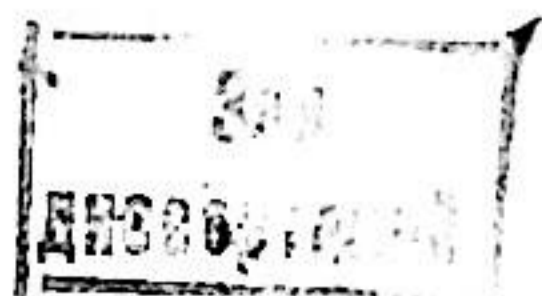


В В Е Д Е Н И Е

В самом общем виде методы регулирования скорости асинхронных двигателей можно разделить на две основные группы - на параметрические /изменение активного и полного сопротивлений в цепи статора и ротора и т.п./ и энергетические. Последние основаны на изменении потока электрической энергии, подводимой к двигателю / системы частотного регулирования, вентильные каскады и т.п./.

Наиболее экономичными являются энергетические методы, в частности метод частотного регулирования. Использование тиристоров в схемах статических преобразователей частоты открывает широкие возможности для применения частотного метода регулирования скорости асинхронных машин. Однако, даже самые совершенные схемы статических преобразователей частоты весьма сложны, громоздки, дороги и пока недостаточно надежны в эксплуатации, это существенным образом ограничивает область применения этого метода.

Особое место занимает импульсный метод регулирования скорости вращения электродвигателей, сущность которого состоит в периодических кратковременных изменениях электрических параметров двигателя или режимов его работы. Достоинствами этого метода является относительная простота схем управления и возможность получения различного вида механических характеристик. Однако, до последнего времени область его применения ограничивалась лишь отдельными электроприводами с большими маховыми массами. Объясняется это прежде всего отсутствием надежных комму-



тирующих устройств, которые могли бы работать на высоких частотах.

В последние годы к импульсному методу регулирования заметно возрос, поскольку в качестве переключающих элементов стало возможным применение силовых управляемых вентилях. Это позволило исключить механическую коммутирующую аппаратуру и за счет увеличения частоты коммутации снизить колебания скорости в приводах с небольшими маховыми массами. В связи с этим в литературе опубликовано большое количество схем импульсного метода регулирования скорости асинхронных электродвигателей. Отличительной особенностью современных схем является применение высоких частот коммутации, когда электромагнитные процессы в машине не успевают существенно затухнуть за время выключенного состояния. Известные методы анализа и расчета импульсного режима работы асинхронной машины, где не учитывается влияние переходных электромагнитных процессов, в этом случае оказываются непригодными.

Целью настоящей диссертации является:

- 1) создание методов анализа и инженерных расчетов переходных и квазиустановившихся импульсных режимов асинхронного двигателя, учитывающих влияние электромагнитных переходных процессов;
- 2) определение на основе разработанных методов влияния параметров коммутации на механические и энергетические характеристики двигателя;
- 3) определить рациональные области применения частотно-импульсных и широтно-импульсных систем регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов.

В первой главе приведен краткий анализ работ по теории импульсного регулирования скорости асинхронных двигателей и дан обзор схем для этого метода регулирования.

Впервые теории импульсного регулирования скорости электродвигателей постоянного тока была разработана академиком В.С.Кулебакиным. Ее распространение на асинхронные короткозамкнутые двигатели выполнено в работах В.А. Виноградова, который впервые показал возможность импульсного регулирования скорости вращения асинхронного электродвигателя при помощи дросселей насыщения, включенных в цепь статора. Наиболее полное исследование разомкнутых систем импульсного регулирования двигателей переменного тока сделано в работах Э.П.Саркисян. Его исследовано поведение асинхронного двигателя при различных возможных способах импульсного регулирования: путем периодического изменения параметров машины / активного, индуктивного и емкостного сопротивлений в цепи статора и ротора / и режимов его работы / переключение из двигательного режима в режим противовключения, динамического торможения; переключения пар полюсов; включение в схемы с несимметричными параметрами /.

Дальнейшее развитие теории импульсного регулирования асинхронных машин получила в работах Л.Л.Роткопа. В них приведены методы расчета механических характеристик и определение диапазона регулирования в замкнутых системах автоматического регулирования, определены потери в двигателе, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, исследовано влияние запаздывания в элементах управления на основные характеристики электро-

привода, приведен расчет корректирующих обратных связей.

При выводе основных соотношений, описывающих асинхронную машину, работающую в импульсном режиме, авторы перечисленных выше работ считали, что время электромагнитного переходного процесса, вызванного коммутацией, несоизмеримо мало по сравнению с периодом коммутации. В этом случае влияние электромагнитного переходного процесса на поведение машины, работающей в импульсном режиме, несущественно и им можно пренебречь.

Впервые исследование электромагнитных переходных процессов при импульсном регулировании асинхронных приводов было выполнено в работах В.А.Шубенко и Ю.П.Агафонова. В них, в частности, показано, что пренебрежение электромагнитными процессами при оценке динамики и качества регулирования малоинерционных приводов может привести к неправильным выводам и грубым ошибкам. В отличие от предыдущих авторов, они исследуют совместно систему нелинейных дифференциальных уравнений падения напряжения в статорных и роторных цепях и уравнение динамики привода. Поскольку анализ такой системы представляет известные трудности, было произведено их численное решение для конкретного двигателя на ЭЦВМ типа "Урал-1".

В результате такого расчета были получены кривые изменения токов и моментов при включении асинхронного двигателя с различными начальными условиями. На основе анализа полученных графиков авторы определили три характерные зоны скоростей при импульсном регулировании. В зоне малых скоростей двигатель длительное время подвергается воздействию знакопеременных ударных моментов с частотой, близкой к частоте питающей сети, и максимальной положительной полуволной в три раза превышающей значение уста-

новившегося момента. Зона средних скоростей характерна небольшими значениями ударных моментов и небольшой продолжительностью переходного процесса. В зоне больших скоростей, близких к синхронной, имеют место большие по амплитуде отрицательные переходные моменты, могущие вызвать значительные механические перенапряжения в машинах.

Аналогичным образом исследовано влияние начальных условий на переходные токи и моменты. При этом были определены максимальные значения переходных токов и моментов в каждой зоне при изменении фазы затухающего тока. В частности, было установлено:

1. Минимальные ударные моменты возникают при повторных включениях, когда начальный ток ротора находится в фазе 270° . Токи при этом имеют наименьшие броски, а нарастание скорости наибольшее.

2. Так как затухающее поле ротора может привести к возникновению отрицательных ударных моментов, желательно уменьшать коэффициент затухания токов ротора, например, закорачиванием обмотки статора в момент выключения.

3. Увеличение частоты переключений с целью стабилизации скорости создает условия для увеличения ударных, в ряде случаев отрицательных моментов. Последнее, в свою очередь приводит к обратным результатам: увеличению колебаний скорости и неустойчивости регулирования.

В 1968г. появился ряд работ М.М.Соголова и П.Е.Данилова, М.П.Обужоцкого, Р.Б.Илеусузовой, А.Э.Газганова и др. В них исследованы процессы, протекающие в тиристорном коммутаторе, предложен ряд новых схемных решений коммутаторов и обратных

связей систем регулирования.

Анализ выполненных работ показывает, что механические и энергетические показатели импульсного режима зависят от начальных условий и параметров коммутации. В свою очередь, начальные условия однозначно связаны с параметрами коммутации. Установлению этих связей посвящена вторая глава.

Во второй главе после краткого изложения теории переходных процессов в асинхронной машине произведен вывод формул, описывающих импульсный режим работы асинхронной машины, доказано существование стационарного импульсного режима и выведены формулы для начального и конечного потокосцеплений в стационарном режиме, а также разработан метод качественного анализа переходных моментов.

Исходные дифференциальные уравнения, описывающие поведение асинхронного двигателя, для рассматриваемого случая удобно записывать в форме, предложенной К. П. Ковачем:

$$\begin{aligned} p\psi_s &= U_s - \alpha'_s(\psi_s - K_r\psi_r) - j\omega_k\psi_s; \\ p\psi_r &= -\alpha'_r(\psi_r - K_s\psi_s) - j(\omega_k - \omega)\psi_r. \end{aligned} \quad / I /$$

- Здесь ψ_s и ψ_r - векторы потокосцеплений статора и ротора;
 U_s - вектор напряжения питающей сети;
 ω - угловая скорость вращения ротора;
 ω_k - угловая скорость вращения координатной системы;
 α'_s - коэффициент затухания токов статора при короткозамкнутом роторе;

α'_r - коэффициент затухания токов ротора при короткозамкнутом статоре;

K_s, K_r - коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора соответственно;

p - символ дифференцирования.

После мгновенного и одновременного отключения всех трех фаз двигателя от питающей сети активное и индуктивное сопротивление статора становится равным бесконечности. В этом случае первое уравнение системы / I / теряет смысл, а второе приобретает вид:

$$p\psi_r - \psi_r(0) = -\alpha'_r\psi_r - j(\omega_k - \omega)\psi_r \quad / 2 /$$

Здесь $\psi_r(0)$ - потокосцепление в обмотке ротора, имевшее место непосредственно перед выключением;

α'_r - коэффициент затухания роторного тока при разомкнутой статорной обмотке.

Решая уравнение / 2 / , получим:

$$\psi_r = \psi_r(0) e^{[-\alpha'_r - j(\omega_k - \omega)]t} \quad / 3 /$$

Таким образом, после отключения статора, потокосцепление в короткозамкнутом роторе экспоненциально затухает, не изменяя своей начальной фазы в системе координат ротора. Потокосцепление в статорной обмотке в момент отключения скачкообразно изменяет свою фазу и модуль, становясь в K_r раз отличным от потокосцепления роторной обмотки и совпадающим с ним по фазе:

$$\psi_s = K_r\psi_r \quad / 4 /$$

Выражения для периода включенного состояния можно получить, решив системы уравнений / I /, например, методом преобразования Лапласа:

$$\Psi_s = \Psi_{s\infty} + \sum_1^{k=2} \Psi_{sok} = K_r \Psi_r(0) \sum_1^{k=2} C_{sok}; \quad / 5 /$$

$$\Psi_r = \Psi_{r\infty} + \sum_1^{k=2} \Psi_{rok} + \Psi_r(0) \sum_1^{k=2} C_{rok}.$$

Здесь $\Psi_{s\infty}$ и $\Psi_{r\infty}$ представляют собой установившиеся потоко-сцепления, Ψ_{sok} и Ψ_{rok} - переходные составляющие потоко-сцеплений, свободно затухающие с коэффициентом затуханий, определяемыми действительной частью корней характеристического полинома уравнений / I / и изменяющими фазу с угловой скоростью, определяемой мнимой частью этих корней. Последние две составляющие C_{sok} и C_{rok} учитывают затухание начального потоко-сцепления в роторе, име-ющему место непосредственно перед моментом выключения. При выводе учтено, что начальное потоко-сцепление статора связано с роторным потоко-сцеплением зависимостью / 4 /.

Это дало возможность выделить члены, содержащие начальные потоко-сцепления в отдельные составляющие.

Зная, наконец, выражения, описывающие поведение двигателя на каждом из участков периода коммутации, можно установить закономерность изменения начального роторного потоко-сцепления от цикла к циклу.

Полагаем, что к началу первого цикла в роторной обмотке имели место любые начальные потоко-сцепления $\Psi_{r1}(0)$, а ротор вращался с угловой скоростью ω . Тогда к моменту времени $\tau = \gamma T$

/ γ - скважность цикла, T - период коммутации /, непосредственно

перед выключением, роторные потоко-сцепления будут иметь значение:

$$\Psi_{r2}(\gamma) = \Psi_{r0}(\gamma, \omega_1) + C_r(\gamma, \omega_1) \Psi_{r1}(0).$$

Здесь и в дальнейшем с целью упрощения записи обозначено:

$$\Psi_{r0} = \Psi_{r\infty} + \sum_1^{k=2} \Psi_{rok};$$

$$C_r = \sum_1^{k=2} C_{rok};$$

$$\xi = e^{[-d_r - j(\omega_k - \omega)]T(1-\gamma)}$$

В силу неразрывности роторного потоко-сцепления значение $\Psi_{r2}(\gamma)$ может быть принято начальным на промежутке, когда двига-тель отключен. Тогда в момент времени $\tau = T$, непосредственно перед повторным включением:

$$\Psi_{r2}(T) = \Psi_{r2}(\gamma) \xi(\omega_1) = \Psi_{r0}(\gamma, \omega_1) \xi(\omega_1) + C_r(\gamma, \omega_1) \xi(\omega_1) \Psi_{r1}(0)$$

Это значение потоко-сцепления является начальным для про-межутка включенного состояния в следующем цикле коммутации, т.е.:

$$\Psi_{r2}(T) = \Psi_{r2}(0)$$

Продолжая рассуждения подобным образом, можем получить значения потоко-сцепления в момент отключения двигателя для любого n -го цикла:

$$\begin{aligned} \Psi_{rn}(\gamma) = & \Psi_{r0}(\gamma, \omega_n) + C_r(\gamma, \omega_n) \xi(\omega_{n-1}) \Psi_{r0}(\gamma, \omega_{n-1}) + \\ & + C_r(\gamma, \omega_n) C_r(\gamma, \omega_{n-1}) \xi(\omega_{n-2}) \Psi_{r0}(\gamma, \omega_{n-2}) + \dots \\ & \dots + \Psi_{r0}(\gamma, \omega_2) \prod_n^{m=2} C_r(\gamma, \omega_m) \prod_{n-1}^2 \xi(\omega_m) + \\ & + \Psi_{r2}(0) \Psi_{r0}(\gamma, \omega_1) \prod_n^1 C_r(\gamma, \omega_k) \prod_{n-1}^1 \xi(\omega_k). \quad [6] \end{aligned}$$

Вычисление конечных потокосцепления по выражению / 6 / практически невозможно. Тем не менее ряд / 6 / позволяет установить некоторые закономерности импульсного режима работы двигателя. Непосредственно исследовать ряд / 6 / трудно, т.к. каждый член его зависит от скорости вращения ротора, которая в общем случае изменяется от цикла к циклу и в пределах самого цикла. Поэтому запишем его при постоянной скорости вращения:

$$\Psi_{r\eta}(\gamma) = \Psi_{r0} \sum_0^{k\eta} [C_r(\gamma) \xi]^k \quad / 7 /$$

Уравнение / 7 / представляет собой степенной ряд с комплексными членами. Можно утверждать, что всегда найдется такая скорость вращения ротора, при которой модули членов ряда / 7 / будут больше модулей соответствующих членов ряда / 6 /. Поэтому для доказательства сходимости ряда / 6 / необходимо и достаточно доказать сходимость ряда / 7 /.

Нетрудно заметить, что ряд / 7 / представляет собой геометрическую прогрессию со знаменателем $q = C_r(\gamma) \cdot \xi$. Из теории рядов известно, что такой ряд абсолютно сходится, если модуль знаменателя меньше единицы. Последнее легко доказать, т.к. оба сомножителя имеют наибольшее значение, равное единице только при $\tau = 0$. Из этого следует, что ряд / 7 / всегда абсолютно сходится при любых значениях скорости вращения ротора. Поскольку члены ряда / 6 / по абсолютной величине меньше соответствующих членов ряда / 7 /, то ряд / 6 / тоже абсолютно сходится.

Из сходимости ряда / 6 / следует два важных положения:

1. При достаточно большом числе циклов всегда будет иметь место стационарный режим работы, при котором все электрические и механические величины, определяющие состояние электродвигателя, имеют одинаковые значения в соответствующих точках каждого цикла.

2. Начальные потокосцепления в стационарном импульсном режиме не зависят от того, с какими начальными условиями начинался процесс.

Формула для конечного потокосцепления в стационарном импульсном режиме имеет вид:

$$\Psi_{r\infty}(\gamma) = \frac{\Psi_{r0}(\gamma)}{1 - C_r(\gamma)\xi} \quad / 8 /$$

Начальные потокосцепления в стационарном импульсном режиме можно получить, умножив выражение / 8 / на ξ :

$$\Psi_{r\infty}(0) = \frac{\Psi_{r0}(\gamma)}{\xi - C_r(\gamma)} \quad / 9 /$$

Полученное уравнение для начальных потокосцеплений квазистационарного импульсного режима дает возможность, задаваясь параметрами коммутации, рассчитать по уравнениям, описывающим асинхронный двигатель в переходном режиме, все энергетические и механические величины, характеризующие данный импульсный режим.

Во второй части главы разработан метод качественного анализа переходных моментов.

При рассмотрении переходных моментов обычно используют

уравнение, которое даже в приближенном виде содержит шесть составляющих, изменяющихся по сложным законам. Такой метод дает возможность с той или иной степенью точности определить численное значение переходного момента. Однако уравнения настолько сложны, что вскрыть физическую сущность процесса не представляется возможным.

Задача качественного анализа переходных моментов значительно упрощается, если изучать поведение основного потока в переходный период:

Выведем основные соотношения. Известно, что полный поток в обмотке машины состоит из потоков рассеяния и основного потока:

$$\Psi_r = \Psi_{r\sigma} + \Psi_0 = x_{r\sigma} i_r + \Psi_0 \quad / 10 /$$

Можно показать, что, как и полные потоки, основной поток имеет составляющую установившемуся режиму и четыре свободных составляющих, две из которых определяют затухание при нулевых начальных условиях, а две - затухание начального потока.

Электромагнитный момент, как известно, определяется векторным произведением роторного потокосцепления на ток ротора, что с учетом / 10 / дает возможность записать:

$$m_3 = -\frac{3}{2} [(x_{r\sigma} i_r + \Psi_0) \times i_r],$$

$$m_3 = -\frac{3}{2} \Psi_0 \times i_r = -\frac{3}{2} |\Psi_0| |i_r| \sin \varphi$$

где φ - угол между векторами Ψ_0 и i_r .

Обозначив через e_r э.д.с. в роторе, можем на основании закона Ома написать:

$$i_r = \frac{e_r}{r_r + j s_0 x_r}$$

Здесь $s_0 = \omega_\psi - \omega$ - скольжение ротора относительно скорости ω_ψ вращения вектора магнитного потока.

Э.д.с. ротора в относительных единицах равна произведению потока на частоту тока в роторе. В принятых обозначениях

$$e_r = |\Psi_0| s_0$$

Тогда

$$i_r = \frac{|\Psi_0| s_0}{r_r + j s_0 x_r} \quad / 11 /$$

Угол φ определяется знаменателем выражения / 11 /, поскольку s_0 - действительное число:

$$\sin \varphi = -\frac{r_r}{\sqrt{r_r^2 + s_0^2 x_r^2}} \quad / 12 /$$

Тогда выражение для момента с учетом / 11 / и / 12 / будет иметь вид:

$$m_3 = \frac{|\Psi_0|^2 s_0 r_r}{r_r^2 + s_0^2 x_r^2} \quad / 13 /$$

Уравнение / 13 / показывает, что величина и знак мгновенного значения переходного момента определяются квадратом модуля вектора основного потока и скоростью его вращения относительно ротора.

Формула для определения скорости вектора основного потока имеет вид:

$$\omega_\psi = \frac{a + \cos \omega_a t}{a^2 + 1 + 2a \cos \omega_a t} \quad / 14 /$$

Здесь величина "а" представляет собой отношение модулей вектора суммы свободных составляющих к вектору установившейся составляющей, а ω_a - скорость вращения вектора свободных составляющих,

определяемая мнимой частью корней характеристического полинома.

При $a = 1$, что соответствует моменту включения двигателя при нулевых начальных условиях, скорость вращения вектора основного потока относительно его установившейся составляющей постоянна и равна половине скорости вращения вектора суммы свободных составляющих. Если $a > 1$, что может быть при соответствующем подборе начальных условий, то скорость вращения вектора основного потока при вращении последнего, изменяя свою величину, не изменяет знак. Особое место занимает случай, когда вектор свободных составляющих существенно уменьшился и его модуль стал меньше модуля вектора установившейся составляющей. В этом случае скорость вектора основного потока с увеличением времени включенного состояния вначале возрастает, принимая максимальное значение при $\omega_a t = \frac{\pi}{2}$, а затем уменьшается. При некотором значении t_1 , определяемом их условия $\cos \omega_a t_1 = a$,

скорость становится равной нулю и при дальнейшем увеличении t меняет знак, становясь отрицательной. Максимальное значение отрицательная скорость достигает при $\omega_a t = \pi$: $\omega_{\psi_{max}} = \omega_a \frac{a}{1-a}$, после чего ее значение уменьшается, достигая нуля при $t_2 = 2t_1$.

Отрицательные скорости вращения вектора основного потока при определенных условиях вызывают отрицательные моменты. Действительно, из уравнения / 14 / видно, что отрицательные моменты имеют место, когда S_0 отрицательная величина. Так как в синхронно вращающейся системе координат

$$S_0 = \omega_{\psi} + S,$$

то S_0 становится отрицательным, когда $\omega_{\psi} < 0$ при условии $|\omega_{\psi}| > S$, если в это время S положительно.

Предлагаемый метод качественного анализа позволяет, не прибегая к громоздким вычислениям, определить величину модуля и фазы начального потокосцепления для получения на заданной скорости вращения необходимого значения электромагнитного момента.

В свою очередь, положение вектора начального потока однозначно определяется параметрами коммутации. Связь между этими величинами можно исследовать предлагаемым в следующей главе методом.

В третьей главе разработаны графоаналитические методы построения годографов начальных и конечных потокосцеплений при изменении параметров коммутации.

В первом разделе главы описан метод построения векторной диаграммы конечных потокосцеплений по известным векторам $\Psi_{r0}(\gamma)$, $S_r(\gamma)$ и ξ . Зная модуль и фазу вектора конечных потокосцеплений, нетрудно определить и вектор начального потока, воспользовавшись формулой / 3 /:

Имея эти данные и воспользовавшись выводами, изложенными в главе 2, можно, не прибегая к дальнейшим вычислениям, оценить мгновенные значения и знак переходного момента при заданных параметрах коммутации. Но последние в процессе регулирования непрерывно изменяются. Это вызывает изменение положений векторов начального и конечного потоков. Изучение законов их изменения при изменении параметров представляет большой практический интерес. Этому вопросу посвящены следующие разделы главы.

Виды годографов начальных и конечных потокоцеплений, как видно из уравнений / 8 / и / 9 /, зависят от законов изменения времени включенного состояния $\delta = \gamma T$ и промежутка времени, в течение которого двигатель выключен: $\sigma = T(1-\gamma)$.

Если в процессе импульсного регулирования продолжительность включения двигателя остается постоянным, а изменяется только время выключенного состояния, то в уравнениях / 8 / и / 9 /, изменяется только величина ξ .

В случае, когда ротор двигателя вращается с синхронной скоростью, ξ превращается в скаляр, изменяющийся во времени по экспоненте, а знаменатели уравнений / 8 / и / 9 / представляют собой векторы, геометрическим местом которых при изменении параметра σ является прямая линия.

Эта линия изменяющегося параметра σ проходит через конец вектора $-C_r(\gamma)$ параллельно оси действительных значений потокоцеплений.

Геометрическим местом концов обратных векторов служит окружность, проходящая через точку начала векторов. Центр ее лежит на перпендикуляре к прямой, сопряженной с линией изменяющегося параметра.

В диссертационной работе приведены примеры построения круговых диаграмм начальных и конечных потоков двигателя МТК-312-8 для трех значений времени включенного состояния: 0,08 сек., 0,01 сек., 0,015 сек. и синхронной скорости вращения ротора. Анализ показывает, что только во втором случае имеют место отрицательные моменты. В первом и третьем случае за время вклю-

ченного состояния изменяется лишь модуль вектора основного потока, а его фаза в синхронно вращающейся системе координат остается почти неизменной. В таком режиме электромагнитный момент двигателя практически равен нулю.

В разделе 3 рассмотрен метод построения геометрических мест годографов начальных и конечных потокоцеплений, когда модуль вектора ξ остается постоянным, а изменяется лишь его фаза. В этом случае знаменатели выражений / 8 / и / 9 / являются уравнениями окружностей. Обращение окружности, не проходящей через начало координат, тоже дает окружность, не проходящую через начало координат. Центр обращенной окружности находится на прямой, проходящей через начало координат и центр обращаемой окружности. Разработанная методика позволяет построить по заданным значениям $\Psi_o(\gamma)$ и $C_r(\gamma)$ круговые диаграммы начальных и конечных потокоцеплений при изменении аргумента ξ .

В общем случае при импульсном регулировании скорости асинхронного двигателя одновременно изменяются три вектора: $\Psi_o(\gamma)$, $C_r(\gamma)$ и $\xi(\gamma)$, причем первые два изменяются в зависимости от времени включенного состояния, а последний от промежутка времени, в течение которого статорная обмотка двигателя отключена от питающей сети.

Очевидно, что годографы начальных и конечных потокоцеплений могут иметь самый различный вид, в зависимости от закона изменения периода коммутации и сиважности, т.е. от закона импульсной модуляции.

В связи с тем, что в общем случае годографы $\Psi_o(\gamma)$ и $C_r(\gamma)$

заданы произвольными кривыми, задача построения годографов начальных и конечных потокосцеплений сводится к отысканию фиксированных точек их, соответствующих этим же точкам на годографах $\Psi_{r0}(\gamma)$, $C_r(\gamma)$ и ξ . В работе изложена методика синтеза годографов начальных и конечных потокосцеплений при заданном законе импульсной модуляции. Это дает возможность, не прибегая к трудоемким расчетам качественно и количественно исследовать импульсной режим работы машины при различных законах импульсной модуляции.

В четвертой главе разработан метод математического моделирования нестационарных импульсных режимов с применением аналоговых вычислительных машин.

Вопросам математического моделирования переходных процессов в асинхронном электродвигателе посвящено большое количество работ, авторы которых по-разному подходят к решению вопроса, в результате чего получают различные схемы моделирования. Различие структурных схем объясняется тем, что для их составления применялись уравнения в разной форме записи, в разных координатных системах. Кроме того, большинство авторов стремились создать по-возможности универсальные схемы, пригодные для решения разного рода задач. В большинстве случаев это приводило к излишнему усложнению схемы при решении данной конкретной задачи.

Удобная для моделирования система уравнений, описывающих асинхронный короткозамкнутый электродвигатель в синхронно вращающейся системе координат имеет вид:

$$p\Psi_{s2} = U_{s2} - d_s^k E_2 + \Psi_{s\beta} ;$$

$$p\Psi_{r2} = -d_r^k E_2 + S\Psi_{r\beta} ;$$

$$p\Psi_{s\beta} = U_{s\beta} - d_s^k E_3 - \Psi_{s2} ;$$

$$p\Psi_{r\beta} = -d_r^k E_4 - S\Psi_{r2} ;$$

$$pS = -\frac{1}{T} (m_0 - m) ;$$

$$m_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{K_s}{x_r'} (\Psi_{r2} \cdot \Psi_{s\beta} - \Psi_{s2} \cdot \Psi_{r\beta}) ; \quad / 15 /$$

$$E_1 = \Psi_{s2} - K_r \Psi_{r2} ;$$

$$E_2 = \Psi_{r2} - K_s \Psi_{s2} ;$$

$$E_3 = \Psi_{s\beta} - K_r \Psi_{r\beta} ;$$

$$E_4 = \Psi_{r\beta} - K_s \Psi_{s\beta} ;$$

$$d_s^k = \begin{cases} d_s^i & \text{при } 0 < \tau < \gamma T, \\ \infty & \text{при } \gamma T < \tau < (1-\gamma)T ; \end{cases}$$

$$d_r^k = \begin{cases} d_r^i & \text{при } 0 < \tau < \gamma T, \\ d_r^i & \text{при } \gamma T < \tau < (1-\gamma)T. \end{cases}$$

Последние два уравнения системы / 15 / определяют значения коэффициентов затухания статорной и роторной обмоток на промежутках включенного и выключенного состояния двигателя.

Структурная схема модели, решающей систему уравнений / 15 /, содержит 34 операционных усилителя, из них 6 интеграторов, 8 усилителей, входящих в состав 8 блоков перемножения, 7 сумматоров, 11 инверторов и одного усилителя, входящего в состав специального генератора периодических коэффициентов. Последний

предназначен для периодического скачкообразного изменения коэффициентов затухания в соответствии с двумя последними уравнениями системы / 15 /. Он состоит из электронного ключа, собранного на базе усилителя, инвертора, интегратора и двух сумматоров с инверторами.

Описанную схему можно набрать на двух аналоговых машинах типа МН-7. При этом в качестве двух инверторов используются усилители № 17, служащие для задания эталонного напряжения.

Расчеты, проведенные на описанной модели, показывают, что она устойчиво работает практически при любых параметрах асинхронных машин. С целью повышения точности решения, целесообразно напряжение вводить на два входа в виде двух составляющих:

$$U_{sd} \text{ и } U_{sp} \text{ . Наилучшие результаты получаются, когда } U_{sd} = U_{sp} = 0,87 \text{ .}$$

В работе приведены рассчитанные на модели графики переходного электромагнитного момента для двигателя МТ-6II-10, работающего в стационарном импульсном режиме с периодом коммутации $T = 2T_c$ и скважностью $\gamma = 0,1T$. Анализ их показывает, что двигатель, работающий в таком режиме, при отсутствии нагрузки на валу не сможет разогнаться до синхронной скорости, т.к. при малых скоростях вращения ротора интегральное значение электромагнитного момента становится отрицательным. Экспериментально это подтвердил С.А.Протанский, получивший при частоте коммутации 50 гц полный останов двигателя.

Таким образом, предлагаемая математическая модель позволяет рассчитывать нестационарные и стационарные импульсные ре-

жимы работы асинхронного двигателя с учетом переходных процессов.

Численные методы анализа системы уравнений / 15/, строго говоря, справедливы только для одной машины, по параметрам которой определены значения коэффициентов, входящих в уравнения. Применение системы относительных единиц распространяет эти исследования на группу машин, параметры которых в относительных единицах равны между собой. Абсолютные значения токов, потоков и др. величин машин, входящих в эту группу, разные и зависят от базовых значений токов и напряжений.

Таким образом, в системе относительных единиц 6 независимых критериев подобия машин: активные и индуктивные сопротивления статора и ротора, взаимная индуктивность и приведенный к валу двигателя момент инерции системы.

Не говоря уже о том, что группа машин, имеющих 6 одинаковых параметров весьма мала, исследование влияния каждого из них задача весьма трудоемкая даже при использовании вычислительной техники.

Анализ структурной схемы модели дифференциальных уравнений, описывающих асинхронную машину, позволяет уменьшить число критериев, определяющих характер переходных процессов. Предварительно условимся считать две машины подобными, если мгновенное значение X_1 какой-либо переменной величины первой машины во время t_1 и мгновенное значение X_2 той же величины второй машины в момент времени t_2 связаны между собой линейными зависимостями вида:

$$X_2 = aX_1 \text{ при } t_2 = bt_1,$$

где "а" и "в" - постоянные коэффициенты, зависящие от параметров машин.

В соответствии с принятым определением в структурных схемах моделей подобных машин коэффициенты передач при одинаковых переменных должны быть равны.

Все величины, относящиеся к первой машине будем записывать с индексом "0". Считая их известными, определим масштабы переменных второй машины, имеющей параметры, отличные от первой. В работе доказано, что в этом случае в системе уравнений для коэффициентов передач количество неизвестных /масштабов/ на четыре меньше числа уравнений. Такая система может быть решена, если 4 уравнения обратить в тождества.

Условия тождества этих уравнений:

откуда $\frac{d'_s K_r}{d'_{s0} K_{r0}} = \frac{d'_r K_s}{d'_{r0} K_{s0}}$, $\frac{d'_s}{d'_r} = \frac{d'_{s0}}{d'_{r0}}$

и $K_r \cdot K_s = K_{r0} \cdot K_{s0}$ или $K = K_0$.

Таким образом, исследование характера переходных процессов в асинхронных машинах при изменении их параметров можно свести к исследованию влияния параметра $\lambda = \frac{d'_s}{d'_r}$ и коэффициента связи "к" или коэффициента рассеяния σ .

В пятой главе разработаны методы расчета потерь в асинхронной машине при работе ее в импульсном режиме с незатухшем полем в роторе.

В таком режиме имеют место те же составляющие потерь, что и в неперывном, однако выражения для их определения существенно меняются.

Основные потери целесообразно представить в виде суммы

потерь Q_s рабочего периода и потерь Q_0 паузы.

В связи с тем, что потокосцепления и токи двигателя в импульсном режиме меняются по сложным законам, необходимо ввести понятие мгновенных потерь q_s и q_0 .

В рабочий период основные мгновенные потери состоят из потерь в меди и стали статора и ротора:

$$q_s = q_{sm} + q_{rm} + q_{sc} + q_{rc}$$

Потери в меди статора и ротора определяются квадратом модуля мгновенного значения, тока, а потери в стали - квадратом модуля вектора петскосцепления и угловой скоростью его вращения.

В период паузы ток статора равен нулю, затухающий поток ротора неподвижен относительно последнего, а поток статора вращается с угловой скоростью ротора. Поэтому в период паузы отсутствуют потери в меди статора и стали ротора.

Эффективные потери за какой-либо промежуток времени равны сумме всех мгновенных значений потерь, отнесенных к промежутку времени.

На основании этих рассуждений составлена система уравнений, удобная для вычисления потерь в рабочий период на аналоговой вычислительной машине:

$$Q_s = \int_0^{\delta} \frac{q_s - Q_0}{T} d\tau ;$$

$$q_s = q_{sm} + q_{rm} + q_{sc} + q_{rc} ;$$

$$q_{sm} = a_s (i_{sd}^2 + i_{sp}^2) ;$$

$$q_{rm} = a_r (i_{rd}^2 + i_{rp}^2) ;$$

$$i_{rd} = \frac{1}{x'_r} (\Psi_{rd} - k_s \Psi_{sd}) ;$$

$$i_{rp} = \frac{1}{x'_r} (\Psi_{rp} - k_s \Psi_{sp}) ;$$

$$q_{sc} = (a_{sr} \omega_{ps} + a_{sb} \omega_{ps}^2) (\psi_{sd}^2 + \psi_{sp}^2);$$

$$q_{rc} = (a_{rr} \omega_{pr} + a_{rb} \omega_{pr}^2) (\psi_{rd}^2 + \psi_{rp}^2);$$

$$i_{sd} = \frac{1}{x_s} (\psi_{sd} - k_r \psi_{rd});$$

$$i_{sp} = \frac{1}{x_s} (\psi_{sp} - k_r \psi_{rp}).$$

Точное определение угловых скоростей ω_{ps} и ω_{pr} вращения векторов ψ_s и ψ_r весьма трудоемко, т.к. связано с вычислением производных от аргументов этих векторов, которые состоят из двух составляющих, вращающихся с разными скоростями, определяемыми мнимой частью характеристического полинома. Достаточно хорошие приближения дает замена их средними значениями за время включенного состояния. При определении их средних значений исходим из того обстоятельства, что угол поворота вектора роторного потокосцепления при работе двигателя в стационарном импульсном режиме в рабочий период и в период паузы равны по величине и обратны по знакам. Действительно, анализируя уравнения / 8 / и / 9 /, нетрудно установить, что начальные и конечные потокосцепления в каждом цикле имеют то же значение модуля и фазы, что и в предыдущем. Следовательно, если вектор ψ_r за рабочий период повернулся на угол β_x , то за время паузы, чтобы вернуться к начальному значению $\psi_r(T)$, он должен повернуться на тот же угол β_x в обратном направлении.

Используя это положение, а также то обстоятельство, что во время паузы векторы вращаются с угловой скоростью вращения ротора, можно получить простое выражение для средней угловой скорости вращения вектора роторного потокосцепления.

Что касается скорости ω_{ps} вращения вектора ψ_s потокосцеплений статора, то она не подчиняется этой зависимости, т.к. годограф ψ_s в момент выключения имеет точку разрыва. Однако, как показывают расчеты, с практически достаточной точностью ω_{ps} можно определять из условия неразрывности потока.

Эффективные потери в период паузы определяются по формуле:

$$Q_\sigma = \frac{C |\psi_{r\infty}(\gamma)|^2 (1 - e^{-2\alpha_r \sigma})}{2\alpha_r \sigma}$$

где C — постоянный коэффициент, зависящий от параметров двигателя.

Потери за цикл определяются как средние за время включенного состояния и паузы:

$$Q = \frac{Q_s \cdot \delta + Q_\sigma \cdot \sigma}{T}$$

В шестой главе приведены результаты анализа импульсного режима работы асинхронной машины изложенными выше методами.

Наличие незатухшего магнитного потока в роторе машины оказывает существенное влияние на характер протекающих в ней процессов. В этом случае формы механических характеристик зависят не только от скважности, но и от частоты коммутации.

С целью определения формы механических характеристик, используя формулы, выведенные в главе 2, был произведен расчет на ЭЦВМ двигателя МТ-6II-10 при частотах коммутации 50 гц и 100 гц и различных скважностях. Полученные в результате расчета графики показывают, что при частоте коммутации 50 гц с ростом скважности может наблюдаться как увеличение так и уменьшение электромагнитного момента для одной и той же скорости вращения ротора. Уменьшение эффективного значения

момента при увеличении скважности объясняется тем, что при некоторых скоростях вращения ротора переходный момент становится знакопеременным. В результате эффективное его значение значительно уменьшается.

С увеличением частоты коммутации продолжительность включенного состояния становится меньше, поэтому существуют критические значения частот, выше которых продолжительность рабочего периода оказывается недостаточной, чтобы переходный момент изменил знак. Такие режимы более экономичны, а между средними за цикл значениями моментов и скважностью устанавливается прямая зависимость. Последнее обстоятельство дает возможность проще реализовать замкнутую систему автоматического импульсного регулирования скорости, необходимую для получения желаемой формы механических характеристик.

По мере дальнейшего увеличения частоты время переходного процесса в самом коммутаторе оказывается сравнимым с периодом коммутации, что приводит к необходимости уменьшать диапазон изменения скважности и, следовательно, диапазон регулирования скорости. Оптимальными для большинства приводов следует считать частоты коммутации 150 + 250 гц.

Результаты экспериментов хорошо подтвердили выводы, полученные расчетом.

На основании анализа переходных моментов установлено, что при работе двигателя в квазистационарном импульсном режиме с незатухающим током в роторе наблюдаются те же три характерные зоны скоростей, что и при включении двигателя с затухающим полем. При увеличении частоты коммутации до 100 + 150 гц общая законо-

мерность не изменяется, однако амплитудные значения ударных моментов становятся значительно меньше. При частотах коммутации выше 150 гц время включенного состояния оказывается меньше времени, необходимого для изменения знака переходного момента. В связи с этим увеличивается интегральное за цикл значение электромагнитного момента, особенно в зоне малых скоростей.

При частотах коммутации в диапазоне 25 + 75 гц и определенных значениях скважности может наблюдаться эффект частотного регулирования, когда угловая скорость идеального холостого хода определяется из соотношения:

$$\omega_{r0} = \omega_0 \pm \omega_r \cdot n$$

При определенных значениях скважности $n = -1$. В этом случае имеет место эффект частотного регулирования.

Следует отметить, что при частотно-импульсном регулировании наблюдаются знакопеременные моменты и поэтому длительная работа привода невозможна.

Для экспериментальной проверки результатов анализа была смонтирована специальная установка для регулирования скорости асинхронного короткозамкнутого двигателя типа А0-42-4.

Задача первого этапа экспериментальных исследований заключалась в определении режимов работы испытуемого двигателя при частотно-импульсном управлении в диапазоне частот коммутации от 10 до 100 гц.

В результате испытаний установлено, что при плавном повышении частоты коммутации от 10 гц до 50 гц скорость холостого хода двигателя снижается с 1070 об/мин до 0, фазный ток возрастает при этом в 1.5 раза, превышая в 1,1 + 1,2 раза ток при номинальной нагрузке.

При незначительном увеличении частоты выше 50 гц происходит скачкообразное увеличение скорости до номинальной, а при дальнейшем увеличении частоты скорость двигателя опять плавно снижается до 0.

В процессе проведения экспериментов удавалось реверсировать двигатель путем повышения частоты выше 50 гц, однако такой режим был весьма неустойчив.

При регулировании двигателя под нагрузкой скорость его в этом диапазоне частот коммутации изменялась по сложному закону, достигая максимумов на частотах 20, 30 и 60 гц. Токи в статорных обмотках во всем диапазоне частот коммутации превышали номинальные в 1,6 + 1,8 раза.

Испытание системы при частотах выше 100 гц подтвердили возможность плавного регулирования скорости от нуля до номинальной. Регулирование производилось двумя методами: изменением частоты при постоянной скважности и изменением скважности при постоянной частоте коммутации. Более эффективным оказался второй метод. В результате испытаний было установлено, что наибольший диапазон изменения скорости имеет место при изменении скважности на частотах коммутации 150 + 250 гц.

При увеличении частоты выше указанного предела диапазон регулирования скорости резко уменьшается за счет увеличения нижнего и уменьшения верхнего пределов. Регулирование на частотах коммутации ниже 150 гц было неустойчивым.

В результате испытаний на нагрев установлено, что потери в двигателе, работающем в импульсном режиме в диапазоне частот коммутации 150 + 250 гц, отличаются весьма незначительно от

аналогичного режима двигателя, полученного уменьшением напряжения на его статорных зажимах.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что при широтно-импульсном методе регулирования в оптимальном диапазоне частот коммутации потери в машине и ее механические характеристики такие же, как и при других методах регулирования скольжения двигателя за счет изменения тока в нем.

Метод частотно-импульсного регулирования аналогичен методам, использующим наложение механических характеристик.

В диссертации сопоставлены технико-экономические показатели импульсной системы с тиристорным коммутатором и аналогичные системы регулирования, применяемые в настоящее время.

Анализ стоимостных и качественных показателей различных систем регулирования скорости асинхронного двигателя с номинальной мощностью 50 квт и вентиляторным моментом нагрузки показал, что в сравниваемых условиях экономически целесообразно применять широтно-импульсную систему вместо систем с электромагнитными муфтами скольжения, дросселями насыщения, асинхронно-вентильных каскадов. В общем случае системы широтно-импульсного регулирования рационально применять для приводов с вентиляторным моментом нагрузки, при постоянном моменте нагрузки в случае глубокого, но непродолжительного снижения скорости, а также в случае продолжительного снижения скорости при небольшом диапазоне регулирования. Частотно-импульсные системы могут быть эффективно применены для регулирования скорости микроприводов в элементах систем автоматики, в тех случаях, например, когда требуются жесткие механические характеристики при сравнительно простых схемах управления.

ВЫВОДЫ

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что характер механических характеристик и энергетические показатели асинхронного короткозамкнутого двигателя, работающего в импульсном режиме при незатухшем потоке в роторе в значительной мере зависят от параметров коммутации.

В системах регулирования скорости с широтно-импульсной модуляцией при частотах коммутации, превышающих в несколько раз частоту питающей сети, механические характеристики двигателя и потери в нем такие же, как и при методах регулирования скольжения путем изменения напряжения на зажимах статора.

При частотно-импульсном регулировании в диапазоне частот коммутации, соизмеримых с частотой питающей сети, механические характеристики двигателя жесткие, а потери в машине такие же, как и при методах регулирования скольжения путем наложения механических.

2. Тиристорная схема с широтно-импульсным управлением рационально применять для плавного регулирования скорости асинхронных приводов с вентиляторным моментом нагрузки. Применение этих схем целесообразно также и при постоянном моменте нагрузки в случае глубокого, но непродолжительного снижения скорости, а также в случае продолжительного снижения скорости при небольшом диапазоне регулирования.

3. Для широтно-импульсных систем оптимальными следует считать частоты коммутации в диапазоне 150-250 гц. При меньших

частотах коммутации имеют место знакопеременные переходные моменты, отрицательно сказывающиеся на динамике и энергетике электропривода. Увеличение частоты выше оптимальной приводит к уменьшению диапазона регулирования скорости и увеличению времени механических переходных процессов.

4. Частотно-импульсный метод эффективно применять для глубокого регулирования и реверсирования микроприводов элементов систем автоматики в тех случаях, когда момент нагрузки мал по сравнению с номинальным моментом двигателя.

5. В результате аналитических исследований доказано существование квазиустановившегося импульсного режима при любых параметрах коммутации и любых реальных параметрах двигателя.

Впервые получено выражение для начального и конечного потоков в квазиустановившемся импульсном режиме. Пользуясь этим выражением и известными дифференциальными уравнениями, описывающими асинхронный двигатель, можно рассчитать механические характеристики и энергетические показатели асинхронного двигателя, работающего в квазиустановившемся импульсном режиме при заданных параметрах коммутации.

6. Разработанный графо-аналитический метод позволяет, не прибегая к трудоемким вычислениям, исследовать влияние параметров коммутации на модуль и фазу векторов начального и конечного потоков сцеплений.

7. Предлагаемый в работе метод качественного исследования переходного электромагнитного момента позволяет оценить значение и знак его при заданных положениях векторов начального и

конечного потоков.

8. В работе предложена методика синтеза, годографов начальных и конечных потокосцеплений при заданном законе импульсной модуляции. Это дает возможность исследовать импульсный режим работы асинхронной машины при различных законах импульсной модуляции.

9. Разработанный метод математического моделирования позволяет исследовать нестационарные импульсные режимы на относительно простых электронных моделях.

10. Анализ структурной схемы математической модели асинхронного двигателя позволил свести число критериев, определяющих характер переходных процессов, к двум вместо шести, что значительно сокращает трудоемкость численных методов анализа влияния параметров машины на характер переходных процессов.

11. Получены удобные выражения для расчета потерь в машине, работающей в импульсном режиме.

12. В результате технико-экономических сравнений различных существующих систем регулирования асинхронных двигателей установлено, что тиристорные системы с широтно-импульсной модуляцией экономически эффективнее систем с дросселями насыщения, а при большом годовом числе часов работы — систем с электромагнитными муфтами скольжения.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах автора.

1. Г. СНЕГУЛЬСКИЙ. Моделирование импульсного режима работы асинхронного двигателя, "Электропромышленность", вып. 314, 1968.

2. М. КРАЙЦБЕРГ, Г. СНЕГУЛЬСКИЙ. Импульсное регулирование асинхронных двигателей, "Электропромышленность", вып. 316, 1968 г.

3. Г. А. СНЕГУЛЬСКИЙ, М. И. КРАЙЦБЕРГ, В. И. ИОГ. Импульсное регулирование короткозамкнутых электродвигателей, Информ-электро, 1969.

4. А. И. ТАНАТАР, Г. А. СНЕГУЛЬСКИЙ, Ю. С. СОБОЛЕВ, Особенности импульсного режима асинхронного короткозамкнутого двигателя при незатухшем магнитном поле, "Электротехника" № 7, 1970.

Материалы диссертационной работы докладывались на XXVI научной конференции Днепропетровского инженерно-строительного института, XXVI научно-технической конференции Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института и научном городском семинаре по автоматике и автоматизированному электроприводу при Днепропетровском Доме Ученых.