

На правах рукописи



Чугулёв Александр Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ
ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ
ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ,
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Специальность 05.09.01 – Электромеханика
и электрические аппараты**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Омск – 2006

Работа выполнена на кафедре "Электроника и автотракторное электрооборудование" Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ)

Научный руководитель:

Заслуженный работник
Высшей школы РФ, доктор
технических наук, профессор
Попов Анатолий Петрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор
Харламов Виктор Васильевич

кандидат технических наук,
доцент
Коцарев Николай Федорович

Ведущая организация:

Федеральное государственное
унитарное предприятие
"Научно-производственный
центр "Полус"

Защита состоится 10 марта 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета К212.178.05 в Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, г.Омск, пр.Мира, 11, аудитория 6-340.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 3 » февраля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А.В. Бубнов

2006 А
2854

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Как известно, в системах электроснабжения в связи с увеличением числа полупроводниковых преобразователей, нелинейных и импульсных нагрузок возникает высокий уровень высших гармоник. В качестве источников питания различных электрических аппаратов, рассчитанных на синусоидальные режимы питания, в настоящее время распространение получают преобразователи частоты (ПЧ) модуляционного типа, использующие различные виды широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения.

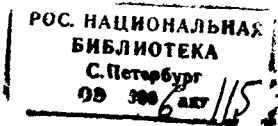
Значительное число работ посвящено рассмотрению влияния ШИМ на характеристики наиболее распространенного в промышленности потребителя, питаемого от ПЧ, – асинхронного двигателя (АД). Известно, что высшие гармоники создают дополнительные потери мощности в АД, задача расчета которых представляет известные трудности, хотя известны работы ряда авторов, посвященные решению этой проблемы.

Наиболее известные методики расчета потерь мощности частотно-регулируемых АД либо совсем не учитывают потери от несинусоидальности формы фактических статорных напряжений (токов) двигателя, либо базируются на приближенном расчете, не учитывая особенностей электромагнитных процессов в области высших гармоник.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является определение влияния высших гармонических составляющих питающего напряжения в условиях широтно-импульсной модуляции на энергетические характеристики асинхронных двигателей.

Для достижения поставленной цели потребовалось проведение исследований по следующим направлениям:

- обзор современной преобразовательной техники с ШИМ в системах электроприводов и способов реализации ШИМ;
- создание компьютерных моделей источников напряжения с ШИМ для исследования их спектров, а также для использования при моделировании электромагнитных процессов в электрических аппаратах;
- использование частотно-избирательных цепей для выделения отдельных гармонических составляющих из спектров напряжений с ШИМ;
- обоснование эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя для расчета потерь мощности от высших гармоник питающего напряжения с ШИМ;
- разработка методики расчета потерь мощности в асинхронном двигателе от высших гармоник питающего напряжения с ШИМ;
- разработка бесконтактного электронного измерителя механической мощности, момента на валу двигателя и специальных средств измерения для исследований энергетических характеристик асинхронных двигателей,



в том числе в условиях ШИМ;

– экспериментальное определение потерь мощности в асинхронном двигателе в условиях ШИМ.

Методы исследований. В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные с использованием теории линейных электрических цепей и электромагнитного поля, теории электрических машин и электропривода, методов статистической обработки данных. При исследованиях использовались современные прикладные программы Mathcad 2000 Professional и Micro-Cap 6.

Научная новизна работы. В данной работе получены следующие результаты, характеризующие ее научную новизну и выносимые на защиту:

– обоснована эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя для расчета потерь мощности в условиях ШИМ;

– предложена методика расчета потерь мощности в асинхронном двигателе от действия высших гармоник питающего напряжения с ШИМ с учетом поверхностного эффекта в пазах ротора произвольной формы;

– установлено, что соотношение между активной и реактивной составляющими полного сопротивления стержней ротора при различных формах паза практически не зависит от частоты высших гармонических составляющих спектра напряжения с ШИМ;

– разработан бесконтактный времяимпульсный способ измерения вращающего момента.

Практическая ценность работы. Практическую ценность представляют следующие результаты, полученные в ходе исследований:

• разработан бесконтактный датчик вращающего момента, основанный на предложенном времяимпульсном способе измерения, для различных областей применения;

• разработан стенд широкого назначения для исследований рабочих и механических характеристик асинхронных двигателей, рабочих машин, а также для контроля технологических процессов;

• разработаны компьютерные модели однофазного и трехфазного источников напряжения с ШИМ, представляющие интерес как для исследовательских целей, так и для использования в учебном процессе;

• впервые получены экспериментальные данные о влиянии несинусоидальности, обусловленной ШИМ, на характеристики индукционных реле направления мощности, индукционных реле тока, индукционных счетчиков электроэнергии и автоматических выключателей с термозлементами.

Апробация работы. Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Материал диссертации изложен на 169 страницах, включая 52 рисунка, 9 таблиц, 29 страниц приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, указаны научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о публикациях, структуре и основных вопросах, рассмотренных в главах диссертации.

Первая глава посвящена исследованию современного состояния преобразовательной техники в системах частотно-регулируемых асинхронных электроприводов.

В ходе обзора установлено, что наиболее актуальными в настоящее время являются исследования влияния несинусоидальности питающего напряжения на работу асинхронных двигателей в частотно-регулируемых электроприводах на основе автономных транзисторных инверторов напряжения с неуправляемыми выпрямителями, регулирование напряжения в которых осуществляется с использованием методов широтно-импульсной модуляции.

Рассмотрены основные характеристики, принципы формирования и критерии выбора несущей частоты ШИМ.

Показано, что в современных преобразователях частоты наибольшее распространение получила широтно-импульсная модуляция однополярных и двухполярных импульсов, когда ширина импульсов изменяется в течение полупериода по синусоидальному закону.

Во второй главе разработаны компьютерные модели однофазного и трехфазного источников напряжения с ШИМ, позволяющие изменять закон модуляции, уровень и частоту основной гармоники, несущую частоту и амплитуду импульсов фазного и линейного напряжений с ШИМ.

Проведено исследование спектрального состава однополярной синусоидальной ШИМ напряжения, соответствующей выходному напряжению преобразователя частоты Mitsubishi E500, используемого в экспериментальных исследованиях, проводимых в рамках данной работы. Определение спектра кривой напряжения осуществлялось с помощью программы Micro-Cap 6, в которой реализован графический метод определения гармоник ряда Фурье.

Для подтверждения полученных с помощью компьютерного моделирования спектров напряжений с ШИМ (т.е. получения достоверных результатов по спектральному анализу) в работе использованы частотно-избирательные LC-фильтры. Такие фильтры целесообразно использовать

для выборочного определения гармонических составляющих, которые, исходя из известной временной формы исследуемой функции, должны присутствовать в спектре.

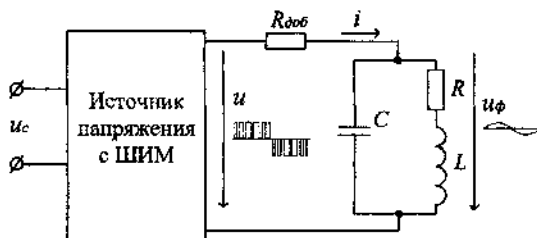


Рис. 1. Схема включения LC-фильтра

Действие LC-фильтров основано на эффекте резонанса токов, при этом они имеют узкую полосу пропускания и включаются в цепь, как показано на рис. 1.

Исходными данными для расчета являются: ω_0 – резонансная частота фильтра (равная частоте расчетной гармоники); Q – добротность фильтра (определяет ширину полосы пропускания и длительность переходного процесса фильтра); R – значение активного сопротивления катушки.

Относительно параметров L и C решается система уравнений

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}; \\ Q = \sqrt{\frac{C}{L}} / \left(\frac{R}{R^2 + (\omega_0 L)^2} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Определяется входное сопротивление LC-контура на резонансной частоте:

$$Z_{вх} = R_{вх} = \frac{R^2 + (\omega_0 L)^2}{R} \approx \frac{L}{C}. \quad (2)$$

Для придания источнику напряжения u свойств источника тока по отношению к резонансному контуру выбирается величина $R_{доб}$ (см. рис. 1) исходя из следующего условия: $R_{доб} \gg R_{вх}$.

После нахождения параметров частотно-избирательного контура измеряется действующее значение (или амплитуда) выходного напряжения резонансного фильтра U_ϕ .

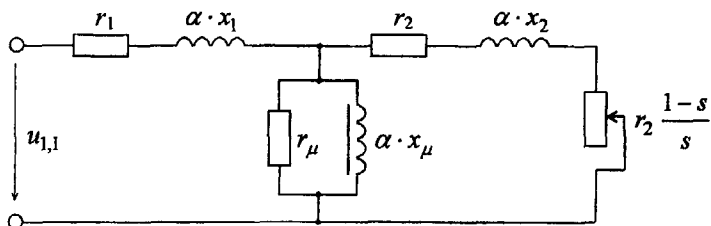
Расчет действующего значения (или амплитуды) искомой гармоники напряжения источника питания производится по выражению

$$U' = \frac{U_\phi}{R_{вх}} (R_{доб} + R_{вх}). \quad (3)$$

Данный принцип нахождения спектральных составляющих нагляден и представляет интерес в качестве доступного средства исследования гармоник ряда Фурье как при решении инженерных задач, так и в учебном процессе при использовании компьютерного моделирования.

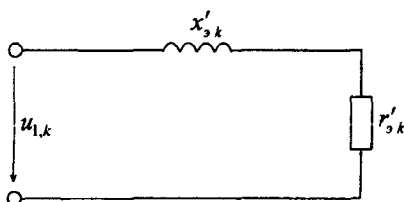
Полученные спектры напряжений послужили основой для исследования влияния ШИМ питающего напряжения на энергетические характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Для расчета потерь мощности в двигателе в условиях ШИМ эквивалентную схему замещения АД предлагается рассматривать в виде двух отдельных схем: для основной и для высших гармоник (рис. 2).



а) Для основной гармоники:

$U_{1,1}$ – основная гармоника питающего напряжения, В;
 S – скольжение; $\alpha = f_1 / f_{ном}$ – относительная частота статора;
 f_1 – частота основной гармоники питающего напряжения, Гц;
 $f_{ном}$ – частота номинального питающего напряжения (50 Гц);
 x_1, x_2 – индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора соответственно; r_1, r_2 – активные сопротивления обмоток статора и ротора; x_μ – индуктивность ветви намагничивания;
 r_μ – сопротивление, учитывающее потери в стали.



б) Для высших гармоник:

$x'_{\sigma k}$ – эквивалентное индуктивное сопротивление фазы асинхронного двигателя для k -й гармоники;
 $r'_{\sigma k}$ – эквивалентное активное сопротивление фазы асинхронного двигателя для k -й гармоники.

Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения для расчета потерь мощности в АД при питании от источника напряжения с ШИМ

Это вытекает из следующих допущений. В связи с тем, что в спектре напряжения с ШИМ практически отсутствуют высшие гармоники с частотами ниже несущей частоты (которая в современных преобразователях составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч герц), ротор, с учетом того, что его обмотка выполнена в виде короткозамкнутых стержней, для магнитных полей высших гармоник можно рассматривать как неподвижное цилиндрическое тело с высокой удельной проводимостью (т.е. величина скольжения двигателя $s \approx 1$). При этом величина магнитной индукции, как в роторе, так и в статоре асинхронной машины по высшим гармоникам будет много меньше индукции магнитного поля на основной гармонике, что позволяет пренебречь действием сопротивлений r_μ , x_μ и свести эквивалентную схему замещения для высших гармоник к схеме рис. 2, б.

Обзор существующих методов определения потерь мощности в асинхронном двигателе в условиях несинусоидальности питающего напряжения показал, что подавляющее их большинство базируется на приближенном расчете, не учитывая особенностей электромагнитных процессов в области высших гармоник либо вообще пренебрегает потерями мощности от высших гармоник.

Предложенная методика определения потерь мощности в асинхронном двигателе от действия высших гармоник при питании от источника напряжения с ШИМ основана на эквивалентной схеме замещения для высших гармоник, представленной на рис. 2, б, при этом предполагается, что основные потери мощности от высших гармоник сосредоточены в обмотке ротора.

Выделено три основных этапа расчета по данной методике:

- 1) определение гармонического спектра питающего напряжения;
- 2) определение эквивалентных параметров схемы замещения двигателя в зависимости от частоты гармоники;
- 3) расчет потерь мощности по каждой гармонике с использованием схемы замещения для высших гармоник и последующее их суммирование.

При определении параметров схемы замещения АД основную сложность представляет расчет полного сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора для высших гармоник с учетом поверхностного эффекта.

Рассмотрим паз ротора АД, заполненный проводником, по которому протекает синусоидальный ток заданной частоты (рис. 3).

Расчет полного сопротивления стержня ротора для высших гармоник с учетом поверхностного эффекта в общем случае может быть выполнен на основе решения уравнений Максвелла, которые для квазистационарного состояния относительно векторов \vec{H} и \vec{E} имеют вид

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = -\mu \frac{d\dot{\vec{H}}}{dt}; \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = \dot{\vec{E}}. \quad (5)$$

Из этих уравнений, как известно, вытекает дифференциальное уравнение (при известных условиях на границах раздела сред и для любой формы паза) относительно напряженности магнитного поля

$$\nabla^2 \dot{\vec{H}} = j\omega\gamma\mu_a \dot{\vec{H}}. \quad (6)$$

Для случая прямоугольной формы паза решение уравнений (4) – (5) упрощается за счет сведения рассматриваемой двумерной задачи к одномерной. Тогда решение уравнения (6) относительно вектора \dot{H}_y будет иметь вид

$$\frac{d^2 \dot{H}_y}{dx^2} = j\omega\gamma\mu_a \dot{H}_y. \quad (7)$$

После определения \dot{H}_y , из (7) на основании (5) для рассматриваемой одномерной задачи можно определить напряженность электрического поля следующим образом

$$\dot{E}_z = -\frac{1}{\gamma} \frac{d\dot{H}_y}{dx}. \quad (8)$$

Для определения полного сопротивления проводника, находящегося в пазу прямоугольного сечения, необходимо решение уравнений (7) и (8) относительно \dot{H}_y и \dot{E}_z внутри проводника в зависимости от координаты x .

При рассматриваемой сложной форме паза (см. рис. 3) также возможно численное решение данной задачи. Однако в условиях нелинейности характеристик сред и сложных геометрических форм границ раздела сред возможно только приближенное решение.

Предложен расчет эквивалентных параметров обмотки ротора для высших гармоник на основе графического метода расчета полного сопротивления проводника, находящегося в пазу произвольного сечения, с учетом поверхностного эффекта. Данный метод основан на применении закона полного тока и закона электромагнитной индукции для элементарных

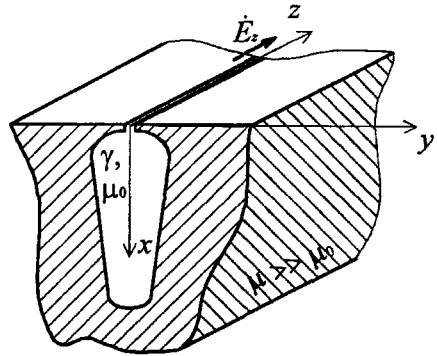


Рис. 3. Паз ротора асинхронного двигателя, заполненный проводником

слоев достаточно малой толщины δ_n , параллельных оси y (рис. 4), на которые подразделяется паз.

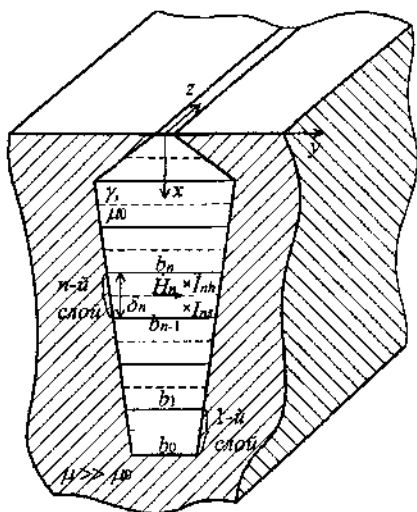


Рис. 4. Упрощенное представление сечения паза ротора АД, заполненного проводником

тока во всей нижней половине полосы σ_{ns} , а в верхней половине σ_{nh} . Соответственно ток \dot{I}_n разделится на две составляющие: \dot{I}_{ns} и \dot{I}_{nh} , отличающиеся друг от друга по величине и по фазе.

На основании закона электромагнитной индукции и закона полного тока, с учетом вышеуказанного, а также допущения, что магнитное поле, обусловленное протекающими в проводнике токами, распределено линейно по толщине δ_n (в связи с ее малостью), получено выражение, определяющее величину тока в верхней половине n -й полосы:

$$\dot{I}_{nh} = \dot{I}_{ns} \frac{b_n}{b_{n-1}} - j\omega\mu_0\delta_n^2 \dot{F}_n \frac{b_n}{b_{n-1} + b_n} = \dot{I}_{ns} \frac{b_n}{b_{n-1}} - j\Delta\dot{I}_n, \quad (9)$$

где $|\Delta\dot{I}_n| = \omega\mu_0\delta_n^2 |\dot{F}_n| \frac{b_n}{b_{n-1} + b_n}$ — абсолютное значение приращения тока, создаваемого за счет поверхностного эффекта в n -й полосе; \dot{F}_n — магнитодвижущая сила (МДС), действующая по длине средней линии n -й полосы; \dot{I}_{ns} — величина тока нижней половины n -й полосы [определяемая с учетом того, что плотность тока известна по верхней половине предыдущей ($n-1$)-й полосы].

В основе метода лежат следующие допущения. Проводник выполнен из проводящего материала с магнитной проницаемостью $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ и с известной проводимостью γ , магнитная проницаемость стали $\mu \gg \mu_0$ (при расчетах принимается $\mu = \infty$), форма и размеры паза заданы, длина паза в направлении, перпендикулярном плоскости сечения, много больше высоты паза.

Плотность тока под действием индуктированных вихревых токов на нижней и верхней границах полос будет различной как по величине, так и по фазе. При достаточно малой толщине δ_n

предполагается, что плотность

На основании выражения (9) строится векторная диаграмма токов проводника в пазу. Так как искомое полное сопротивление не зависит от тока, расчет и построение ведутся непосредственно в миллиметрах, при этом вектор тока в нижней половине первой полосы выбирается произвольно.

После построения векторной диаграммы полное сопротивление проводника на единицу длины паза определяется по выражению

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{2}{b, \delta, \gamma} \frac{|\dot{I}_{rh}|}{|\dot{I}|}, \quad (10)$$

где \dot{I}_{rh} – ток в верхнем слое последней (r -й) полосы (полученный из векторной диаграммы); \dot{I} – полный ток проводника (полученный из векторной диаграммы).

Далее определяется угол сдвига фаз между токами \dot{I}_{rh} , \dot{I} и вычисляется активная и реактивная составляющие сопротивления Z .

В результате расчета, выполненного для асинхронного двигателя АИР100L4УЗ, установлено, что отношение реактивной составляющей полного сопротивления стержня ротора к активной составляющей остается постоянным независимо от частоты (также установлена независимость данного отношения от частоты для прямоугольной формы паза).

Полное активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки фазы ротора находятся с учетом сопротивлений проводников лобовой части ротора. Полученные таким образом сопротивления ротора для k -й гармоники суммируются с соответствующими сопротивлениями обмотки статора (активным сопротивлением и индуктивным сопротивлением рассеяния обмотки статора), т.е. определяются параметры эквивалентной схемы замещения АД для высших гармоник для расчета электрических потерь в двигателе. В связи с тем, что поверхностный эффект в обмотках статора проявляется незначительно, влиянием частоты высших гармоник на параметры обмотки статора решено пренебречь.

Полученные в результате расчета, проведенного для двигателя АИР100L4УЗ, значения сопротивлений получили подтверждение при помощи проведенного эксперимента по определению параметров эквивалентной схемы замещения двигателя для высших гармоник. Эксперимент проводился с использованием установки, схема которой приведена на рис. 5.

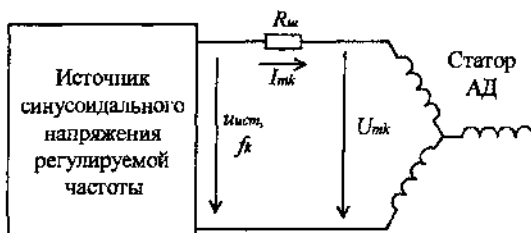


Рис. 5. Установка для определения параметров эквивалентной схемы замещения АД для высших гармоник

Эквивалентные сопротивления асинхронного двигателя определялись следующим образом. По измеренным амплитудам входного тока I_{mk} и приложенного к двигателю напряжения U_{mk} находилось полное эквивалентное сопротивление фазы двигателя для частоты f_k :

$$Z_k = \sqrt{(x'_{s,k})^2 + (r'_{s,k})^2} = \frac{U_{mk}}{2 \cdot I_{mk}}. \quad (11)$$

Для нахождения активной и реактивной составляющих полного сопротивления определялся угол сдвига фаз между входным током и напряжением.

Выполнен расчет потерь мощности и КПД исследуемого асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с ШИМ в диапазоне частот основной гармоники питающего напряжения 25 ... 50 Гц. В результате расчета установлено, что модуляционные потери в исследуемом двигателе (при несущей частоте 700 Гц) остаются примерно постоянными в указанном диапазоне частот и составляют около 10 % от общих номинальных потерь.

Третья глава посвящена разработке специальных средств измерения для проведения исследований энергетических характеристик асинхронного двигателя в условиях широтно-импульсной модуляции с целью подтверждения предложенной во второй главе методики расчета модуляционных потерь.

Обзор существующих на рынке средств измерения мощности и электроэнергии показал, что изготавливаемые для промышленности ваттметры и счетчики не предназначены для измерений в системах с ШИМ и нет опубликованных данных об их экспериментальных исследованиях в таких системах.

Создан специальный трехфазный электронный измеритель активной мощности для цепей с широтно-импульсной модуляцией.

В качестве первичных измерительных преобразователей устройства использованы трансформаторы тока и резисторные делители напряжения.

Оценка погрешности трансформаторов тока была выполнена на установке с источником ШИМ и активной нагрузкой с использованием амперметров электромагнитной и термоэлектрической систем. Установлено, что погрешность трансформаторов тока в режиме ШИМ не превышает 0,2 % по сравнению с синусоидальным режимом питания.

В качестве элементов, осуществляющих функцию перемножения мгновенных значений напряжения и тока, использованы интегральные схемы КР555ПС2А, имеющие частотный диапазон входных сигналов, перекрывающий спектры исследуемых напряжений и токов с ШИМ. Градуировка измерителя мощности выполнена с помощью образцового ваттметра электродинамической системы типа Д533 с классом точности 0,2.

Разработан специальный счетчик электрической энергии для измерений в цепях с ШИМ, содержащий в своем составе представленный выше электронный измеритель активной мощности и импульсный интегратор, позволяющий получить, как известно, высокую точность измерения.

Для экспериментального определения энергетических показателей асинхронного двигателя в условиях ШИМ также возникла необходимость измерения вращающего момента на его валу.

В работе приведен обзор современных способов и средств измерения вращающих моментов. Показано что существующие способы обладают недостатками, связанными как со сложностью реализации, так и с низкой точностью измерений.

Предложен времяимпульсный способ измерения вращающего момента, который осуществляется следующим образом. Два соосных вала соединяют через упругий элемент (см. рис. 6). На концах упругого элемента устанавливаются ферромагнитные зубцы. При отсутствии вращающего момента угловое смещение по окружности между первым и вторым зубцами равно нулю. Параллельно осевой линии валов на общем с двигателем и нагрузочным механизмом основании установлены два магнитных датчика таким образом, что при вращении валов в момент прохождения любого из зубцов через магнитное поле соответствующего датчика последний вырабатывает двухполярный импульс ЭДС, а момент перехода импульса ЭДС через нуль соответствует минимальному расстоянию между вершиной зубца и сердечником магнитного датчика.

Если вращающий момент не равен нулю, упругий элемент скручивается, а угол между первым и вторым зубцами становится отличным от нуля. Интервал времени между импульсами первого и второго магнитных датчиков Δt будет прямо пропорционален углу скручивания упругого элемента (т.е. вращающему моменту) и обратно пропорционален угловой скорости вращения зубцов.

В данных условиях величина измеряемого вращающего момента

$$M = \frac{\Delta t}{T} \cdot K_2,$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности; T – период вращения вала двигателя.

Предлагаемый способ позволяет измерять величину вращающего момента независимо от скорости вращения вала. По метрологическим характеристикам он имеет преимущества по сравнению с известными. Это обусловлено тем, что измерение вращающего момента сводится к измерению интервалов времени, что может быть осуществлено с высокой точностью. На способ измерения вращающего момента получен патент на изобретение.

На основе предложенного способа измерения разработан датчик вращающего момента. На рис. 6 представлен упругий элемент датчика вращающего момента на валу АД и магнитные датчики угла скручивания упругого элемента, а на рис. 7 – структурная электрическая схема устройства.

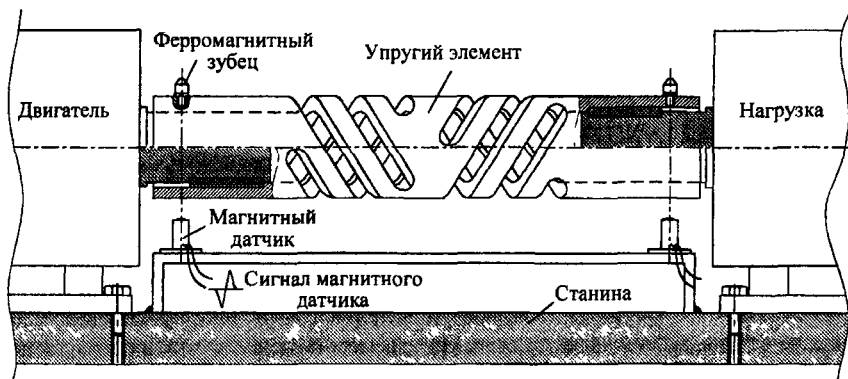


Рис. 6. Механическая часть датчика вращающего момента

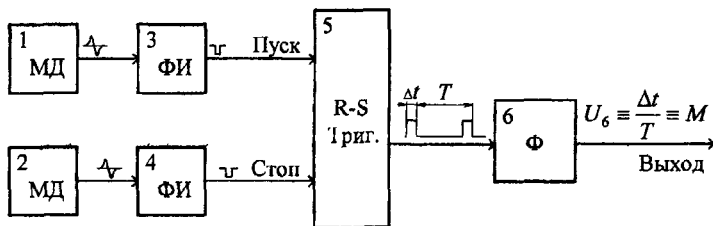


Рис. 7. Структурная схема датчика вращающего момента:
1 и 2 – магнитные датчики; 3 и 4 – формирователи коротких импульсов; 5 – R-S-триггер; 6 – сглаживающий RC-фильтр

Для градуировки датчика была создана установка с асинхронным двигателем, питаемым от источника синусоидального напряжения. В ходе эксперимента снимались величины выходного напряжения датчика вращающего момента, а действительное значение вращающего момента определялось по входной мощности АД, паспортному значению КПД двигателя и частоте вращения вала. В качестве нагрузки двигателя использовался генератор постоянного тока со смешанным возбуждением. Измерение периода вращения вала АД проводилось образцовым частотомером ЧЗ-54.

В результате анализа опытных значений получена практически линейная зависимость между вращающим моментом и выходным сигналом датчика (отклонения от линейности – порядка 1 %). Нелинейность в основном определяется гистерезисными явлениями. Как известно, современ-

ные материалы, из которых изготавливаются упругие элементы, позволяют создать приборы, для измерения сил и моментов с основной погрешностью порядка сотых долей %.

Четвертая глава посвящена экспериментальному подтверждению результатов расчетов потерь мощности от высших гармоник питающего напряжения с ШИМ в асинхронном двигателе АИР100L4УЗ, проведенных с использованием предложенной во второй главе методики.

Рассмотрены основные методы определения потерь мощности и КПД асинхронного двигателя.

В работе использован метод непосредственного определения потерь мощности и КПД двигателя в условиях ШИМ питающего напряжения с применением специальных измерительных средств, разработанных в третьей главе. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 8.

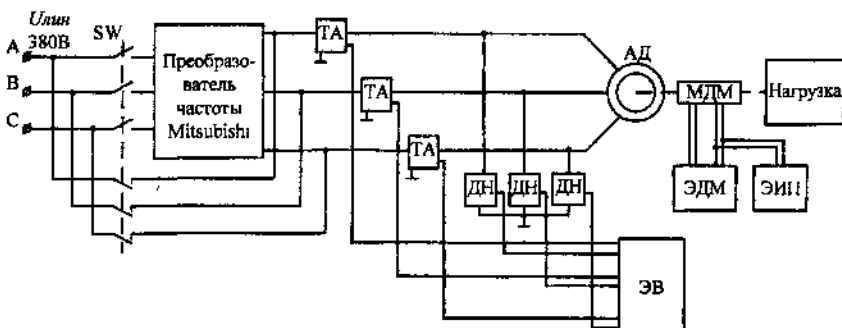


Рис. 8. Экспериментальная установка по определению энергетических характеристик АД в условиях ШИМ питающего напряжения

ТА – трансформатор тока; ДН – датчик напряжения; ЭВ – электронный трехфазный ваттметр; МДМ – механическая часть датчика вращающего момента; ЭДМ – электронная часть датчика вращающего момента; ЭИП – электронный измеритель периода вращения (ЧЗ-54)

Модуляционные тепловые потери при обеспечении постоянного значения выходной мощности асинхронного двигателя определялись следующим образом:

$$\Delta P_{\text{mod}} = P_{1, \text{ШИМ}} - P_{1, \text{син}} \quad \text{при} \quad \begin{cases} n = \text{const}; \\ M_n = \text{const}, \end{cases}$$

где $P_{1, \text{ШИМ}}$ – потребляемая асинхронным двигателем мощность в условиях ШИМ питающего напряжения; $P_{1, \text{син}}$ – потребляемая асинхронным двигателем мощность при синусоидальном питающем напряжении; n – частота вращения вала асинхронного двигателя; M_n – вращающий момент на валу асинхронного двигателя.

На рис. 9 представлены графики зависимостей КПД двигателя от вращающего момента при частотах основной гармоники питающего напряжения $f_1 = 25 \dots 50$ Гц (закон частотного регулирования $U_1 / f_1 = \text{const}$, несущая частота ШИМ – 700 Гц), а на рис. 10 – зависимости потерь мощности от выходной механической мощности АД при частоте $f_1 = 50$ Гц. Как видно из представленных графиков, экспериментальные данные подтверждают результаты расчета потерь мощности в двигателе в условиях ШИМ, выполненного по предложенной во второй главе методике.

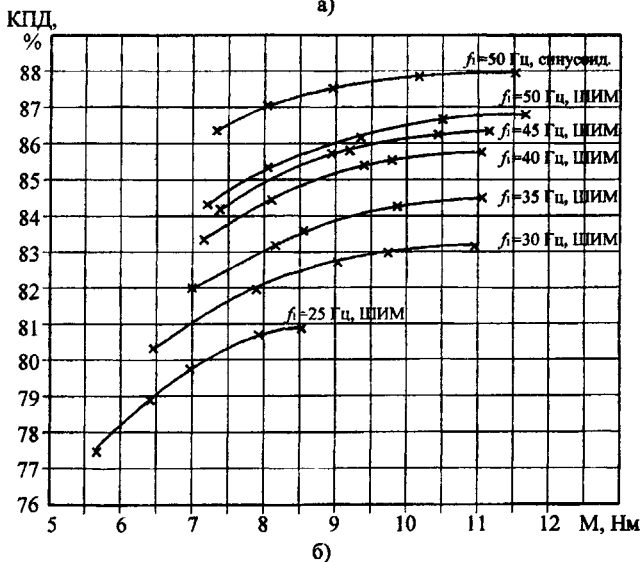
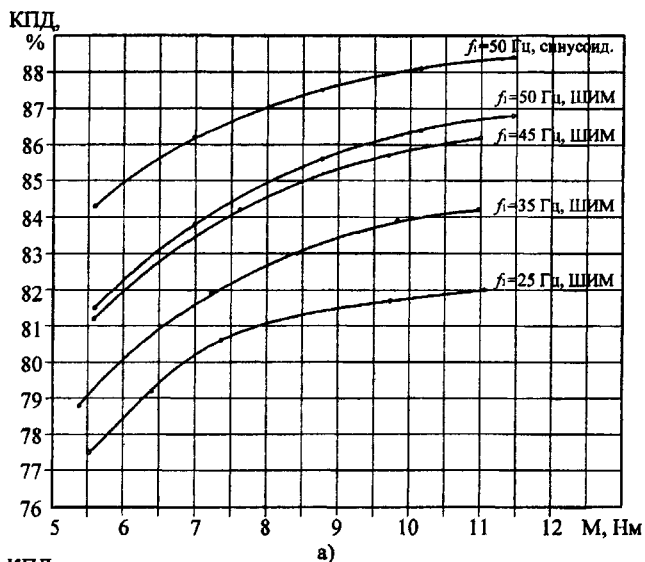


Рис. 9. Графики зависимостей КПД двигателя от момента при различных частотах основной гармоники f_1 : а – зависимости, построенные по результатам расчетов; б – зависимости, построенные по данным эксперимента

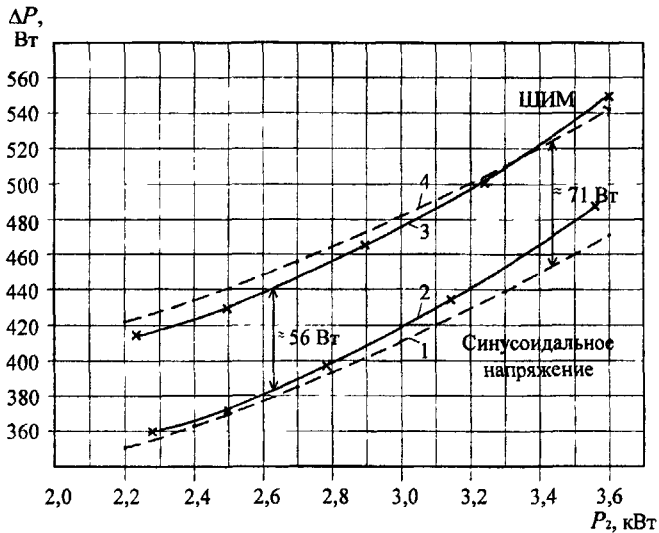


Рис. 10. Графики зависимостей потерь мощности от механической мощности на валу АД:

1, 4 – при синусоидальном напряжении и в режиме ШИМ соответственно, полученные по результатам расчета, выполненного во второй главе; 2, 3 – при синусоидальном напряжении и в режиме ШИМ соответственно, полученные по результатам эксперимента (несущая частота в режиме ШИМ – 700 Гц)

В приложении А приведены данные экспериментальных исследований влияния несинусоидальности питающего напряжения, обусловленной ШИМ, на работу индукционных счетчиков электроэнергии, индукционных реле тока, индукционных реле напряжения, индукционных реле направления мощности и автоматических выключателей.

Актуальность таких исследований обусловлена тем, что в настоящее время преобразователи частоты с ШИМ получают распространение в качестве источников питания различных электрических аппаратов, рассчитанных на синусоидальные режимы питания.

В результате проведенных экспериментов получены следующие результаты, представляющие практическую ценность:

1) в условиях ШИМ время срабатывания реле направления мощности возрастает на величину до 42 %, а показания индукционного счетчика электроэнергии меньше реальных значений также до 42 % (исследования были проведены с использованием разработанного в третьей главе электронного счетчика электроэнергии для цепей с ШИМ);

2) время срабатывания индукционных реле тока и напряжения в условиях ШИМ увеличивается на величину до 14 % по сравнению с синусои-

дальним режимом питания;

3) при протекании тока с высоким содержанием гармоник время срабатывания автоматических выключателей сокращается, что объясняется эффектом вытеснения тока на поверхность термического элемента и соответственно более интенсивным его нагреванием. При этом время срабатывания автоматических выключателей в условиях ШИМ по сравнению с синусоидальным режимом уменьшается на величину до 13 %.

В приложении Б приведены осциллограммы фазного напряжения и токов асинхронного двигателя при различных режимах его работы в условиях ШИМ, схемы разработанных устройств, а также акты о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс и производство.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенной работы получены следующие результаты.

1. Разработаны компьютерные модели однофазного и трехфазного источников напряжения с ШИМ в системе схемотехнического моделирования Micro-Cap 6, которые представляют интерес для исследовательских целей, а также могут быть использованы в процессе обучения студентов электротехнических специальностей.

2. Получено подтверждение спектрального состава кривых напряжения с ШИМ компьютерных моделей источников питания с помощью методики определения выборочных спектральных составляющих напряжений, основанной на использовании частотно-избирательных LC-фильтров.

3. Обоснована эквивалентная схема замещения для расчета потерь мощности в асинхронном двигателе в условиях ШИМ.

4. Разработана и экспериментально подтверждена методика расчета потерь мощности в двигателе от действия высших гармоник питающего напряжения с ШИМ.

5. Выполнен расчет эквивалентных параметров обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя для высших гармоник с использованием графического метода расчета полного сопротивления проводника в пазу произвольной формы с учетом поверхностного эффекта. Установлено, что для пазов грушевидной и прямоугольной форм отношение реактивной составляющей полного сопротивления стержня ротора к активной составляющей остается постоянным независимо от частоты.

6. Показано, что потери мощности от высших гармоник в асинхронном двигателе при изменении частоты вращения и нагрузки на его валу постоянны (при неизменной несущей частоте ШИМ). Их величина (при несущей частоте 700 Гц) в исследуемом двигателе составляет около 10 % от общих номинальных потерь, при этом модуляционными потерями в стали ввиду их малой величины можно пренебрегать.

7. Разработаны времяимпульсный способ измерения вращающего момента и бесконтактный датчик вращающего момента на его основе, который может быть использован в приводах различного назначения, а также стенд для исследований рабочих, механических и нагрузочных характеристик приводов различного назначения.

8. Получены экспериментальные данные о влиянии ШИМ на характеристики трансформаторов тока, индукционных реле, индукционных счетчиков электроэнергии и автоматических выключателей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. О потерях в асинхронных двигателях и погрешностях индукционных счетчиков электроэнергии в системах с частотными преобразователями / А.П. Попов, А.О. Чугулёв, А.А. Горшенков, С.М. Клеванский // *Электрика*. – 2004. – № 5. – С. 33–34.

2. Пат. 2245236 РФ: МПК В23К 11/24: Цифровой дозатор электроэнергии для точечной сварки / А.П. Попов, А.О. Чугулёв, А.Ю. Власов; СибАДИ. – №2003103875/02; заявл. 10.02.2003; опубл. 27.01.2005, Бюл. № 3.

3. Пат. 2265809 РФ: МПК G01L 3/10: Способ измерения крутящего момента / А.П. Попов, А.О. Чугулёв, А.А. Горшенков; СибАДИ. – №2004105889/28; заявл. 27.02.2004; опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34.

4. Попов А.П., Чугулёв А.О., Горшенков А.А., Клеванский С.М. Влияние широтно-импульсной модуляции на погрешность индукционных счетчиков электроэнергии и на потери в асинхронном двигателе / Сиб. гос. автомоб.-дор. академия. – Омск, 2003. – 6 с. – Деп. в ВИНТИ 29.12.2003, №2299-В2003.

5. Чугулёв А.О. Методика расчета потерь мощности в асинхронном двигателе от действия высших гармоник питающего напряжения с широтно-импульсной модуляцией / Сиб. гос. автомоб.-дор. академия. – Омск, 2005. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 20.10.2005, №1351 – В2005.

6. Чугулёв А.О. Об эквивалентной схеме замещения асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией // *Качество. Инновации. Наука. Образование: Материалы Международной науч.-техн. конф.*, 15 – 17 ноября 2005. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. – Кн. 1. – С. 101–104.

7. Чугулёв А.О. Расчет полного сопротивления проводника в фазу произвольного сечения ротора асинхронного двигателя для высших гармоник / Сиб. гос. автомоб.-дор. академия. – Омск, 2006. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ. 17.01.2006, №39 – В2006.

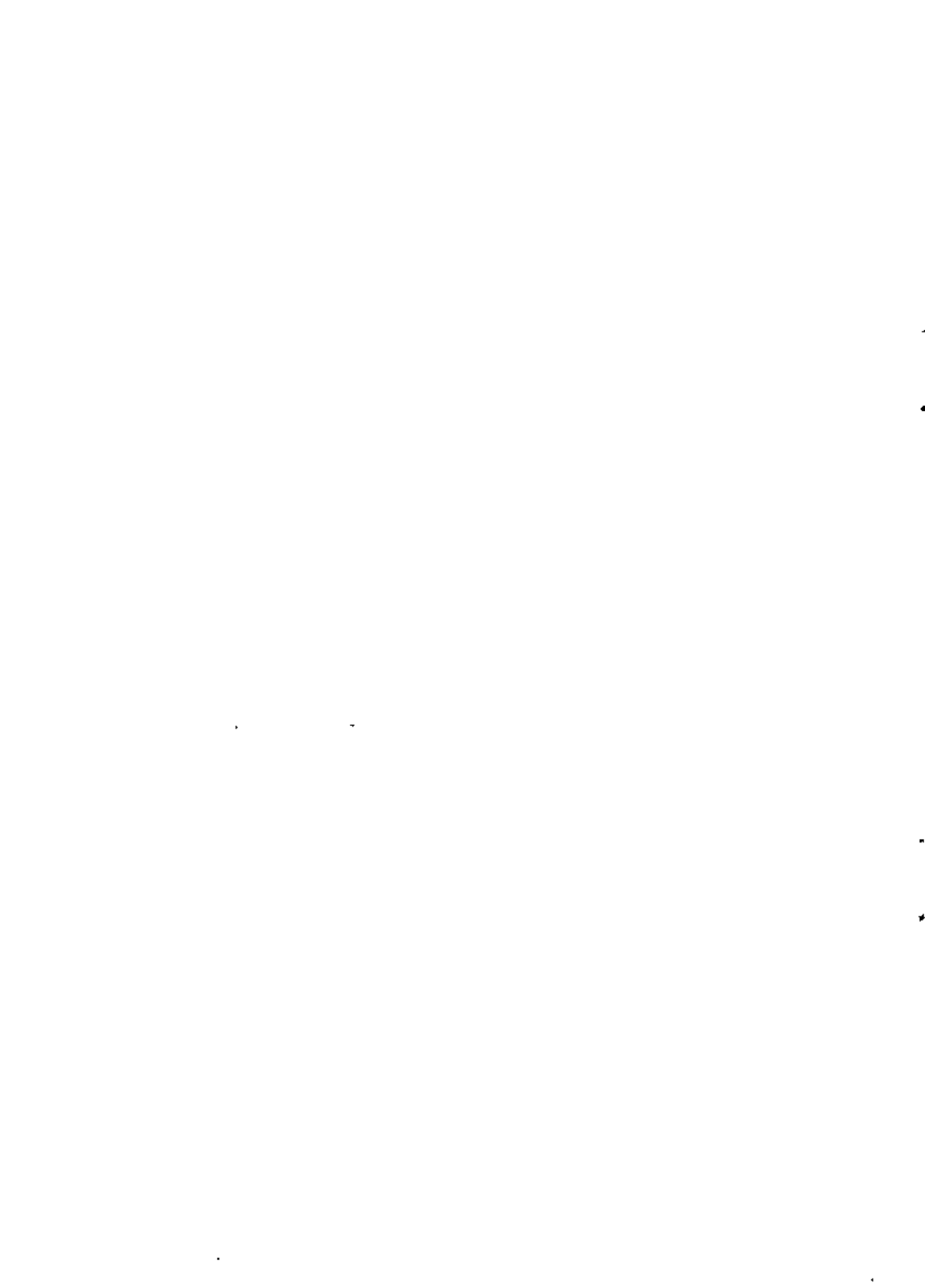
8. Чугулёв А.О. Способ выделения спектральных составляющих источника напряжения с широтно-импульсной модуляцией с использованием компьютерного моделирования / Сиб. гос. автомоб.-дор. академия. – Омск, 2005. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ 23.05.2005, №725 – В2005.

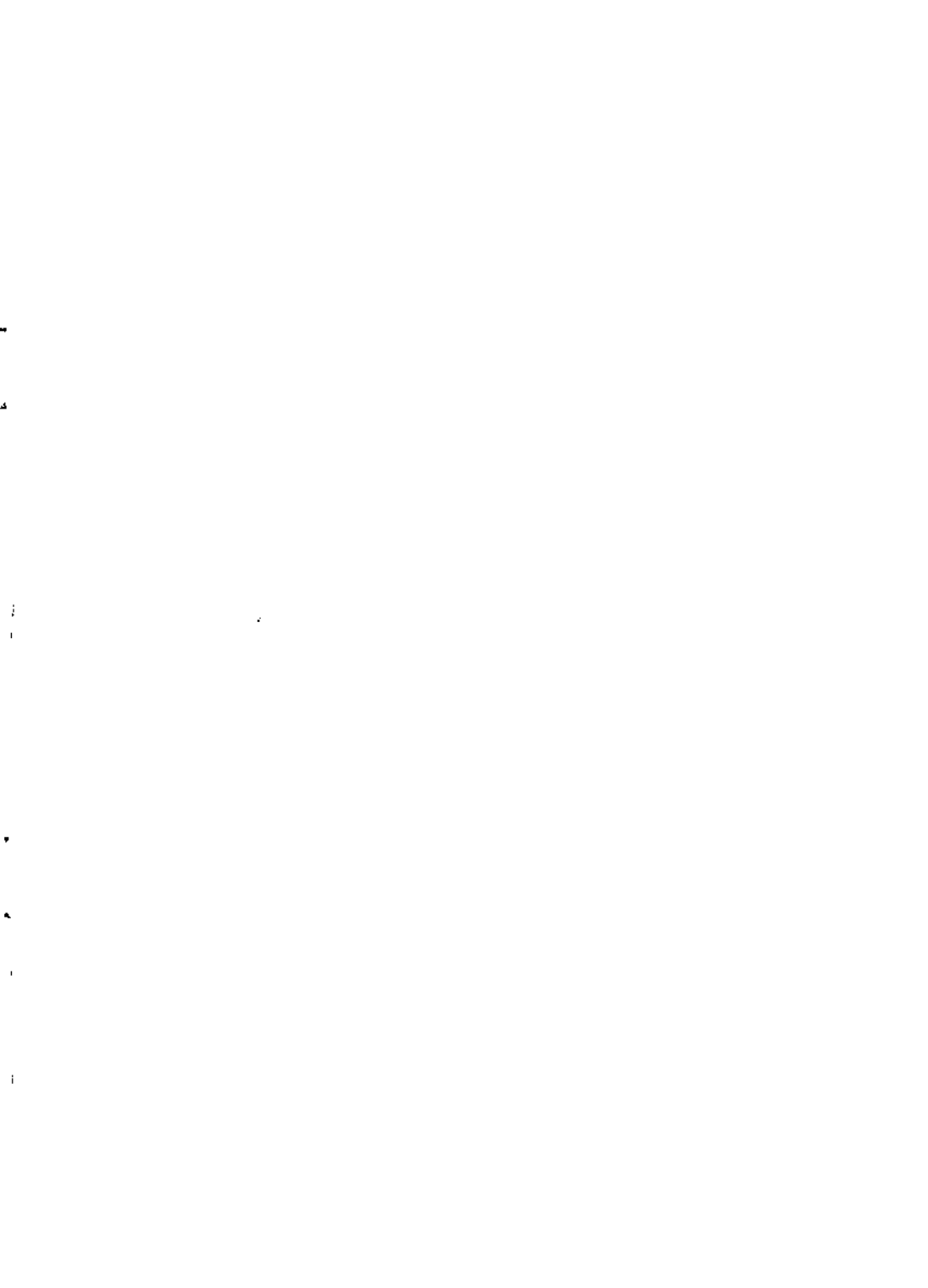
Личный вклад. В работах [1, 4] автором предложены методики экспериментальных исследований индукционных счетчиков электроэнергии и АД в условиях ШИМ. В работах [2, 3] выделить результаты, принадлежащие одному из соавторов, не представляется возможным. Доля каждого участника оценивается как равная.

Подписано к печати «30» января 2006г.
Формат 60×90 1/16. Бумага писчая.
Оперативный способ печати.
Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 9

Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ
644099, Омск, ул. П. Некрасова, 10







2006A
2854

P-2854