

Министерство образования и науки Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия

Неня Тимофей Олегович

УДК 62-83:62-50

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА С  
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ПРОДОЛЬНЫХ И  
ПОПЕРЕЧНЫХ НЕСИММЕТРИЯХ В ПЕРВИЧНОЙ ЦЕПИ  
ТРАНСФОРМАТОРА**

Специальность 8.5070204 - Электромеханические системы автоматизации и  
электропривод

Автореферат магистерской работы

Краматорск 2014

Магистерская работа является рукописью

Работа выполнена в Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) Министерство образования и науки Украины, г.

Краматорск

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент,  
Климченкова Наталия Валериевна,  
Донбасская государственная  
машиностроительная академия,  
доцент кафедры «Электромеханические  
системы автоматизации».

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Эксплуатация асинхронных двигателей зачастую сопровождается различного рода аномалиями. Одной из наиболее распространенных аномалий является нестабильное напряжение сети. Отклонения напряжения могут достигать 15 и более процентов, что превышает допустимое значение. Изменение напряжения может привести к росту тока в обмотках асинхронного двигателя, к увеличению потерь, росту температуры обмоток асинхронной двигателя и в результате – к досрочному выходу его из строя. Поэтому исследования, которые направлены на изучение особенностей режимов работы асинхронных двигателей в условиях постоянной несимметрии напряжений сети и на разработку устройств контроля и облегчение режима работы этих двигателей при продольных и поперечных несимметриях в обмотке статора является актуальной задачей.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы кафедры "электромеханические системы автоматизации", ДГМА.

### **Цель и задачи исследования.**

Цель магистерской работы – исследование асинхронных двигателей в условиях ненормального напряжения питания при различных уровнях нагрузки. Исходя из цели, поставлены следующие задачи:

–разработать алгоритм формирования комплексов линейных и фазных напряжений по измеренным экспериментально действующим значениям;

–разработать алгоритм уточненного определения коэффициента трансформации трехфазного двухобмоточного трансформатора;

–усовершенствовать методы анализа электромеханических характеристик при изменении напряжения сети учетом нелинейных зависимостей параметров намагничивающего и вторичного контура асинхронного двигателя.

**Объектом исследований** является асинхронный двигатель.

**Предмет исследований** – электромеханические характеристики асинхронного двигателя в различных режимах работы при изменении напряжения сети.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использовались методы математики, электротехники и электромеханики и программные пакеты. В области математики – матричная алгебра, теория комплексных чисел, метод наименьших квадратов, методы интерполяции; электротехники и электромеханики – методы симметричных составляющих, теории электрических цепей, эквивалентных электрических схем замещения. При решении вычислительных и офисных задач применялись Microsoft Word, Microsoft Excel, Mathcad 14, Electronics Workbench.

**Научная новизна полученных результатов:**

- усовершенствована методика расчета электромеханических характеристик асинхронного двигателя, которая дополнена учетом нелинейной зависимостью параметров Т-образной схемы замещения (намагничивающего контура от тока в нем, сопротивлений ротора от скольжения), которая позволяет определить эти характеристики при различных напряжениях питания и нагрузках;
- разработан алгоритм формирования комплексов линейных и фазных напряжений, позволяющий определять коэффициент несимметрии напряжения;
- предложен алгоритм определения точного коэффициента трансформации трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

**Практическое значение полученных результатов:**

- предложена методика расчета электромеханических характеристик АД с учетом нелинейных зависимостей вторичного и намагничивающего контура применима как для проектируемых двигателей, так и находящихся в эксплуатации с целью определения допустимых

отклонений напряжений и работающих с различной нагрузкой;

– предложена методика точного определения коэффициента трансформации трехфазного трансформатора по результатам экспериментальных данных;

– разработан алгоритм формирования комплексов линейных и фазных напряжений по результатам экспериментальных исследований.

**Личный вклад соискателя.** Разработка лабораторного стенда для исследований, монтаж и подключение измерительной аппаратуры, проведение экспериментальных исследований. Постановка задачи, усовершенствование методики расчета электромеханических характеристик с учетом нелинейных параметров намагничивающего и вторичного контура асинхронного двигателя.

**Апробация результатов магистерской работы.** Материалы магистерской работы докладывались на конференции профессорско-преподавательского состава ДГМА кафедры "Электромеханические системы автоматизации".

**Публикации результатов научных исследований.** По результатам магистерской работы подготовлена к публикации одна статья по теме «Алгоритм формирования комплексов линейных фазных напряжений по результатам экспериментальных данных».

**Структура и объем магистерской работы.** Магистерская работа состоит из введения, шести разделов, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем магистерской работы составляет 98 страниц, 8 иллюстраций. Список литературы содержит 33 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности темы исследования, ее основную цель, научную новизну и практическую ценность полученных результатов.

В первом разделе «Состояние вопроса и задачи исследований» проанализированные показатели качества электроэнергии на современных промышленных предприятиях, показано, что отклонения напряжения на многих промышленных предприятиях превышают допустимые значения, что может привести к выходу из строя асинхронного двигателя. Сформулирована задача о необходимости анализа влияния изменения напряжения на эксплуатационные характеристики двигателя.

Проведен обзор работ, посвященных исследованию электромеханических характеристик асинхронных двигателей. Значительный вклад в исследование электромеханических характеристик сделали: А. И. Вольдек, А. В. Иванов-Смоленский, И. П. Копилов, И. А. Сыромятников и другие ученые. В их работах проанализированы методы исследования электромеханических характеристик асинхронных двигателей при отклонениях напряжения сети. Основное внимание предоставлено анализу механической характеристики при отклонениях напряжения. Однако недостаточно изученное влияние нелинейной зависимости параметров намагничивающего и вторичного контура  $((U_0(I_0), p_{ст}(U_0), r_2'(s), x_2'(s)))$  на рабочие характеристики двигателей и распределение потерь мощности при изменении напряжения.

Согласно изложенной цели, сформулированы задачи исследования характеристик асинхронных двигателей, работающих в сетях с отклонением напряжения отличным от номинального.

Во втором разделе «Несимметричные режимы работы в трехфазных цепях» рассмотрены основы метода симметричных составляющих, который позволяет рассчитывать несимметричные

электрические системы. Этот метод основан на разложении несимметричной системы на три симметричные составляющие, которые отличаются друг от друга порядком следования фаз, т. е. порядком, в котором фазные величины проходят через максимум, и называются системами прямой (положительной), обратной (отрицательной) и нулевой последовательностей.

Проведен анализ несимметричных режимов работы трехфазной цепи при продольной и поперечной несимметриях. На основании второго закона Кирхгофа, для трех независимых схем последовательностей, составлены три основных уравнения, а также, исходя из параметров несимметричного участка цепи, составлены дополнительные уравнения. Предложен алгоритм расчета несимметричной трехфазной цепи.

Проанализированы возможные способы определения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности. Указаны недостатки предложенных расчетов, например, в ГОСТ 13109-97 в случае крайней несимметрии при  $U_{AB}=0$  и  $U_{BC}=U_{CA}$  дроби в подкоренном выражении дают неопределенность вида  $0/0$ . Предложен собственный обобщенный алгоритм формирования комплексов линейных и фазных напряжений, основанный на соотношениях в треугольнике. При формировании комплексов использовались свойства прямой линии, проходящей через две точки

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x + y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 = kx + b = \operatorname{tg}\alpha \cdot x + b, \quad (1)$$

где  $\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$  – угол наклона прямой линии.

Предложенный алгоритм разработан в программном обеспечении Mathcad (Приложение Б), что позволяет по известным экспериментальным данным автоматически формировать комплексы напряжений для произвольной трехфазной цепи.

В третьем разделе «Несимметричные режимы работы трехфазных трансформаторов» проанализирован способ определения параметров T-образной схемы трансформатора. Приведен алгоритм определения точного коэффициента трансформации, основанный на том, что при питании одной из обмоток трансформатора различным по величине напряжением, на остальных обмотках измеряем величины ЭДС. Тогда, например, при питании обмотки «ax», определяются и сопротивления взаимной индукции и точный коэффициент трансформации.

Сопротивления взаимной индукции определяются выражениями

$$x_{Маb} = \frac{E_{by}}{I}, \quad x_{Маc} = \frac{E_{zc}}{I}, \quad x_{МаA} = \frac{E_{AX}}{I}, \quad x_{МаB} = \frac{E_{BY}}{I}, \quad x_{МаC} = \frac{E_{CZ}}{I}, \quad (2)$$

а точный коэффициент трансформации

$$k \approx \frac{U_{ax}}{U_{AX}} = \frac{E_{by}}{E_{BY}} = \frac{E_{cz}}{E_{CZ}}. \quad (3)$$

Проведены исследования, подтверждающие тот факт, что в зависимости от режима работы параметры схемы замещения, а особенно параметры намагничивающего контура по фазам ( $r_{0A}$ ,  $x_{0A}$ ,  $r_{0B}$ ,  $x_{0B}$ ,  $r_{0C}$ ,  $x_{0C}$ ), могут изменяться в широких пределах.

Рассмотрен режим работы трансформатора на холостом ходу при различных несимметричных режимах на его первичной обмотке, связанных с обрывом линейного провода, с симметрией и асимметрией источника питания. На основании разработанного алгоритма формирования комплексов напряжений, подтверждены расчетные и экспериментальные данные.

В четвертом разделе «Рабочие и электромеханические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения сети» обосновано применение T-образной схемы замещения асинхронного двигателя по сравнению с Г-образной, которая дает существенные неточности, связанные с неучетом нелинейных зависимостей напряжения



намагничивающего контура  $U_0$  от тока холостого хода  $I_0$  ( $U_0(I_0)$ ) и потерь в стали от  $U_0$  ( $p_{ст}(U_0)$ ).

Предложен алгоритм использования данных опыта холостого хода, который позволяет на этапе приемочных испытаний для двигателей одного типоразмера:

- построить кривую зависимости напряжения  $U_0$  от тока холостого хода ( $U_0(I_0)$ );
- построить нелинейную зависимость потерь в стали от  $U_0$  ( $p_{ст}(U_0)$ );
- определить момент холостого хода  $M_0$  и базовые механические потери  $p_{мехб}$ .

Рассмотрено влияние напряжения питания и нагрузки на рабочие и электромеханические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором на примере кранового двигателя МТФ111-6.

На рисунке 1 приведены зависимости токов статора и ротора от напряжения при различных коэффициентах нагрузки  $\beta$ .

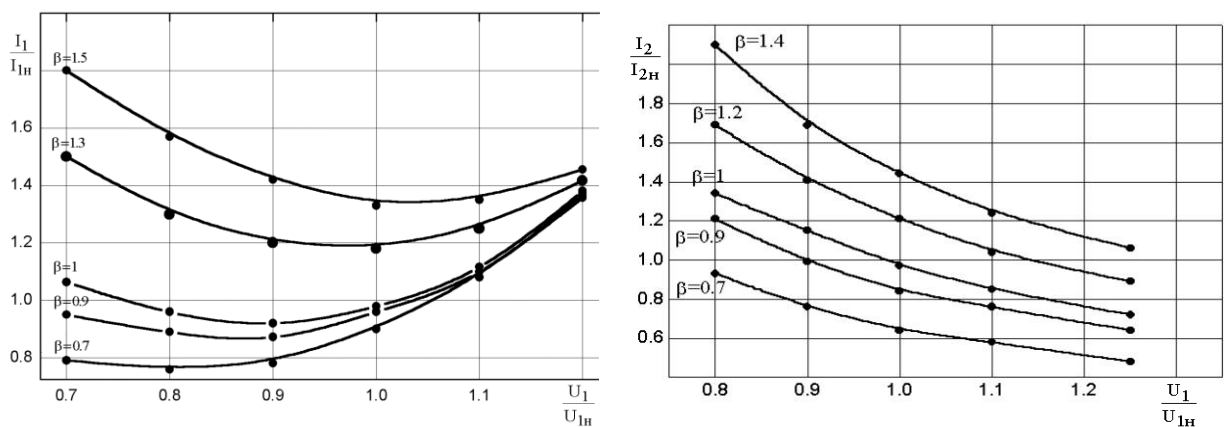


Рисунок 1 - Ток статора  $I_1(U_1)$  и ротора  $I_2(U_1)$  при изменении напряжения для различных коэффициентов нагрузки  $\beta$  АД МТФ111-6

Проведенные исследования позволили точнее определить потери мощностей асинхронного двигателя в условиях ненормального напряжения питания.

В пятом разделе «Электромеханические характеристики асинхронных двигателей при несимметрии напряжения сети» установлено, токи в фазах асинхронного двигателя зависят от несимметрии напряжения сети (симметричных составляющих напряжений прямой  $\underline{U}_1$  и обратной  $\underline{U}_2$  последовательностей) и полных сопротивлений обмоток прямой и обратной последовательностей

$$I = f(U_1, U_2, Z_1, Z_2). \quad (4)$$

Представлены формулы полных сопротивлений прямой и обратной последовательностей асинхронного двигателя для Т-образной схемы замещения, которые соответственно равны

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 + \frac{(R_0 + jX_0) \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)}{R_0 + jX_0 + \frac{R'_2}{s} + jX'_2}; \quad (5)$$

$$\underline{Z}_2 = R_1 + jX_1 + \frac{(R_0 + jX_0) \left( \frac{R'_2}{2-s} + jX'_2 \right)}{R_0 + jX_0 + \frac{R'_2}{2-s} + jX'_2}. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6), видно, что полные сопротивления фаз асинхронного двигателя, являются функцией скольжения  $s$ . Для определения зависимости скольжения от несимметрии напряжения принято

$$M = M_1 - M_2; \quad (7)$$

$$M = M_c, \quad (8)$$

где  $M_1, M_2$  – моменты, которые зависят от напряжений прямой и обратной последовательностей, приложенных к обмотке двигателя, Н·м;

$M_c$  – момент сопротивления рабочей машины, Н·м.

В результате анализа фазных токов и напряжений при глубокой несимметрии напряжений сети и изолированной нейтрали обмотки статора асинхронного двигателя установлено, что при обрыве одной фазы сети

скольжение двигателя зависит: от кратности напряжений прямой  $\underline{U}_1$ , обратной  $\underline{U}_2$  последовательностей, коэффициента загрузки  $k_z$ , технических данных (кратности максимального момента  $m_k$ , скольжения критического  $s_k$  и номинального  $s_n$  при номинальных напряжении и циклической частоте) и состояния двигателя на момент обрыва фазы. Выяснено, что при глубокой несимметрии напряжений сети, токи прямой и обратной последовательностей, а также фазные токи двигателя, в неповрежденной фазе равны по модулю. Это приводит к снижению вращающего момента и увеличению фазных токов, которое сопровождается повышенным нагреванием обмоток.

**В шестом разделе «Экспериментальные исследования режимов работы асинхронных двигателей при несимметрии напряжения сети»** приведено описание разработанного стенда, который содержит два асинхронных двигателя: первый – АД с фазным ротором кранового исполнения МТФ 111-6, второй – АД с короткозамкнутым ротором 4А71В6. На валу с АД расположены рабочие машины – генератор постоянного тока П42УХЛ4 и двигатель постоянного тока 2ПН-112, в якорные обмотки которых включены крановые реостаты.

Таким образом, разработанный для экспериментальных исследований стенд в лаборатории 2119 ДГМА, позволяет исследовать режимы работы АД с фазным и короткозамкнутым ротором, как при симметрии напряжения питающей сети, так и при различных несимметриях напряжения, а также позволяет проводить лабораторные и исследовательские работы по дисциплинам «Электрические машины», «Теория электропривода» и др., которые изучаются на кафедре «Электромеханические системы автоматизации».

## Выводы

Основные научные и практические выводы работы заключаются в следующем.

1. Усовершенствованная методика расчета электромеханических характеристик АД, которая дополнена учетом нелинейных зависимостей параметров Т-образной схемы ( $U_0(I_0)$ ,  $p_{ст}(U_0)$  и  $r_2'(s)$ ,  $x_2'(s)$ ), что позволяет определить эти характеристики при разных напряжениях питания и нагрузках.

2. Получена математическая модель асинхронного двигателя при несимметрии напряжений сети, при разной загрузке рабочей машины в зависимости от их механических характеристик.

3. Проведенные исследования позволили точнее определить потери мощностей в узлах асинхронного двигателя в условиях ненормального напряжения питания.

4. Приведен алгоритм определения точного коэффициента трансформации.

5. Разработан алгоритм формирования комплексов линейных и фазных напряжений источника питания и на нагрузке по результатам экспериментальных данных с применением программного обеспечения Mathcad.

## АННОТАЦИЯ

Неня Т.О. Исследование характеристик электропривода с асинхронным двигателем при продольных и поперечных несимметриях в первичной цепи трансформатора.

Магистерская работа по специальности 8.5070204 - Электромеханические системы автоматизации и электропривод, Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2014.

В магистерской работе разработана методика расчета рабочих характеристик и распределения потерь мощности при изменении напряжения сети с учетом нелинейных зависимостей тока холостого хода  $I_0$  от напряжения намагничивающего контура  $U_0$ , потерь в стали от  $U_0$ , параметров вторичного контура от скольжения. В результате анализа рабочих характеристик выявлено, что снижение напряжения сети приводит к увеличению токов статора и ротора. Большие темпы роста тока наблюдаются в роторе; повышение напряжения сопровождается увеличением тока статора за счет роста тока холостого хода при насыщении магнитной системы машины; ток обмоток ротора при этом уменьшается.

Установлено, что параметры намагничивающего контура трехфазного трансформатора  $r_0$  и  $x_0$  заметно различаются по фазам. Сопротивления намагничивающего контура имеют тенденцию к уменьшению по мере увеличения приложенного напряжения. Предложена методика уточненного определения коэффициента трансформации по соотношению напряжений на первичной и вторичной обмотках отключенных фаз при однофазном подключении трансформатора.

Разработан алгоритм формирования комплексов линейных и фазных напряжений по результатам экспериментальных данных с применением программного обеспечения.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, трансформатор, рабочие характеристики, схема замещения, метод симметричных составляющих.

## АННОТАЦІЯ

Неня Т.О. Дослідження характеристик електроприводу з асинхронним двигуном при подовжніх і поперечних несиметриях в первинному ланцюзі трансформатора.

Магістерська робота за фахом 8.5070204 - Електромеханічні системи автоматизації та електропривод, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2014.

У магістерській роботі розроблена методика розрахунку робочих характеристик і розподілу втрат потужності при зміні напруги мережі з врахуванням нелінійних залежностей струму холостого ходу  $I_0$  від напруги контура  $U_0$ , що намагнічує, втрат в сталі від  $U_0$ , параметрів вторинного контура від ковзання. В результаті аналізу робочих характеристик виявлено, що зниження напруги мережі приводить до збільшення струмів статора і ротора. Великі темпи зростання струму спостерігаються в роторі; підвищення напруги супроводиться збільшенням струму статора за рахунок зростання струму холостого ходу при насиченні магнітної системи машини; струм обмоток ротора при цьому зменшується.

Встановлено, що параметри контура трифазного трансформатора, що намагнічує  $r_0$  та  $x_0$  помітно розрізняються по фазах. Опори контура, що намагнічує, мають тенденцію до зменшення у міру збільшення прикладеної напруги.

Запропонована методика уточненого визначення коефіцієнта трансформації по співвідношенню напруги на первинній і вторинній обмотках відключених фаз при однофазному підключенні трансформатора.

Розроблено алгоритм формування комплексів лінійної і фазної напруги за результатами експериментальних даних із застосуванням програмного забезпечення.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, трансформатор, робочі характеристики, схема заміщення, метод симетричних складових.

## ANNOTATION

Nenya T.O Research of descriptions of electromechanic with an asynchronous engine at longitudinal and transversal unsymmetries in the primary chain of transformer.

Master's degree work after speciality 8.5070204 are the Electromechanics systems of automation and electromechanic, Donbas state engineering academy, Kramatorsk, 2014.

In master's degree work the method of calculation of workings descriptions and distributing of losses of power is developed at the change of tension of network taking into account nonlinear dependences of current of idling of  $I_0$  on tension of magnetizing contour of  $U_0$ , losses in steel from  $U_0$ , parameters of the second contour from sliding. It is exposed as a result of analysis of workings descriptions, that over the decline of tension of network brings to the increase of currents of statora and rotor. The large rates of growth of current are observed in a rotor; the increase of tension is accompanied the increase of current of statora due to growth of current of idling at the satiation of the magnetic system of machine; the current of obmotok of rotor diminishes here. It is set that parameters of magnetizing contour of three-phase transformer and notably differentiate on phases. Resistances of magnetizing contour have a tendency to diminishing as far as the increase of the attached tension.

The method of the specified determination of coefficient of transformation is offered on correlation of tensions on primary and second obmotkakh of power-off phases during the monophasе connecting of transformer.

The algorithm of forming of complexes of linear and phase tensions is developed on results experimental information with the use of software.

Keywords: asynchronous engine, transformer, workings descriptions, chart of substitution, method of symmetric constituents.

---

Підп. до друку

Формат 60×90/16

Офсетний друк

Умов. друк. арк. – 1,2

Тираж 6 прим.

Замовлення №

---