

ИЗВЕСТИЯ

ОРЛОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

II Международная научно-техническая конференция

**Информационные технологии в науке,
образовании и производстве
(ИТНОП)**

25-26 мая 2006 года

Материалы конференции
Том 2

**СИСТЕМЫ И
ТЕХНОЛОГИИ**



№ 1 (2) 2006

ИЗВЕСТИЯ ОрелГТУ

Научный журнал

Серия

«Информационные системы и технологии»

Содержание номера

Редакционный совет журнала:

Голенков В.А. д.т.н., профессор –
председатель;

Степанов Ю.С. д.т.н., профессор –
зам. председателя;

Светкин В.В. к.т.н., доцент;

Колчунов В.И. д.т.н., профессор;

Гордон В.А. д.т.н., профессор;

Константинов И.С. д.т.н., профессор;

Садков В.Г. д.т.н., профессор;

Кулаков А.Ф. к.т.н., доцент;

Фролова Н.А. к.социол.н., доцент;

Соков О.А. к.т.н., доцент;

Борзенков М.И. к.т.н., доцент;

Поладова Л.И.;

Одолесва М.В.

Редколлегия серии:

Константинов И.С. д.т.н., профессор -
главный редактор;

Савва Ю.Б. - ответственный секретарь;

Митин А.А. к.т.н., доцент -

технический секретарь;

Гайдирик К.Г. д.т.н., проф.;

Еремеев А.П. д.т.н., проф.;

Иваншизов А.Д. д.т.н., проф.;

Немировский Ю.В. д.ф.-м.н., проф.;

Сотников В.В. д.т.н., проф.

Зарег. в Министерстве РФ по делам
печати, телерадиовещания и средств
массовой информации. Свидетельство:
ПН № 77-15-496 от 20 мая 2003 года

С электронной версией журнала можно
ознакомиться по адресу: www.ostu.ru

Адрес редколлегии серии:

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Факультет «Электроники
и приборостроения ОрелГТУ»

Редколлегия журнала

Известия ОрелГТУ.

Серия «Информационные системы
и технологии»

Формат 96x90/8.

Печать ризография. Бумага офсетная.

Усл.печ.л. 12. Заказ № _____.

Тираж 100 экз.

*Анайманович В.А., Сотников В.В.,
Лисицын Н.В., Борзов А.Н., Зайцева М.А.*
**Математическая модель реактора
процесса гидроочистки дизельного
топлива** 7

Архипов П.О. **Цветные машиночитаемые
зоны как средство персонификации и
индивидуализации отпечатка** 11

*Афлятунов Р.М., Рудакова И.В.,
Русинов Л.А.* **Диагностическая модель
для системы диагностики состояния
процесса пиролиза** 15

*Баркалов С.А., Половинкин И.С.,
Косенков К.В.* **Зависимость
экономической эффективности и
энтропийных характеристик сдвигов для
строительных предприятий** 21

*Богомоллов Д.С., Сотников В.В.,
Сибаров Д.А., Лисицын Н.В., Борзов А.Н.*
**Алгоритм управления блоком очистки
газа системы гидроочистки дизельного
топлива на основе математической
модели** 26

Васютина О.В. **Создание сквозной
автоматизированной системы
бюджетного управления в
многоуровневых структурах.....** 33

Гурко А.В., Сотников В.В., Лисицын Н.В.
**Имитационное моделирование
оперативного управления
производством** 37

Дёмкин Д.В., Козел А.О., Годовников Е.А.
**Использование среды «mathcad» для
синтеза регуляторов в системе
управления импульсными
понижающими преобразователями
напряжения.....** 47

<i>Еремеева Н.П.</i> Формирование информационной базы мониторинга прорывных производств	52
<i>Жедунов Р.Р.</i> Идентификация предаварийных ситуаций технологического процесса с учетом нарушений эксплуатации установки	56
<i>Жизняков А.Л.</i> Применение многомасштабных методов для препарирования изображений микроструктуры металлов	60
<i>Замяткин А.В., Суздальцев А.И.</i> Имитационная модель прогнозирования финальной влажности при сушке движущихся капиллярно-пористых материалов	63
<i>Ильин А.Н., Матвеев С.В., Милованов И.В., Путин С.Б.</i> Роль современных информационных технологий в производстве наукоемких изделий	67
<i>Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю., Цуканов В.Г.</i> Математическая модель асинхронного двигателя при несимметричном подключении к сети ...	71
<i>Кононов А.А., Иванов С.А., Тютюев А.А.</i> Информационные технологии моделирования рабочего процесса автогрейдера при планировании грунта	77
<i>Кручинин А.Ю., Аралбаев Т.З.</i> Модель динамической оптимизации режимов мониторинга и диагностирования буровой скважины	81
<i>Лобанова В.А., Абашин В.Г.</i> К вопросу определения психофизического состояния оператора АРМ в реальном режиме времени	86
<i>Лобанова В.А., Абашин В.Г.</i> Самообучающиеся алгоритмы нейронных сетей в диагностике психофизического состояния оператора АРМ вредного производства	89
<i>Макаров Е.И., Макаров А.Е.</i> Структуризация данных для целей анализа экономических систем	93
<i>Марков С.И., Виноградова А., Рудакова И.В., Русинов Л.А.</i> Нейросетевая система диагностики состояния процесса получения пентафталевого лака	98
<i>Мерцалова Т.А.</i> Программное обеспечение для исследования процесса разрушения материалов с использованием математической модели двухконсольной балки	104
<i>Микушева А.В., Соптиков В.В., Сибаров Д.А., Лисицкий И.В., Распопина А.В.</i> Математическое описание процесса изомеризации	109
<i>Никонорова О.А.</i> Построение моделей прогноза параметров землетрясений ступенчатым регрессионным методом	118
<i>Оглоблин Р.И.</i> Информационная система предприятия как фактор, обеспечивающий устойчивое экономическое развитие	122
<i>Пилипенко О.В., Демина Е.Г., Демин А.В.</i> Математическая модель термодинамических процессов, происходящих в барокамере испытательного стенда по контролю терморегуляторов	127
<i>Пилипенко О.В., Демина Е.Г., Демин А.В.</i> Алгоритмы управления стендовым оборудованием по контролю терморегуляторов	132

УДК 621.313.333.2

Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю., Цуканов В.Г.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ПОДКЛЮЧЕНИИ К СЕТИ

A new approach of induction machine model for unbalanced condition derivation is described in the article. The unbalanced condition model is obtained in a stationary three-phase reference frame ($\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$) based on Kirchhoff's laws. Error occurrence in simulation results of traditional unbalanced condition induction machine model is spoken in detail.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментом современной теории асинхронного электропривода является модель обобщенного двухфазного идеального двигателя. Эта модель адекватно описывает электромеханическое преобразование энергии в установившемся режиме при удовлетворении целого ряда допущений. Широкое распространение модели обобщенного двигателя связано с минимально возможным порядком системы дифференциальных уравнений, составляющих эту модель.

Вместе с тем попытки применения модели обобщенного двигателя в условиях, нарушающих те или иные допущения, могут привести к возникновению ошибок в описании электромеханического преобразования энергии. Как будет показано в настоящей работе, именно такие ошибки появляются при использовании обобщенной модели для описания несимметричных режимов работы асинхронного двигателя. Выход из этой ситуации может быть найден в использовании модели двигателя, полученной в трехфазной (непреобразованной) системе координат ($\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$).

Получение моделей электрических машин в системе координат ($\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$) до настоящего времени было затруднено трудоемкостью преобразований, которые требовалось выполнять, приводя итоговую систему уравнений к нормальной форме Коши. Применение инструментов системы символьной математики "Maple 10.0"[®] (Waterloo Maple Inc.) позволило решить эту задачу.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Эксплуатация электрических машин связана с возникновением в их динамике несимметричных режимов (НР). С одной стороны, такие режимы могут сопровождать аварийные ситуации (обрыв фазы, короткое замыкание и т.д.), с другой стороны, являются особенностью работы некоторых преобразователей регулируемого электропривода. В связи с этим очевидна необходимость корректного описания несимметричных режимов как для стационарных, так и для переходных процессов функционирования электрических машин.

Из всего многообразия НР, возникающих в практике электропривода, для анализа в данной работе нами был выбран режим отключения одной фазы трехфазного асинхронного двигателя (АД) от сети переменного тока бесконечной мощности. Такой выбор обусловлен необходимостью построения адекватной модели тиристорного регулятора напряжения с системой импульсно-фазового управления, алгоритм функционирования которой, как известно, связан с поочередной сменой двухфазного, трехфазного режима работы АД и режима отключения двигателя от сети [1,2].

В подавляющем большинстве литературных источников несимметричные переходные режимы описывают с использованием обобщенной двухфазной модели АД, полученной на основе классических уравнений Парка-Горева [1-3]. При этом на исходную систему уравнений, записанную чаще всего в неподвижной системе координат (α - β), накладываются дополнительные условия, отражающие тот или иной вид несимметрии. Для описания отключения одной фазы двигателя от сети в ряде работ предлагается обнулять соответствующие проекции обобщенного вектора тока и напряжения статорных обмоток двигателя [2]. Находят применение и другие методы, например, в работе [1] используется прием, при котором отключение фазы двигателя от сети моделируется приложением напряжения, обеспечивающего равенство нулю тока в отключенной фазе. Как будет показано далее, способы описания несимметричных режимов, имеющие в своем основании модель обобщенной двухфазной машины, могут привести к существенным погрешностям.

В данной работе предлагается альтернативный метод математического описания режима двухфазного подключения АД к трехфазной сети, основанный на составлении уравнений двигателя в заторможенной трехфазной системе координат (α - β - γ).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСИММЕТРИЧНОГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АД К СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Порядок вывода уравнений несимметричного режима продемонстрируем на примере описания двухфазного подключения АД к сети переменного тока бесконечной мощности. При этом к источнику тока, не имеющему внутреннего сопротивления, предполагаются подключенными две фазы двигателя – “В” и “С”. Такой вариант подключения иногда называют “режим ВС” [1,2].

На основании первого закона Кирхгофа составим систему уравнений, описывающую баланс напряжений в статорных и роторных обмотках трехфазного АД с короткозамкнутым ротором. Такая система уравнений в матричной форме будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{ABC}^s &= R_s \mathbf{i}_{ABC}^s + \frac{d\mathbf{\Psi}_{ABC}^s}{dt}, \\ 0 &= R_r \mathbf{i}_{abc}^r + \frac{d\mathbf{\Psi}_{abc}^r}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{u}_{ABC}^s , \mathbf{i}_{ABC}^s и $\mathbf{\Psi}_{ABC}^s$ – векторы размерностью 3×1 напряжения, приложенного к статорным обмоткам, тока и потокосцепления статорных обмоток соответственно;

R_s – активное сопротивление статорных обмоток (предполагается, что двигатель симметричный и активное сопротивление обмоток статора (равно как и ротора), размещенных по различным осям, одинаково). Аналогичные обозначения приняты для цепи ротора.

Выражение потокосцепления, например, статорной обмотки, размещенной по оси “А”, будет иметь в этом случае следующий вид:

$$\begin{aligned} \Psi_A^s &= i_A^s (L_{AA}^s + M_{AA}) + i_B^s M_{AB} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_C^s M_{AC} \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + i_a^r M_{As} \cos(\theta) + \\ &+ i_b^r M_{Ab} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_c^r M_{Ac} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где L_{AA}^s – индуктивность рассеяния статорной обмотки “А”;

θ – пространственный угол между статорными и роторными обмотками двигателя;

$M_{AA}, M_{AB}, M_{AC}, M_{Ab}, M_{Ab}, M_{Ac}$ – взаимные индуктивности между статорной обмоткой “А” и прочими статорными и роторными обмотками. В рамках представления об идеальной модели АД эти взаимные индуктивности считаются равными максимальной взаимной индуктивности (M) между двумя любыми статорными или роторными обмотками двигателя.

Традиционно для упрощения интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) посредством исключения периодических коэффициентов перед переменными из уравнений потокоцеплений обмоток (2) принято от системы координат, связанной с вращающимся ротором ($a-b-c$), переходить к системе координат, неподвижной относительно статора ($\alpha-\beta-\gamma$). Эта процедура осуществляется с использованием матрицы трансформации $\mathbf{K}(\vartheta)$ (где $\vartheta = p_r \cdot \omega_r \cdot t$) [3]. Такая трансформация инвариантна к форме и симметрии напряжений, прикладываемых к статорным обмоткам АД, поскольку направлена на преобразование цепей ротора. При этом вращающийся ротор заменяется на неподвижный путем введения ЭДС вращения в уравнения баланса напряжений роторных обмоток.

Следующим шагом получения уравнений несимметричного режима “BC” является размыкание фазы “А” статора двигателя (рисунок 1).

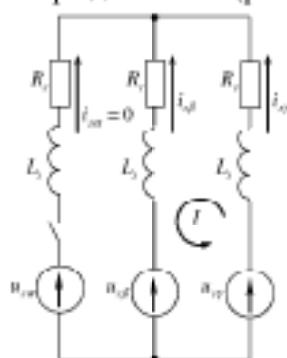


Рисунок 1 – Схема статорных цепей трехфазного АД при несимметричном режиме “BC”

Согласно законам Кирхгоффа (при условии обхода контура “Т” против часовой стрелки), можно записать:

$$i_{s\alpha}(t) = 0; \quad (3)$$

$$i_{s\beta}(t) = -i_{s\gamma}(t); \quad (4)$$

$$u_{s\gamma} - u_{s\beta} = R_s i_{s\gamma}(t) + \frac{d\psi_{s\gamma}(t)}{dt} - R_s i_{s\beta}(t) - \frac{d\psi_{s\beta}(t)}{dt}. \quad (5)$$

В уравнениях (3-5) и на рисунке (1) индексы зависимых переменных изменены в соответствии с обозначениями осей в рассматриваемой системе координат ($\alpha-\beta-\gamma$). Подставив уравнение (4) в уравнение (5), получим:

$$u_{s\gamma} - u_{s\beta} = 2R_s i_{s\gamma}(t) + \frac{d\psi_{s\gamma}(t)}{dt} - \frac{d\psi_{s\beta}(t)}{dt}. \quad (6)$$

Для составления полной системы уравнений режима “BC” необходимо дополнить уравнение (6) тремя уравнениями баланса напряжений роторных обмоток АД, которые не изменяются по форме и совпадают с уравнениями симметричного режима. Кроме этого, необходимо преобразовать выражения потокоцеплений статорных и роторных обмоток с учетом условий (3) и (4).

Для перехода к двухфазной модели АД, соответствующей несимметричному режиму “BC”, воспользуемся традиционным правилом проецирования результирующего вектора на ортогональную неподвижную систему координат $(\alpha-\beta)$ [3]. Записав итоговую систему уравнений через токи в нормальной форме Коши, получим:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\beta}}{dt} = a_{11}i_{s\beta} + a_{12}i_{ra}\omega_r + a_{13}i_{r\beta} + a_{14}(u_{s\beta} - u_{r\gamma}); \\ \frac{di_{ra}}{dt} = a_{21}i_{s\beta}\omega_r + a_{22}i_{ra} + a_{23}i_{r\beta}\omega_r; \\ \frac{di_{r\beta}}{dt} = a_{31}i_{s\beta} + a_{32}i_{ra}\omega_r + a_{33}i_{r\beta} + a_{34}(u_{r\gamma} - u_{s\beta}); \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(a_{41}i_{s\beta}i_{ra} - M_c), \end{cases} \quad (7)$$

где J – момент инерции вращающихся масс ротора;

$a = \{a_{mn}\}, m = 1..4, n = 1..4$ – константы, связанные с параметрами схемы замещения АД;

M_c – момент сопротивления на валу двигателя.

В системе уравнений (7) для удобства опущено обозначение зависимости от времени переменных модели и опущен знак “штрих” при обозначении принадлежности переменной к соответствующей оси.

На рисунке 2 приведен график изменения абсолютной ошибки во времени между результатом численного интегрирования системы уравнений в трехфазных координатных осях $(\alpha-\beta-\gamma)$ и системы уравнений (7) для тока статорной обмотки, размещенной по оси “В”. Параметры схемы замещения соответствуют асинхронному двигателю 4А225М4УЗ (номинальный статорный ток стационарного режима $I_{ном} = 100$ А). Пуск осуществлялся в режиме холостого хода при следующих начальных условиях:

$$i_{sa}(0) = 0, i_{s\beta}(0) = 0, i_{r\gamma}(0) = 0, i_{ra}(0) = 0, i_{r\beta}(0) = 0, i_{r\gamma}(0) = 0, \omega_r(0) = \omega_s / 2, \quad (8)$$

где ω_s – частота вращения поля в воздушном зазоре АД.

Значение абсолютной ошибки рассчитывалось по следующей формуле:

$$E(t) = |i'_{s\beta}(t) - i^*_{s\beta}(t)|, \quad (9)$$

где $i'_{s\beta}(t)$ – мгновенное значение тока статорной обмотки “В” модели, записанной в координатах осей $(\alpha-\beta-\gamma)$;

$i^*_{s\beta}(t)$ – мгновенное значение тока статорной обмотки “В” системы (7), записанной в координатах осей $(\alpha^*-\beta^*)$.

Численное интегрирование проводилось с использованием алгоритма одношагового адаптивного явного метода Рунге-Кутты 4-ого порядка.

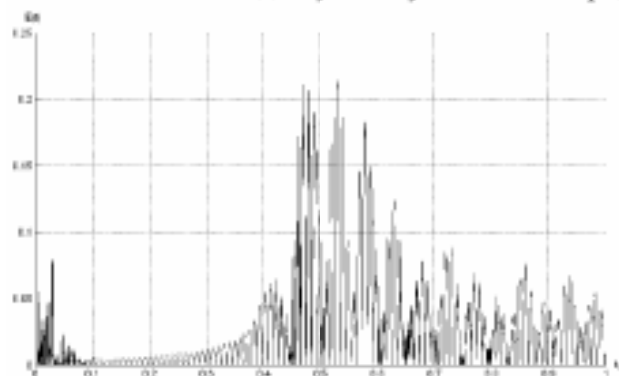


Рисунок 2 – График изменения абсолютной ошибки (9) для исследуемых моделей

Возникновение ошибки $E(t)$ в данном случае связывается с погрешностью алгоритма интегрирования, поскольку, как показало наше исследование, значение этой ошибки изменяется при изменении алгоритма.

СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ МОДЕЛИ С КЛАССИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

Как отмечалось во введении, одной из причин, порождающих необходимость моделирования несимметричных режимов, является потребность разработки моделей систем асинхронного электропривода (АЭП), в которых несимметричное подключение двигателя к источнику ЭДС является характерной особенностью работы силового преобразователя. Наиболее ярко такая особенность выражена в системах импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорным регулятором напряжения (ТРН). В нашей стране проблемами разработки СИФУ ТРН для АЭП в основном занимаются две научных школы: кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского государственного технического университета под рук. д.т.н, проф. И.Я. Браславского и кафедра силовой электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций под рук. проф., д.т.н. В.И. Хрисанова.

Для выявления расхождений между моделью, описанной выше, и моделями, предложенными в [1] и в [2], построим график функции (9) для модели (7), модели [1, стр. 137-138] и модели [2, стр. 37-39], используя для анализа условия (параметры схемы замещения АД, алгоритм интегрирования, начальные условия (8)), описанные выше. Полученный график приведен на рисунке 3.

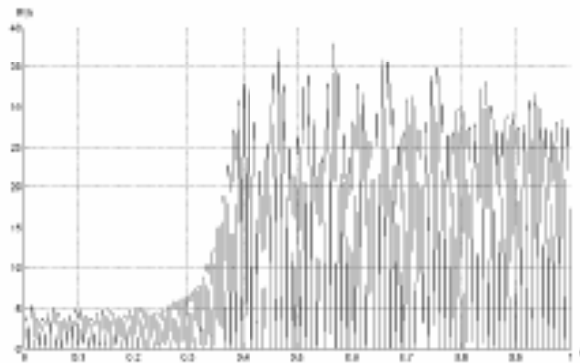


Рисунок 3 – График изменения абсолютной ошибки (9) при интегрировании уравнений (7), [1, стр. 137-138] и [2, стр. 37-39]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показан порядок получения модели несимметричного режима АД на основании законов Кирхгофа и полной трехфазной модели двигателя в заторможенных относительно статора координатных осях $(\alpha-\beta-\gamma)$. Выполнение трудоемких промежуточных преобразований оказалось возможным благодаря использованию системы символьной математики "Maple 10.0"[®].

Сравнение результатов интегрирования уравнений предложенной выше модели и уравнений несимметричного режима, имеющих в своем основании модель двухфазного обобщенного двигателя, приводит к возникновению существенной погрешности, достигающей 35–40% от значения переменных установившегося режима (рисунок 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И. Я. Браславский. – М. : Энергоиздат, 1988. – 224 с.;
2. Глазенко Т. А. Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности / Т. А. Глазенко, В. И. Хрисанов. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 176 с.;
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 1994. – 311 с.

Колоколов Юрий Васильевич

Зав. кафедрой проектирования, технологии электронных и вычислительных систем,
д.т.н., профессор
Орловский государственный технический университет, г. Орел
Тел.: +7 (4862) 419879

Мелихов Артем Юрьевич

Аспирант кафедры
проектирования, технологии электронных и вычислительных систем
Орловский государственный технический университет, г. Орел
Тел.: +7 (4862) 419879
E-mail: science-orel@mail.ru

Цуканов Вадим Геннадьевич

Студент факультета электроники и приборостроения
Орловский государственный технический университет, г. Орел
Тел.: +7 (4862) 419879