

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

**16+  
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ  
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Выпуск 7**

**Тула  
Издательство ТулГУ  
2023**

Председатель редакционного совета

*Кравченко О.А.*, д-р техн. наук.

Первый заместитель председателя редакционного совета

*Воротилин М.С.*, д-р техн. наук.

Заместитель председателя редакционного совета

*Прейс В.В.*, д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.

Ответственный секретарь редакционного совета

*Моргунова Е.В.*, авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

#### Члены редакционного совета:

*Батанина И.А.*, д-р полит. наук –

гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;

*Берестнев М.А.*, канд. юрид. наук –

гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;

*Борискин О.И.*, д-р техн. наук –

гл. редактор серии «Технические науки»;

*Егоров В.Н.*, канд. пед. наук –

гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

*Заславская О.В.*, д-р пед. наук –

гл. редактор серии «Педагогика»;

*Качурин Н.М.*, д-р техн. наук –

гл. редактор серии «Науки о Земле»;

*Понаморев О.Н.*, д-р хим. наук –

гл. редактор серии «Естественные науки».

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

*Борискин О.И.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель главного редактора

*Ларин С.Н.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь

*Яковлев Б.С.*, канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ

*Журин А.В.*, канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

#### Члены редакционной коллегии:

*Агуреев И.Е.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Анцев А.В.* д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Анцев В.Ю.* д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Бабкин А.С.*, д-р техн. наук (ЛГТУ, г. Липецк);

*Бабочкин Г.И.*, д-р техн. наук (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва);

*Вальтер А.И.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Вартаков М.В.*, д-р техн. наук (Московский политехнический университет, г. Москва);

*Васин С.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Волгин В.М.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Григичар Н.Г.*, д-р техн. наук (Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва);

*Дикусар А.И.*, чл.-корр. АН Молдовы, д-р хим. наук (Институт прикладной физики АН Молдовы, г. Кишинев);

*Добровольский Н.М.*, д-р физ.-мат. наук (ТГПУ, г. Тула);

*Жулай В.А.*, д-р техн. наук (Воронежский государственный

технический университет, г. Воронеж);

*Запомель Я.*, д-р техн. наук (Технический университет Остравы, Чехия, г. Острава);

*Золотухин В.И.*, д-р техн. наук (ТулГУ, НПП «Вулкан-ТМ», г. Тула);

*Крюков В.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Куц В.В.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

*Лавриненко В.Ю.*, д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

*Ивахненко А.Г.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

*Колтунович Т.Н.*, д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, Польша, г. Люблин);

*Коновалов А.В.*, д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

*Костров Б.В.*, д-р техн. наук (Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, г. Рязань);

*Ларкин Е.В.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Мецгеряков В.Н.*, д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк);

*Мозжечков В.А.*, д-р техн. наук (АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);

*Романович А.А.* д-р техн. наук (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород);

*Савин Л.А.*, д-р техн. наук (Орловский государственный

университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл);

*Степанов В.М.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Сычугов А.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Титов В.С.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

*Трегубов В.И.*, д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева», г. Тула);

*Черняев А.В.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Шолохов М.А.*, д-р техн. наук (УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург);

*Юдин С.В.*, д-р техн. наук (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Тульский филиал, г. Тула);

*Яцун С.Ф.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);
- 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы (технические науки);
- 2.5.2 Машиноведение (технические науки);
- 2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки);
- 2.5.6 Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением (технические науки);
- 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки);
- 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);
- 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки);
- 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

К.В. Лицин, Д.А. Морозков

*В последнее время актуальным направлением становится определение углового положения с помощью бездатчиковых методов. Практически все из них основаны на параметрах двигателя, которые меняются в процессе его эксплуатации. В статье проводится исследование алгоритмов идентификации синхронного двигателя с обмоткой возбуждения. Проведён анализ методов, необходимых для точного определения параметров двигателя. Методы делятся на 2 группы: методы, используемые до пуска двигателя (off-line methods) и методы, используемые в режиме работы двигателя (online methods). Сделаны выводы о необходимости использования тех или иных методов для определения параметров двигателя в процессе его работы.*

*Ключевые слова:* синхронный двигатель с обмоткой возбуждения, идентификация, offline methods, online methods, электропривод.

**Введение и постановка задачи.** Применение синхронных двигателей с обмоткой возбуждения (СД с ОБ) в различных технических системах обуславливается преимуществами приводов данного типа: большой мощностью и полезной нагрузкой, постоянством частоты вращения при изменении нагрузки, быстродействием и т.д. СД с ОБ широко применяются в области больших мощностей: в компрессорах, насосах и других силовых установках [1-4].

Синхронная машина является важным компонентом энергосистемы, и точное определение ее параметров является требованием повышения надежности и энергетической эффективности технологических процессов и обслуживания [5], а также является важной задачей для обеспечения адекватных режимов работы с помощью определенных алгоритмов управления [6]. Действительные значения параметров электродвигателей нередко неизвестны или отличаются от данных, указанных в паспорте устройства, в справочной и технической документации [7-9]. Это отличие может достигать более 20% [10] и связано, в первую очередь, с технологическим процессом изготовления. Значения параметров электродвигателя также изменяются в процессе функционирования электродвигателя в результате нагрева, механического износа и воздействий со стороны окружающей среды [11-13].

Проблема идентификации параметров электродвигателя актуальна для многих видов систем управления, таких как широко применяемое полеориентированное управление (FOC) или более сложных прогнозирующих методов управления, которые требуют точных математических моделей управляемого двигателя. В то время как в FOC параметры двигателя в основном необходимы для настройки регуляторов тока ПИ-типа и для наблюдения за магнитным полем двигателя.

Целью данной статьи является исследование разновидностей алгоритмов идентификации синхронного двигателя с обмоткой возбуждения для последующего мониторинга параметров двигателя в процессе его работы.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- исследовать причины, приводящие к изменению параметров СД с ОБ в процессе его эксплуатации;
- проанализировать отклонение параметров СД с ОБ под воздействием внешних причин при различных режимах его работы;
- классифицировать алгоритмы идентификации СД с ОБ.

**Off-line методы идентификации.** Существующие методы идентификации параметров можно разделить на методы, используемые до пуска двигателя в работу (off-line методы) и методы, используемые в режиме работы двигателя (on-line методы). Описываемые в данной статье методы нередко применяют совместно для более точной идентификации параметров двигателя.

При рассмотрении методов идентификации параметров двигателя будет удобно представить схемы замещения СД с ОБ, которые строятся с помощью приведения СД к эквивалентной двухфазной синхронной машине (рис. 1), в таком случае вращающееся магнитное поле статора разложено на два пульсирующих поля, одно из которых действует по продольной (ось d), а другое – по поперечной оси ротора (ось q). Схемы замещения представлены на рис. 2.

В данных схемах представлены следующие параметры:

- $Z_{ds}, Z_{qs}$  – сопротивления синхронной машины по осям d и q;
- индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора;
- продольный и поперечный токи статора;
- s – скольжение.

Отклонение параметров двигателя происходит под воздействием ряда факторов, которые влияют в основном на сопротивление статора, сопротивление ротора, индуктивность статора, индуктивность ротора и взаимную индуктивность между статором и ротором. Изменению подлежат следующие параметры синхронного электродвигателя [14]:

- температура;
- изменение нагрузки;
- потери.

Испытание на короткое замыкание, вероятно, является наиболее известным испытанием для оценки параметров. Его важность обусловлена не только количеством параметров, которые можно определить, но и тем, что он обеспечивает теоретическую основу для фактических определений стандартных параметров. Проведение короткого замыкания позволяет определить значения индуктивностей и параметра постоянной времени по оси d:

$$\frac{1}{L_d(p)} = \frac{1}{L_d} + \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L_d'} \right) \frac{T_d p}{(1 + T_d p)} + \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L_d''} \right) \frac{T_d'' p}{(1 + T_d'' p)}$$

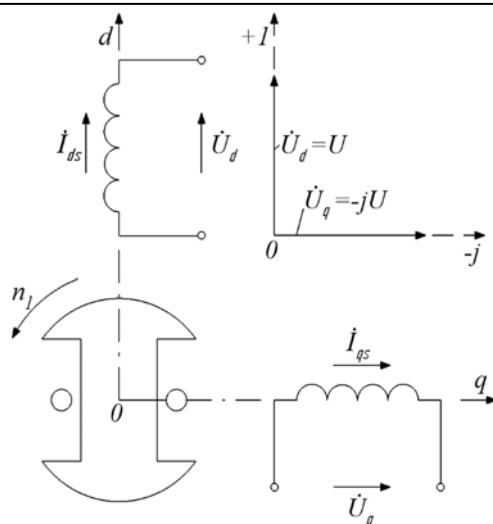


Рис. 1. Схема эквивалентной двухфазной синхронной машины

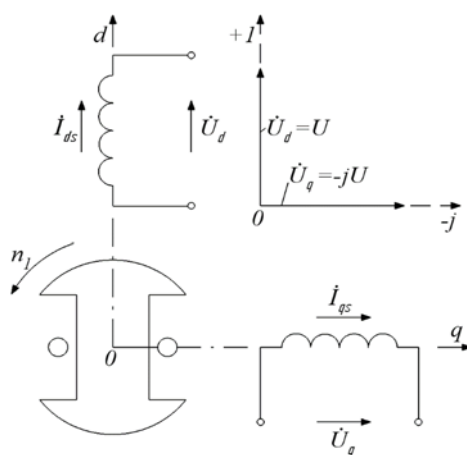


Рис. 2. Схемы замещения синхронной машины в асинхронном режиме при наличии (а, б) и отсутствии (в, г) пусковой обмотки: а, в – по продольной оси; б, г – по поперечной оси

Когда синхронная машина без нагрузки подвергается трехфазному короткому замыканию, ток статора будет определяться как:

$$I(t) = E_0 \left\{ \frac{1}{L_d} + \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L'_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + \left( \frac{1}{L''_d} - \frac{1}{L'_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_d}} \right\}$$

где  $I(t)$  – среднеквадратичное значение переменного тока короткого замыкания,  $E$  – среднеквадратичное значение переменного напряжения до метода короткого замыкания,  $t$  – время в секундах, отсчитываемое с момента короткого замыкания.

Данный метод позволяет идентифицировать постоянные времени переходного короткого замыкания. Аналогичным образом могут быть идентифицированы переходные и сверхпереходные реактивные сопротивления. После достижения установившегося состояния можно также измерить реактивное сопротивление  $X_d$  по продольной оси.

Процедура определения значений параметров синхронного двигателя с использованием частотных испытаний состоит из нескольких этапов:

Этап 1 – это процесс определения частотной характеристики в режиме ожидания; он определяет величины импедансов и передаточных функций, которые точно описывают взаимодействие напряжений и токов в зависимости от частоты;

Этап 2 – это определение передаточных функций для соотношений ток-поток-напряжение в простых стандартных формах, таких как  $X_d(P)$ ;

Этап 3 – это определение данных эквивалентной схемы, которые используются при моделировании на основе передаточных функций этапа 2.

С помощью частотных испытаний можно получить скорости изменения величин статора или поля в широком диапазоне частот. Следующие четыре величины были признаны полезными при разработке передаточных функций или эквивалентных моделей с продольной осью или поперечной осью для синхронных машин. Приведенные ниже величины также могут быть получены из других измеряемых параметров машины в состоянии покоя.

- $Z_d(s)$ . Сопротивление продольной оси синхронной;
- $Z_q(s)$ . Сопротивление синхронной машины по поперечной оси;
- Сопротивление передачи статора к полю;

– Полное сопротивление передачи поля статору.

Все испытания проводятся с двигателем в состоянии покоя (неподвижный ротор), отключенным от системы и со статором, возбуждаемым источником низкого уровня (60А, 20В). Испытания проводят в диапазоне частот, который варьируется от минимума, по меньшей мере на один порядок величины меньше, чем частота, соответствующая постоянной времени переходного процесса холостого хода, до максимума, который должен быть где-то в два – три раза больше номинальной частоты работы двигателя.

Таблица 1

**Преимущества и недостатки off-line методов идентификации**

Метод идентификации	Преимущества	Недостатки
Короткое замыкание	Позволяет идентифицировать изменение временных констант короткого замыкания, можно идентифицировать переходные процессы по продольной оси, при установившемся режиме возможно измерить $X_d$	Во многих условиях не только невозможно получить такого рода экспериментальные условия, но и очень непросто устанавливать и снимать нагрузку на систему
Режим холостого хода	Предоставляет данные для продольной и поперечной осей	Проведение несколько затруднено, для большинства машин трудно или невозможно достичь условий ненасыщения, что усложняет тестирование и анализ результатов
Частотные испытания	Можно получить скорости изменения величин статора или поля в широком диапазоне частот	Могут возникнуть проблемы, связанные с отсутствием учета эффектов вращения

**On-line методы идентификации.** Алгоритм расширенного фильтра Калмана (The unscented Kalman filter – UKF) выполняет идентификацию параметров, оценивая матрицу состояния в каждый момент времени. Задав начальную величину состояния, а затем выполнив преобразование среднего значения и ковариации, можно получить величину состояния в следующем временном интервале [15]. Данный метод подразумевает выбор некоего минимального набора сигма-точек для данных матожидания и ковариации искомого вектора с наложенными на него случайными помехами. По сигма-точкам строятся нелинейные функции прогноза, которые затем используются для вычисления матрицы кроссковиариации. Когда параметр в матрице состояний стабилен, это идентификационное значение параметра.

С помощью данного алгоритма в режиме онлайн можно идентифицировать сопротивление ротора, взаимную индуктивность и потокосцепление.

Адаптивная система с эталонной моделью (MRAS).

Оценка на основе MRAS является одним из лучших методов из-за его хорошей производительности и прямого подхода к стабильности. Метод реализован с использованием концепции, предложенной Ландау, основная идея которой состоит в том, чтобы сравнить выходные данные опорной, адаптивной модели и подходящего механизма адаптации для минимизации ошибки между двумя моделями (рис. 3) [16].

Важной информацией, приводящей в действие механизм адаптации, является разница между выходными данными эталонной модели и настраиваемой модели. Применяя MRAS, например, для оценки скорости, опорной моделью является сам СД, адаптивная модель представляет собой подходящее уравнение, в котором задействована скорость ротора.

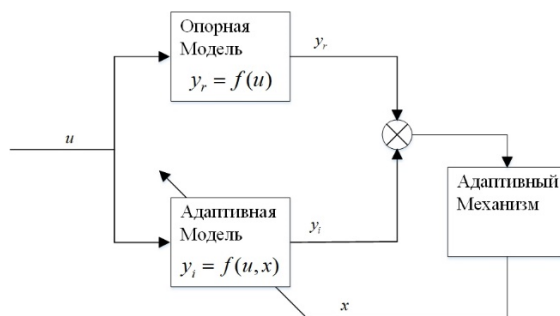


Рис. 3. Структура идентификации MRAS

Таблица 2

**Преимущества и недостатки on-line методов идентификации**

Метод идентификации	Преимущества	Недостатки
UKF	Высокая точность идентификации, большое количество идентифицируемых параметров, возможность оценки непредсказуемых состояний, имеет фильтрующий эффект и может уменьшить некоторые помехи	Алгоритм является сложным, требуется хорошая производительность вычислительной техники
MRAS	Небольшой объем вычислений и высокая точность	Эталонную модель трудно определить
Метод наименьших квадратов	Высокая точность и хорошая надежность, возможна как онлайн, так и оффлайн идентификация	Чувствителен к шуму измерения и колебаниям скорости, оценочное значение существует с несколькими решениями и проблемами отклонения из-за особенности структурной матрицы.

**Метод наименьших квадратов.** Экспериментальные данные на всей стадии отбираются посредством полного измерения. Затем кривая наименьших квадратов рассчитывается и аппроксимируется в автономном режиме, и получают идентифицированные результаты.

В таблице 2 приведены преимущества и недостатки рассмотренных on-line методов идентификации синхронного двигателя.

**Анализ результатов.** В этой статье были рассмотрены основные факторы, приводящие к изменению параметров двигателя. Описаны широко используемые методы и алгоритмы оценки параметров синхронных двигателей с обмоткой возбуждения. Путем анализа и обобщения собранной информации можно сделать следующие выводы:

- параметры синхронного двигателя изменяются в основном под воздействием изменения температуры внешней среды. Если система управления требует определенной точности управления, может быть выбран метод управления, который в основном определяет сопротивления обмоток двигателя.
- offline методы идентификации параметров имеют много разновидностей. По сравнению с методом эксперимента сброса нагрузки и короткого замыкания метод частотных испытаний используется наиболее широко, технология является наиболее зрелой, а точность идентификации более точной и надежной;
- среди online методов можно выделить метод с использованием MRAS, но отсутствие точной методики определения параметров механизма адаптации заставляет находить пути решения для их определения экспериментально.

#### Список литературы

1. Sascha Kühl. Synchronous generator parameter identification from measurement data // Technische Universität München TUM School of Engineering and Design, Munich, 2022.
2. D. Schröder, Elektrische Antriebe - Grundlagen, 4th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
3. Сотников В.В. Электрические машины: в 2 ч. Ч. 2. Синхронные машины. Машины постоянного тока: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. 126 с.
4. Лицин К.В., Шрам В.А., Маннанов Н.И., Головкин С.А. Исследование схем замещения синхронного двигателя с обмоткой возбуждения // Наука и производство Урала. 2022. Т. 18. С. 65-69.
5. Amien S., Yoga W., Fahmi F. Analysis of temperature changes on three-phase synchronous generator using infrared: comparison between balanced and unbalanced load // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 309 (2018) 012036 DOI:10.1088/1757-899X/309/1/012036.
6. Erick F. Alves; Jonas K. Nøfland; Giancarlo Marafioti; Geir Mathisen Online parameter identification of synchronous machines using Kalman filter and recursive least squares // IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. DOI: 10.1109/IECON.2019.8926707.
7. Olivia Ramya Chitranjan, V.Gowrisree Electromagnetic and Thermal Analysis of a Synchronous generator // International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 5, Issue 4, April-2014.
8. Пуканов А.В., Лицин К.В., Басков С.Н. Разработка системы управления асинхронным электродвигателем на основе адаптивной модели в условиях листопрокатного производства // Черные металлы. 2022. № 5.
9. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 2-е изд. Ленинград: Изд-во «Энергия», 1974. 840 с
10. Vesely L. Vesely Z. Bradac MRAS identification of permanent magnet synchronous motor parameters // IFAC-PapersOnLine Volume 51, Issue 6, 2018.
11. Лицин К.В., Головкин С.А., Маннанов Н.И., Шрам В.А. Исследование схем замещения синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 357-362.
12. Hongxu Yin, Yanfei Wei, Yingjie Zhang, Panpan Jing, Deyu Cai, Xumin Liu Identification of control parameters of the permanent magnetic synchronous generator using least square method // 2021 International Conference on New Energy and Power Engineering DOI: 10.1016/j.egy.2022.02.034.
13. Cao-Minh Tay, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori MRAS-based Speed Sensorless Control for Induction Motor Drives Using Instantaneous Reactive Power // IECON01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
14. Hasni O., Touhami R., Ibtouen M., Fadel S. Caux Synchronous Machine Parameter Estimation By Standstill Frequency Response Tests // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 59. NO. 2. 2008. P. 75–80.
15. Erick F. Alves; Jonas K. Nøfland; Giancarlo Marafioti; Geir Mathisen Online parameter identification of synchronous machines using Kalman filter and recursive least squares // IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. DOI: 10.1109/IECON.2019.8926707.
16. Cao-Minh Tay, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori MRAS-based Speed Sensorless Control for Induction Motor Drives Using Instantaneous Reactive Power // IECON01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

Лицин Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент, [k.litsin@rambler.ru](mailto:k.litsin@rambler.ru), Россия, Новотроицк, Новотроицкий филиал Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,

Морозков Дмитрий Андреевич, студент, [don\\_mor@bk.ru](mailto:don_mor@bk.ru), Россия, Челябинск, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

#### RESEARCH IDENTIFICATION ALGORITHMS FOR A SYNCHRONOUS MOTOR WITH EXCITATION WINDING

K.V. Litsin, D.A. Morozkov

Recently, the determination of the angular position using sensorless methods has become an actual direction. Almost all of them are based on engine parameters that change during its operation. The article studies the identification algorithms for a synchronous motor with an excitation winding. The analysis of the methods necessary for accurate determi-

nation of the engine parameters was carried out. The methods are divided into 2 groups: methods used before starting the engine (off-line methods) and methods used in the engine operation mode (online methods). Conclusions are drawn about the need to use certain methods to determine the parameters of the engine during its operation.

Key words: synchronous motor with excitation winding, electric drive identification, offline methods, online methods, electric drive.

Litsin Konstantin Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, [k.litsin@rambler.ru](mailto:k.litsin@rambler.ru), Russia, Chelyabinsk, South Ural State University (National Research University),

Morozkov Dmitry Andreevich, student, [don\\_mor@bk.ru](mailto:don_mor@bk.ru), Russia, Chelyabinsk, South Ural State University (National Research University)

УДК 656.073.7

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-367-368

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ МАРШРУТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В МЕГАПОЛИСЕ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РАБОТЫ ВОДИТЕЛЕЙ И МОНИТОРИНГА В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В.В. Рубинов

В современном мире особое место занимают грузовые перевозки. Важность эффективно организованных цепей поставок сложно переоценить. Одной из важных отраслей транспортной логистики является система работы с твердыми коммунальными отходами. В статье рассмотрены вопросы, связанные с замкнутой информационной системой управления потоком твердых коммунальных отходов в системе работы с отходами. А именно возможности динамического управления и прогноза которые данная система позволяет проводить. Обоснована актуальность централизованного управления системой. Описана система работы с отходами, определены ее специфические особенности. Определены структурные элементы существующей системы управления отходами. С использованием современных информационных систем контроля и прогноза данные были получены исходные данные о работе перевозчика в системе транспортировки отходов. Данное исследование было посвящено анализу такого явления как «эффект прикатывания» водителей на сборные маршруты, то есть динамическому изменению скорости работы в процессе изучения специфики конкретного маршрута. Была разработана математическая модель описания системы работы с отходами. В процессе исследования были собраны исходные данные по одиннадцати сборным маршрутам вывоза твердых коммунальных отходов на исследуемой территории, были структурированы ряд параметров, на основании которых был определен и исследован коэффициент изменения скорости сбора. Одним из основных выводов можно считать то, что лицу, принимающему решения необходимо при оценке мощностей для обслуживания новой территории закладывать дополнительные резервные мощности в объеме 30% что бы обеспечить максимально бесперебойную работу первых трех недель работы. Именно неверная оценка человеческого фактора привыкания приводит на практике к мусорным коллапсам при заходе новых перевозчиков на обслуживаемую территорию. И напротив, оптимизировать количество маршрутов и резервных транспортных средств можно лишь, по истечению периода «прикатывания». На основании результатов исследования были сделаны выводы о дальнейшем использовании этого коэффициента на практике, и в динамических прогнозных имитационных моделях, а также определена область дальнейшего исследования.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, система обращения отходов, регионы, сборные маршруты, твердые коммунальные отходы, мусор, система обращения отходов, транспортное предприятие, математические модели, эффективность, влияние человеческого фактора, уровни планирования, прогнозные модели, система транспортировки отходов, специализированный транспорт, мусоровозы.

В современном мире логистики особое место занимают грузовые перевозки. Важность эффективно организованных цепей поставок сложно переоценить. В различных сферах логистики, будь то: управление цепями поставок, управление производством или организации бесперебойной доставки продукции, появляются все новые и новые методы контроля и повышения эффективности работы. Лицам, принимающим решения нужны все более точные и инструменты прогноза, контроля и отчетности. На организацию максимально эффективного маршрута влияет множество факторов, один из которых - человеческий фактор: знание водителем маршрута и способность быстро выполнять свою работу.

Система обеспечения нормальной эксплуатации жизненного пространства городов и поселков городского типа формируется органами жилищного коммунального хозяйства. Одним из основных видов их деятельности является вывоз твердых коммунальных отходов (далее ТКО [4]) из зон накопления, расположенных вблизи жилого фонда [10].

Накопление, вывоз, сортировка, утилизация ТКО является не только социальным, но и коммерческим проектом. Эффективность работы такого проекта в первую очередь зависит от оперативного управления функционирования всей рассмотренной технологической цепочки. Таким образом в городской среде активно формируется «Умная городская среда» на всех уровнях власти [11,12].

**Логистика в системе работы с отходами.** Совершенно очевидно, что система работы с твердыми коммунальными отходами (далее ТКО [4]) является одной из важнейших отраслей транспортной логистики. В работах [1,2,3,4,13] не раз отмечалась особая транспортно-логистическая специфика и важность данной сферы деятельности. С точки зрения логистики, большая часть транспортной работы на первом плече вывоза ТКО, является классическим сборным маршрутом. Иными словами, водитель мусоровоза объезжает N контейнерных площадок в смену, собирая при этом отходы в прессующий бункер и осуществляя выгрузку собранных ТКО согласно действующим на территории схемам движения потоков отходов. План-задание водителя при этом может быть достаточно большое и содержать в себе более 100 контейнерный площадок. Пример сборного маршрута показан на рис. 1.