

# **Состояние и перспективы развития электротрансмиссий для электрического и гибридного транспорта на 2015 год**

## **The Present State and Trends of the Powertrain Evolution of Electric and Hybrid Vehicles in 2015**

Анучин А.С., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Остриров В.Н., Русаков А.М.

Alecksey Anuchin, Vladimir Kozachenko, Maxim Lashkevich, Vadim Ostrirov, Anatoliy Rusakov

### **Аннотация**

В статье рассмотрено состояние современного гибридного и электрического транспорта в России и за рубежом. Рассмотрены преимущества и недостатки решений последних лет на примере электровозов, производимых ООО «Уральские локомотивы», электромобиля Ellada, макетного образца бронетранспортера, выполненного по НИР «Крымск», автомобилей Tesla Motors, гибридных автобусов фирмы Siemens. Приведено детальное сравнение различных типов электрических машин переменного тока, которые используются в составе тяговых электроприводов. Для вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением представлены осциллограммы режимов работы самосенсорной идентификации положения ротора электрической машины; приведены графики, иллюстрирующие восстановленный угол. Дана краткая информация о новом отечественном микроконтроллере NT32M4F1, специально разработанного для задач управления электродвигателями и силовыми преобразователями.

### **Abstract**

The present state and trends of the powertrain evolution of electric and hybrid vehicles in Russia and worldwide are considered in this paper. The advantages and limitations of the solutions from recent years are shown. The electric trains produced by LLC “Uralskie lokomotivy”, electric car Ellada, Tesla Motors cars, experimental model of armored troop-carrier (R&D project Krymsk) and Siemens hybrid busses are considered. The detailed comparison of various alternating current motor types currently used for traction is given. The graphs of operation in self-sensored mode for switched-reluctance motor with external excitation are

shown; the graphs with angle estimation are presented too. The information about the novel Russian microcontroller NT32M4F1 for motion control applications is given.

## **Ключевые слова**

Электрический и гибридный транспорт, тяговый электропривод, электромобиль, самосенсорное управление.

## **Keywords**

Electric and hybrid vehicles, traction drive, electric car, self-sensored control.

## **Введение**

Электрический и гибридный транспорт — это динамично меняющаяся область техники. Однако следует отметить разные принципы, диктующие изменения во всем Мире и России в частности. Эти различия существенны, так как диктуются совершенно разными условиями. Если в Мире всем движет извлечение прибыли, то в России сокращение расходов за счет импортозамещения.

Из мировых тенденций следует выделить: применение гибридного и электрического транспорта в системе распределенной генерации энергии; продолжающаяся, но пока безуспешная, разработка мотор-колес для автомобилей; работы по оптимизации топологий и алгоритмов работы тягового электрооборудования, исследования в области использования топливных элементов, аккумуляторов и суперконденсаторов для накопления энергии. В качестве сдерживающих факторов здесь следует отметить слабую заинтересованность в модернизации отработанных, но не лучших решений. В России в последний год намечен курс на модернизацию и увеличение эффективности существующего парка транспортных средств. Снижение стоимости за счет перехода к отечественным комплектующим или хотя бы сборкам силовой и управляющей электроники.

## **Отечественные проекты**

В настоящее время отечественных проектов, связанных с разработкой гибридных и полностью электрических трансмиссий достаточно много. Однако многие из этих проектов либо развалились, либо оказались укомплектованы импортным оборудованием, что в условиях сложившейся экономической ситуации привело к их существенному удорожанию и фактически прекращению производства. К таким решениям можно отнести Уральские локомотивы и электромобиль Lada Ellada.

В электровозах используется электропривод фирмы Siemens [1]. Решение базируется на тяговом асинхронном электродвигателе и силовом преобразователе, выполненном на IGBT с номинальным напряжением 6,6 кВ по схеме 3-фазного шестиключевого инвертора, питаемого от контактной сети 3 кВ. Решение нельзя назвать эффективным и современным, так как частота коммутации транзисторов ограничена, что неизбежно должно приводить к возникновению паразитных гармоник как в цепях питания, так и в двигателе. Наличие паразитных составляющих может оказывать влияние на системы автоведения поездов и путевую автоматику и требует установки дополнительных массивных сетевых фильтров. Конечно, электровоз сам по себе нуждается в балласте, но сетевой дроссель в любом случае получается дороже простого груза. Наличие высших гармоник в выходном токе неизбежно влияет на КПД двигателя.

Оптимальной для данного уровня напряжения (3 кВ) в настоящее время могла бы стать схема трехуровневого инвертора (см. рис. 3) которая может использовать последовательное соединение IGBT с номинальным напряжением 3,3 кВ. В этом случае частота коммутаций может быть несколько выше, чем для IGBT на 6,6 кВ, а применение 3-х уровневых инверторов вместе с удвоением эффективной частоты коммутации ключей в стойке позволяет качественно формировать ток в обмотках электрической машины, а пульсация мощности по входу преобразователя снизится на порядок.

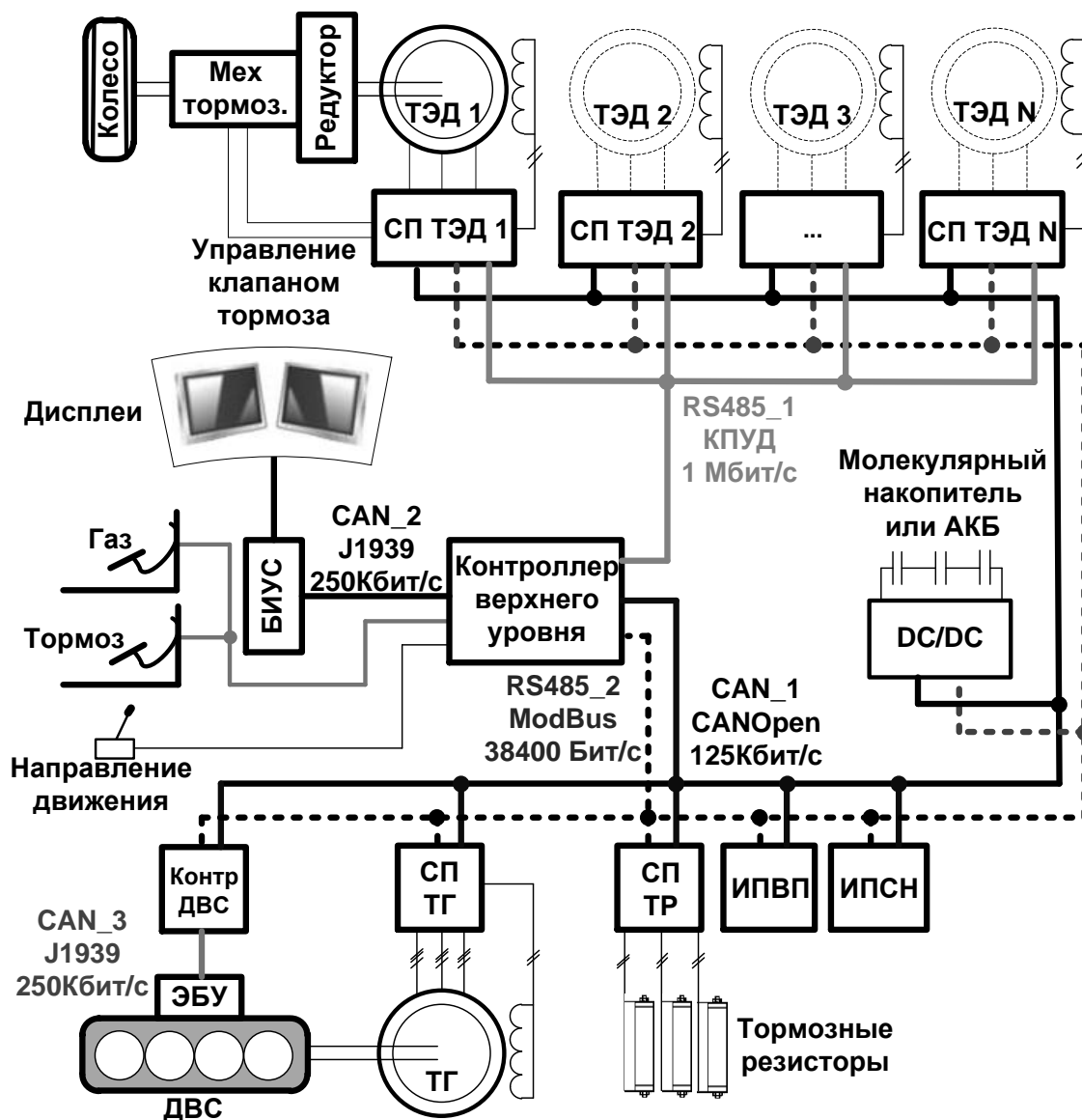
Касаемо электромобиля Лада ситуация оказалась еще сложнее, так как электропривод строится целиком на импортных компонентах, при этом его цена становится определяющей в стоимости автомобиля. Стоимость остального «железа» составляет не более 30%. Тяговый электропривод выполнен на асинхронном двигателе и производится швейцарскими фирмами MES и Бруса. Аккумуляторы закупаются в Китае [2]. В связи с падением курса рубля стоимость только электрической части превысила 500 тыс. руб., что делает автомобиль недоступным для целевой аудитории автомобилей Лада, хотя увеличение стоимости автомобиля должно окупиться примерно за 5 лет при пробеге в 25 000 км/год с учетом экономии не только на бензине, но и на парковке, транспорте, налоге и т.д.

Другая система с асинхронным электроприводом устанавливается на троллейбусы и уже долгое время успешно эксплуатируется. Здесь недостатков значительно меньше. С другой стороны, представим себе Жигули 2107, который мы хотим сделать современным гибридным автомобилем. Для этого вместо бензинового двигателя установим гибридную силовую установку, бензобак частично заменим суперконденсаторами. Автомобиль поехал, но что-то не так. Он остался по-прежнему старым и не удовлетворяет нашим эстетическим требованиям, проигрывает по аэродинамической эффективности и

комфорту подвески. Именно так воспринимается решение с заменой тягового электродвигателя постоянного тока на троллейбусах асинхронным частотным регулированием. Механический дифференциал «уродует» современный троллейбус. Он не позволяет опустить пол в районе задних колес; системы помощи водителю могут вмешиваться только посредством механических тормозов.

Эффективным может быть лишь решение, гармонично объединяющее все лучшее во всех областях — кузов, подвеска, трансмиссия, аэродинамика и эргономика. Модернизация по кусочкам ничего не дает — техника не может конкурировать с западными аналогами. Подтверждением этому может служить огромный список недоведенных проектов, приведенный в [3].

Между тем, разработки тягового электропривода выполняются и собственными силами. В НИР «Крымск» впервые в Мире были применены вентильно-индукторные двигатели с независимым возбуждением (не путать с вентильно-индукторными двигателями с самовозбуждением или SRD в англоязычной литературе). Трансмиссия построена по схеме «мотор — полуось» [4]. Структура трансмиссии приведена на рис. 1. В процессе испытаний макетный образец транспортного средства достиг максимальной скорости 97 км/ч, преодолел подъем 30 градусов на бетонном покрытии, произвел разворот на месте на сухом асфальте с радиусом разворота 3,8 метра. Были проверены все специальные режимы работы: движение «от молекулярного накопителя» с заглушенным ДВС, запуск ДВС от генератора, режим «торможения дизелем», накопление энергии торможения в молекулярный накопитель.



*Рис. 1. Схема последовательного гибрида на примере трансмиссии НИР «Крымск»*

В октябре 2015 года появилось первое видео [5] с новой разработкой ОАО «КАМАЗ» — «Платформа-О» в рамках данного ОКР была разработана дизель-электрическая трансмиссия с электромоторами, которые встроены в колеса транспортных средств [6]. Фотография тягача с колесной формулой 16x16 приведена на рис. 2. К сожалению, более подробной информации в открытых источниках по данному проекту не представлено.



*Рис. 2. Гибридный тягач ОКР «Платформа-О» с мотор-колесами по формуле 16x16*

## **Зарубежные проекты**

Среди зарубежных проектов следует выделить победное шествие автомобилей Tesla Motors. К ним присоединяются другие производители. В качестве основы тягового привода чаще всего используется асинхронный двигатель. Значительно изменился подход к проектированию данных электрических машин, так, оригинальным способом производится отвод тепла от ротора [7]. Вал двигателя полый, с одного конца имеется отверстие, в которое заводится трубка для подвода жидкости. Внешняя поверхность трубки имеет лопасть в несколько витков на всю длину трубки, обеспечивающую турбулентное движение охлаждающей жидкости по внутренней поверхности полого ротора. Такая конструкция позволяет эффективно отводить тепло от ротора, при этом все жидкостные элементы оказываются расположенными изолировано от электрических частей.

Следует отметить, выдающиеся параметры силовой установки. Вес двигателя составляет всего 68 кг при заявленной мощности от 235 до 416 л.с. в зависимости от исполнения, что для модели с мощностью 416 л.с. (306 кВт) дает удельную мощность 4,5 кВт/кг. Однако если присмотреться внимательно, то можно увидеть несколько особенностей. Максимальная скорость ограничена у этой модели на уровне 209 км/ч, хотя характеристика двигателя явно позволяет разогнаться дальше [8]. Это ограничение дает повод предположить, что мощность заявлена лишь для кратковременного режима работы (разгон/торможение), а ограничение скорости дается по тепловому режиму. Чтобы оценить реальную мощность в продолжительном режиме на максимальной скорости воспользуемся имеющимися данными [9]. Произведение коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  на площадь лобового сечения  $C_x A = 0,567 \text{ м}^2$ , максимальная скорость

$V_{max} = 58 \text{ м/с}$ , плотность воздуха при  $25^\circ \text{ С}$   $\rho = 1,2041 \text{ кг/м}^3$ , тогда сопротивление потоку встречного воздуха составит:

$$F_{\text{возд}} = \frac{1}{2} C_x A \rho V_{max}^2 = 1150 \text{ Н.} \quad (1)$$

Трение качения колес можно оценить из коэффициента  $k = 0,014$  и массы автомобиля  $m = 2108 \text{ кг}$  по формуле:

$$F_{\text{трения}} = k g m = 290 \text{ Н.} \quad (2)$$

Таким образом, с учетом КПД редуктора  $\eta \approx 0,98$  мощность на валу двигателя для движения с максимальной скоростью должна составлять:

$$P = \frac{(F_{\text{возд}} + F_{\text{трения}}) V_{max}}{\eta} = 85,3 \text{ кВт.} \quad (3)$$

Рабочая точка в данном случае будет находиться в зоне ослабления поля, где в длительно допустимом режиме двигатель может работать с номинальной мощностью [10]. То есть мощность, развиваемая двигателем в самом тяжелом продолжительном режиме, составляет всего 85,3 кВт с возможной перегрузкой до 306 кВт. В итоге удельная мощность для продолжительного режима работы составит всего 1,25 кВт/кг при удельной мощности 4,5 кВт/кг для кратковременного режима разгона или торможения. Стандартный промышленный асинхронный двигатель мощностью 90 кВт имеет удельную мощность около 0,2 кВт/кг, что в 6 раз хуже двигателя автомобиля Tesla, но следует учесть, что в автомобилях Tesla применяется жидкостное охлаждение вместо воздушного и беличья клетка ротора выполнена из меди вместо алюминия. Так что подобные показатели достижимы, хотя степень оптимизации и продуманности трансмиссии в целом с учетом особенностей эксплуатации находятся на высоте. Более полные данные по испытанию и разбору трансмиссии Tesla Model S доступны в [11] и [12].

Вместе с тем, в городской транспорт постепенно проникают тяговые электроприводы с синхронными машинами на постоянных магнитах. Так, на конференции EPE2014 в гор. Лаппеенранте в одном из пленарных докладов представители компании Siemens показали прототип автобуса, в котором они сделали «шаг назад», перейдя от схемы с индивидуальным асинхронным приводом на колесо обратно к системе с дифференциалом и одним тяговым двигателем — на этот раз синхронным с постоянными магнитами. Диапазон ослабления поля в двигателе с постоянными магнитами ограничен 1,5 – 2,0, так что данный вид автобуса, скорее всего, может использоваться лишь в городских условиях, избегая движения по автомагистралям.

Также на различных конференциях в 2015 году было представлено множество докладов по расчету, разработке и созданию мотор-колес со встроенными двигателями с постоянными магнитами, однако реальных решений пока не наблюдается. Очевидно, что нерешенными проблемами остаются неподрессоренная масса и невозможность встроить в данный объем полноценный механический тормоз, что не позволяет добиться необходимой надежности и сертифицировать изделия.

Все это разнообразие решений требует некоторой систематизации по типам используемых электрических машин, с тем, чтобы определить области их рационального применения.

## **Электрические машины тягового электропривода**

Человечество уже применило все типы электрических машин в тяге, но пока не было подходящих электрических преобразователей, очевидный выбор был сделан в пользу электропривода постоянного тока с последовательным возбуждением. С появлением полностью управляемых полупроводниковых ключей в транспорте стали появляться новые типы электроприводов. Можно выделить четыре основных типа двигателей и приводов нового поколения: асинхронный (АД), синхронный с постоянными магнитами (СДПМ), вентильно-индукторный (ВИД), вентильно-индукторный с независимым возбуждением (ВИДсНВ). Рассмотрим их подробнее.

Асинхронный. Основной общепромышленный привод. Активно применяется в тяге: электровозы, автомобили (Tesla Motors). Достаточно хорошо подходит для колесного и ЖД транспорта без применения коробок переключения передач, так как имеется возможность работать в режиме постоянства выходной мощности в широком диапазоне скоростей [3, 13]. К недостаткам можно отнести следующие моменты. Диапазон постоянства мощности хуже, чем у ВИД и ВИДсНВ. Потери в роторной цепи надо отводить. Примерно 1/3 потерь выделяется в роторе машины. В автомобилях Tesla Motors было реализовано запатентованное решение в виде полого стаканообразного ротора, которое позволяет сделать эффективный теплоотвод тосолом, однако данное решение ограничивает свободу конструктивного размещения машины в установке, увеличивает габариты. Данный тип привода имеет несколько большую установленную мощность преобразователя (20-30% по току) по сравнению с СДПМ и ИМсНВ.

СДПМ. Категорически не подходит для колесных транспортных средств и ЖД транспорта за счет очень малой зоны работы с постоянством мощности (отношение максимальной скорости к номинальной не более 1,5–2). По этой причине применяется только в городских автобусах (Siemens, предполагаемое ограничение скорости 50–60



км/ч), но не в рейсовых. Между тем, применение возможно во флоте и на моторных самолетах, так как у гребного винта и винта самолета максимальная нагрузка приходится на максимальную скорость, что идеально подходит данному типу двигателя. Но при этом машина имеет существенные недостатки. Из-за наличия постоянных магнитов двигатель при вращении становится генератором. В случае отказа двигателя или его силового преобразователя во избежание пожара (вследствие наведенной ЭДС) требуется затормозить и зафиксировать вал гребного винта или пропеллера механически, или расцепить вал рабочего органа и двигатель. Кроме того, сборку и разборку двигателя можно осуществлять только в заводских условиях с применением специального оборудования из-за огромной силы, возникающей между постоянными магнитами и статором машины. Данный тип двигателя считается наиболее энергоемким, так как применение постоянных магнитов снижает долю активных частей (железа и меди) цепей возбуждения примерно на 20-40%, однако сильное взаимодействие между постоянными магнитами и статором требует значительного усиления конструкции двигателя, что в большинстве случаев не позволяет сократить массу двигателя. Двигатель имеет большие потери холостого хода, уменьшающие эффективность движения на большой скорости с невысокой нагрузкой (движение по трассе). Появляется проблема с перегревом двигателя при буксировке с выключенной системой охлаждения.

ВИД. Один из двигателей, чья характеристика (так считается) идеально подходит для транспортных применений. Он действительно может быть выполнен в меньших габаритах, чем аналогичный асинхронный двигатель, но силовой преобразователь имеет в два раза больше элементов, а токовая нагрузка также выше, чем в классических трехфазных машинах, где обмотки соединены в звезду. Итог: очень большой, избыточный преобразователь. По неподтвержденной информации данный тип привода предполагается использовать в системе электрического руления самолетов, которую для SSJ-100 и MC-21 разрабатывает АЭРОЭЛЕКТРОМАШ [14]. Двигатель имеет еще одно важное преимущество по сравнению с асинхронной машиной, заключающееся в сильной разнице индуктивностей разных фаз в зависимости от положения, что позволяет сделать систему полностью бездатчикового или самосенсорного управления (когда сама магнитная система двигателя выступает в роли датчика положения ротора), подобно описанную в [15].

ВИДсВН. Представляет собой гибрид вентильно-индукторного двигателя и синхронной машины с независимым возбуждением. Математическое описание ВИДсВН совпадает с математическим описанием синхронной машины и простую конструкцию. Успешно применяется в НИР «Крымск» [4] и на ряде объектов ЖКХ [16, 21].

Машина хорошо управляема, регулируется момент, постоянство мощности поддерживается в широком диапазоне скоростей (до 17 к 1). Машина может быть секционирована (несколько статорных обмоток на один ротор) для увеличения надежности и увеличения мощности. В настоящее время поставлены эксперименты и разрабатывается система самосенсорного управления, позволяющая исключить датчик положения ротора для увеличения надежности системы. Принцип самосенсорного управления строится на анализе магнитной анизотропии электродвигателя, которая меняется при изменении положения ротора [17, 18, 19], как это классически применяется для машин с постоянными магнитами. Например, инжекция высокочастотного сигнала в напряжение статора приводит к появлению высокочастотной составляющей тока, годограф которого однозначно определяет положение ротора двигателя. Данное решение нельзя реализовать для АД.

## **Перспективы развития тягового электропривода**

Очевидно, что в следующие несколько лет должны выделиться явные лидеры по типам двигателей и их применимости в разных задачах. Пока в этом творится полная неразбериха. Она происходит из-за стремления разработчиков использовать свои наработки в тяге из других областей. И пока уровень оптимизации еще далек от предельного, а полностью технические характеристики до конца не раскрыты и не исследованы, разные типы приводов конкурируют друг с другом в одних условиях.

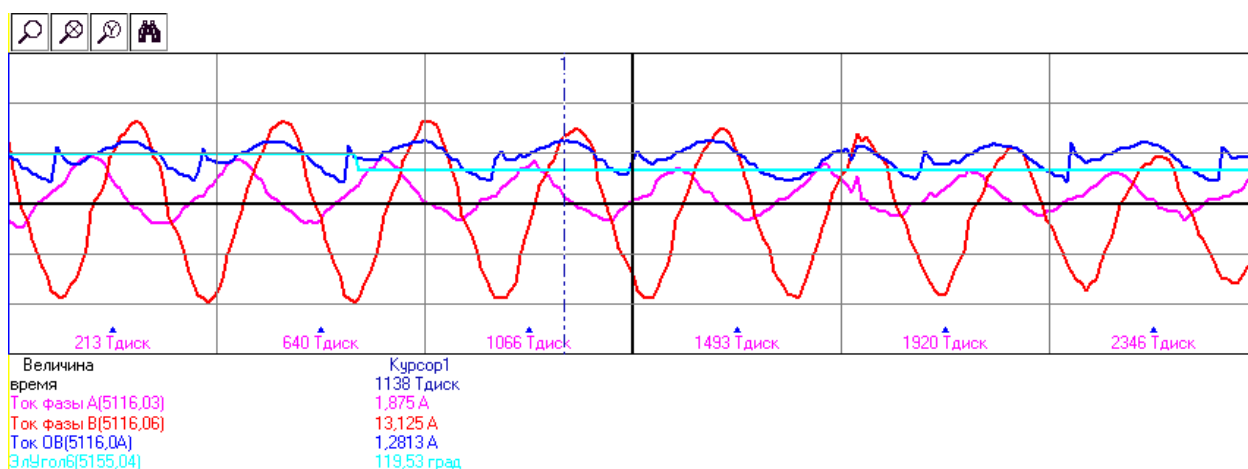
Вторую жизнь получают электроприводы постоянного тока, если к ним добавить совершенный силовой преобразователь. Считается, что тяговая характеристика двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением является характеристикой с постоянством мощности, однако это не так. С уменьшением тока возбуждения падает ток якорной цепи, и зависимость момента получается обратно пропорциональной квадрату скорости. Применение же силовых преобразователей позволяет построить систему управления с раздельным регулированием токов обмотки возбуждения и якорной цепи и относительно простым способом получить не только характеристики с постоянством мощности, но и режим рекуперативного торможения, в который можно попасть практически мгновенно без реверса тока возбуждения релейно-контакторным оборудованием.

Немалые усилия тратятся на разработку самосенсорных (без применения датчика положения или скорости) систем управления. Это направление активно развивается, однако промышленных решений не так много [17, 18, 19]. Самосенсорное управление позволяет избавиться от относительно ненадежного датчика положения ротора.

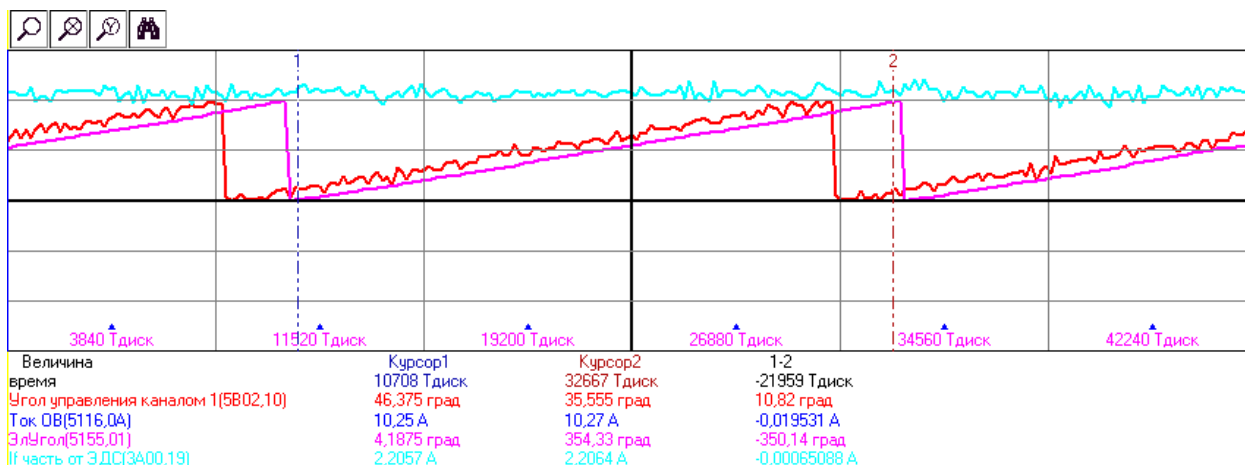
Положение определяется за счет инъекции тестового сигнала и анализа отклика для определения текущей магнитной геометрии машины, являющейся функцией положения ротора. Такой метод определения положения не опирается на измерение ЭДС и применим от нулевых скоростей. Кроме того, установка датчика нежелательна по экономическим соображениям и из-за ограничений, накладываемых на конструкцию.

Задача так и не была решена в полном объеме для асинхронных двигателей из-за очень малой магнитной анизотропии машины, однако для остальных типов машин она реализуема. И если для СДПМ есть проблемы с идентификацией положения с точностью до половины оборота, то для ВИД и ВИДсНВ положение может быть определено в любой момент времени.

Принцип работы самосенсорных систем заключается в подмешивании (инжектировании) высокочастотного сигнала (напряжения) в статорные обмотки и анализ отклика тока в них же. Для ВИДсНВ осциллограммы отклика в токах представлены на рис. 3. Видно, что фазы имеют разную индуктивность, которая изменяется с изменением положения явнополюсного ротора. В отличие от СДПМ в ВИДсНВ есть еще один измерительный канал — это обмотка возбуждения, в которую также проходит инъекция. Фаза переменной составляющей тока в ней однозначно определяется положением ротора. Результаты измерения положения этим методом представлены на рис. 4. Следует отметить, что введение инъекции напряжения несколько снижает КПД двигателя, однако работы по уменьшению амплитуд инжектированного тока за счет применения более совершенных методов выделения и фильтрации ведутся в настоящее время. Эта система должна функционировать только на низких скоростях, где двигатель не обладает достаточной ЭДС для классических алгоритмов бездатчикового управления, построенных на анализе противо-ЭДС.



**Рис. 3. Отклик тока в ВИДсНВ на высокочастотное инжектирование напряжения**



**Рис. 4. Выделение углового положения из отклика тока**

Для реализации систем управления электроприводами и электронными преобразователями при консультациях и поддержке ООО «НПФ Вектор» НИИЭТ гор. Воронеж в 2014 году разработал микроконтроллер NT32M4F1 [20]. Он построен на ядре Cortex-M4F с поддержкой плавающей точки и содержит всю необходимую периферию. В декабре 2015 года планируется производство коммерческой партии. В настоящее время образцы уже прошли успешные испытания на тяговых электроприводах. На базе микроконтроллера NT32M4F1 уже разработаны контроллеры, комплекс отладочных средств и библиотек математических и прикладных функций, реализованы системы векторного управления тяговым электроприводом. Применение отечественного контроллера в системе управления решает главную проблему противодействия возможному применению эмбарго и средств РЭБ против нашей техники.

## Библиографический список

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Уральские\\_локомотивы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Уральские_локомотивы)
2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/EL\\_Lada](https://ru.wikipedia.org/wiki/EL_Lada)
3. Флоренцев, Л. Макаров, В. Менухов, Экономичный экологичный городской гибридный автобус / С. // Электронные компоненты. – 2008. – № 12. – С. 24-39.
4. В. Ф. Козаченко, В. Н. Остриров, М. М. Лашкевич, Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением, Электротехника. - 2014. - № 2. - С. 54-60
5. <https://youtu.be/0rr0ISQKgb4>, "Платформа": первое видео
6. Романов Л., "Платформа О": в России разработаны тягачи для перевозки "Арматы" и тяжелых стратегических ракет "Сармат", Военное обозрение, 12 июля 2015

7. Liquid Cooled Rotor Assembly, US Patent 20090121563 A1, Peng Zhou, Nicholas Robert Kalayjian, Grant Dufresne Cutler, Peteris Koch Augenbergs, Tesla Motors, Inc., 14 мая 2009
8. <http://www.teslamotorsclub.com/attachment.php?attachmentid=23100&d=1370283832>
9. [https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile\\_drag\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient)
10. Ильинский Н.Ф., Основы электропривода, учебник для ВУЗов, – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2003. – 224 с.
11. <http://insideevs.com/video-tesla-model-s-performance-version-dynos-at-368-horsepower/>
12. <https://yadi.sk/i/rcNILUTbjkvkA>
13. Виноградов А.Б., Развитие теории и практическая реализация векторных электроприводов переменного тока с микропроцессорным управлением, дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук., Иваново, 2011
14. <http://technodinamika.ru/press-tsentr/novosti-i-sobytiya/334-kholding-aviatsionnoe-oborudovanie-i-oak-pristupili-k-sozdaniyu-elektroprivoda-kolesa-shassi-ssj-100.html>
15. Алямкин Д.И., Разработка и исследование двухфазного вентильно-индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения, дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук., Москва, 2012
16. Дроздов А.В., Разработка системы бездатчикового векторного управления вентильно-индукторным двигателем с независимым возбуждением, дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук., Москва, 2008
17. Ferreira O, Kennel R: “Encoderless control of industrial servo drives”. Sensorless Control of Electrical Drives – Malta Workshop. University of Malta, Mai 2007.
18. Boller T, Kennel R: “Virtual machine – a hardware in the loop test for drive inverters”. 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2009. Barcelona, Spain, September 2009.
19. David Reigosa, Pablo García, Dejan Raca, Fernando Briz, Robert D. Lorenz, “Measurement and Adaptive Decoupling of Cross-Saturation Effects and Secondary Saliencies in Sensorless-Controlled IPM Synchronous Machines”, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans-EEUU, Sept. 2007.
20. <http://www.niiet.ru/chips/nis?id=354>
21. Русаков А.М., Сафроненков Ю.А., Жердев И.А., Соломин А.Н. Перспективы применения индукторных машин с обмоткой возбуждения. /Электротехника. 2008. № 4, с. 38-44.