

кіл) інвертора та вентильного електродвигуна.

Слід зазначити, що змінні та постійні складові означених спектрограм мають однаковий прядок абсолютних значень струму, що говорить на користь чутливості обраного діагностичного параметра.

### Висновки

Побудована модель адекватно імітує електричні процеси, які відбуваються в силових колах системи електроприводу з вентильним двигуном.

Спектральні характеристики функції струму розряду ВАБ дозволяють проводити якісну і кількісну оцінку пускових та потужнісних режимів електроприводу.

Спектральний склад функції струму живлення характеризується гармоніками, які спричинені комутацією ключів інвертора і перетворювача напруги та визначаються режимними параметрами електроприводу.

Склад домінуючих гармонік в спектрограмах залежить від конструктивних показників електродвигуна та схемного рішення інвертора напруги.

Для підвищення інформативності спектрограм доцільно використовувати різні формати FFT аналізу.

В подальшому розроблена модель може бути використана для віртуальних досліджень динамічних режимів електроприводу та досліджень пов'язаних з ідентифікацією структурних і параметричних несправностей, що виникають в його колах.

### Література

1. Говорущенко Н.Я. Основные направления развития автомобильного транспорта в XXI веке. / Н.Я. Говорущенко // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: РИО ХНАДУ. – 2003. УДК 621.313.333

- Вып. №13. – С 7-11.
2. Гібридні автомобілі / Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатюк А.В. та ін. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
3. Скворцов В.А. Тенденции в развитии транспортных средств с использованием электропривода. / В.А. Скворцов, А. Берестов. // Силовая электроника. – №1. – 2004. – С. 85 – 87.
4. Попов Э.В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1987 г. – С. 34 – 53.
5. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интеллектуальные информационные системы: М. Наука, 2004 г. – С. 24 – 28.
6. Бороденко Ю.М. Диагностика электрообладнання АТЗ. Навчальний посібник. / Ю. М. Бороденко. – Харків : ХНАДУ, 2006. – 330 с.
7. Бороденко Ю.М. Концепція діагностики електроприводу гібридного автомобіля / Ю.М. Бороденко, А.В. Черевач. // Автомобильный транспорт. Сб. Научных трудов. Харьков: ХНАДУ, 2012. – вып. № 30. – С. 59 – 64.
8. Чекалин В.Г. Диагностика и наладка автоматизированных электроприводов. Учебное пособие для ВТУЗов / В. Г. Чекалин. – Душанбе: ТТУ им. М. Осими, 2011. – 211с.
9. Бороденко Ю.М. Якісний аналіз гармонійних процесів по колах живлення електроприводу автомобіля / Ю.М. Бороденко, О.А. Дзюбенко, О.Д. Приходько // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2015. – №.7 – С. 158 – 163.

Рецензент: В.Д. Мигаль, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла в редакцію 20.10.2015

## СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕННЯ КОНВЕРСИОННОГО ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

**В.Я. Двадненко, доцент, к.т.н., ХНАДУ**

**Аннотация.** Рассмотрены особенности рекуперации подзаряжаемого гибридного автомобиля. Предложена методика рекуперативного торможения подзаряжаемого гибридного автомобиля. Разработан для практической реализации предложенной методики блок преобразователя. Задача его преобразовать напряжение вентильного электродвигателя в режиме генератора в рабочее напряжение зарядки тяговой батареи.

**Ключевые слова:** вентильный электродвигатель, конверсия автомобиля, гибридная силовая установка, рекуперация, преобразователь напряжения.

## СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ КОНВЕРСІЙНОГО ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

**В.Я. Двадненко, доцент, к.т.н., ХНАДУ**

**Анотація.** Розглянуто особливості рекуперації гібридного автомобіля який заряджається. Запропоновано методику рекуперативного гальмування такого гібридного автомобіля. Розроблено для практичної реалізації запропонованої методики блок перетворювача. Завдання його перетворити напругу вентильного електродвигуна в режимі генератора в робочу напругу зарядки тягової батареї.

**Ключові слова:** вентильний електродвигун, конверсія автомобіля, гібридна силова установка, рекуперация, перетворювач напруги.

## REGENERATIVE BRAKING SYSTEM CONVERSION HYBRID VEHICLES

**V. Dvadnenko, associate professor, Ph.D., KhNAHU**

**Abstract.** We reviewed the characteristics recuperation Plug-in Hybrid car. The technique of regenerative braking of a hybrid rechargeable car retaining heat. Designed for the practical implementation of the proposed methodology converter unit. His task is to convert the voltage BLDC motor as a generator to the operating voltage of traction battery charge.

**Keywords:** BLDC motor, the conversion of a vehicle, a hybrid propulsion system, electric drive, recuperation, DC-DC convertor.

### Введение

Конверсии обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль обеспечивает существенное снижение стоимости километра пробега и также существенное уменьшение вредных выбросов. Но для такой конверсии необходим недорогой и одновременно имеющий малые габариты и подходящие характеристики электродвигатель. Вентильные электродвигатели (ВЭД) широко применяются в гибридных автомобилях, поскольку имеют высокие значения мощности и КПД при минимальных

габаритах и весе, а также имеют подходящую для тягового электропривода механическую характеристику. Однако тяговые вентильные электродвигатели, пригодные для конверсии имеют высокую стоимость, что снижает экономическую выгоду, а значит и экономическую целесообразность преобразования обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль.

### Анализ публикаций

В работах [1-3] показано, что ВЭД, который удовлетворяет требованиям к гибриднему

электроприводу, может быть создан на базе синхронной электрической машины (СЭМ) мощного автомобильного генератора. Для этого в генераторе нужно установить датчики положения ротора и удалить трехфазный диодный мост. Обеспечить работу этой электрической машины от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) можно только с соответствующими контроллером и силовым коммутатором (инвертором) [1,3]. Кроме того необходимо решить проблемы механической и электрической устойчивости такого ВЭД. Один из вариантов решения этой проблемы рассмотрен в работе [4]. Конструкция ВЭД на основе автомобильного генератора хорошо приспособлена к условиям работы в подкапотном пространстве автомобиля, малые габариты упрощают установку, а благодаря массовому выпуску автомобильных генераторов стоимость ВЭД получается относительно невысокой. Наличие электромагнитного возбуждения обеспечивает возможность в двигательном режиме организовать оптимальное двухзонное управление [5], а в генераторном режиме обеспечить оптимальное рекуперативное торможение. Эти обстоятельства делают перспективным процесс создания ВЭД на основе автомобильных генераторов. Расчет основных параметров такого ВЭД приведен в работе [3].

#### **Цель и постановка задачи**

Настоящая работа посвящена дальнейшей систематизации и обобщению опыта разработки тягового электропривода силовой установки гибридного автомобиля, и в частности работе его в режиме рекуперативного торможения с сохранением энергии в ТАБ. Нагружен ВЭД в режиме рекуперативного торможения может быть либо непосредственно на ТАБ, либо на ТАБ через повышающий DC-DC преобразователь. При этом необходимо рассматривать режимы ограничения тока и ограничения напряжения, необходимость в которых возникает в области рабочих угловых скоростей вентильного электродвигателя (ВЭД) на некоторых ее участках. Режимы ограничения на этих участках необходимо

поддерживать системой автоматического регулирования (САР). Такой интервал угловых скоростей ВЭД занимает большую часть зоны рекуперативного торможения.

#### **Разработка системы рекуперации для гибридного автомобиля**

Наиболее перспективными для электромобилей и гибридных автомобилей являются литий-ионные ТАБ, в частности литий-железофосфатные [1,6]. Такие батареи имеют существенные преимущества по сравнению с ранее разработанными ТАБ, в частности они допускают достаточно большие токи разряда и заряда. В подзаряжаемых гибридных автомобилях или в электромобилях такие ТАБ обязательно требуют контроля и ограничения максимальных зарядных напряжений и токов, как при зарядке от сети, так и при зарядке в процессе рекуперативного торможения [6]. Поскольку электрическая энергия при зарядке ТАБ от сети и при зарядке в процессе рекуперации имеет различные источники и различные исходные параметры, становится необходимым разрабатывать различные системы зарядки ТАБ от сети и от тягового электродвигателя, работающего в режиме генератора.

В настоящей работе рассмотрим систему зарядки ТАБ конверсионного гибридного автомобиля от тягового вентильного электродвигателя, разработанного на основе синхронной электрической машины с электромагнитным возбуждением. В качестве такой синхронной электрической машины выбран автомобильный генератор Г-290 [7]. В отличие от вентильных электродвигателей с высококоэрцитивными постоянными магнитами, такой вентильный электродвигатель имеет возможность простой регулировки вырабатываемых в режиме генератора напряжения и тока с помощью изменения относительно малого тока обмотки возбуждения. Это позволяет существенно упростить и удешевить зарядку ТАБ при рекуперации. Функциональная схема системы зарядки ТАБ от тягового вентильного электродвигателя на основе генератора Г-290 приведена на рис.1.

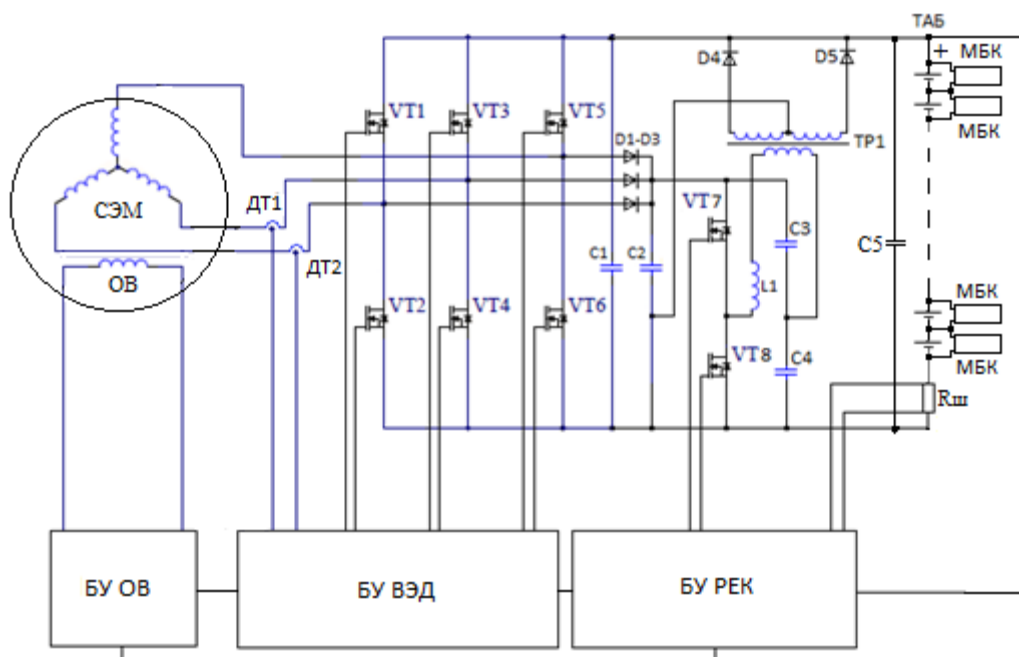


Рис.1 Функциональная схема системы зарядки ТАБ

Рассмотрим работу системы зарядки ТАБ функциональная схема которой приведена на рис.1. Блок управления вентильным электродвигателем (на рис.1 обозначен БУ ВЭД) в режиме генератора обеспечивает закрытое состояние всех управляемых ключей на полевых транзисторах VT1–VT6. Трехфазный мостовой выпрямитель на обратных диодах полевых транзисторов VT1–VT6 и сглаживающем конденсаторе C1 обеспечивает зарядный ток ТАБ при оборотах СЕМ выше оборотов идеального холостого хода (режим 1). В режиме 1 уравнение баланса напряжений цепи якоря будет:

$$E - U_{ТАБ} - R_{я} I_{я} = 0, \quad (1)$$

где  $E$  электродвижущая сила (ЭДС) ВЭД в режиме генератора,  $U_{ТАБ}$  - напряжение ТАБ в режиме зарядки,  $I_{я}$  – ток якорной цепи ВЭД в режиме генератора,  $R_{я}$  сопротивление якорной цепи в режиме генератора. ЭДС ВЭД в режиме генератора может быть найдена, так же, как и ЭДС в режиме двигателя [3]:

$$E = k\Phi\omega, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток возбуждения,  $k$  – конструктивный коэффициент,  $\omega$  – угловая скорость вращения вала генератора. Величина произведения  $k\Phi$  может быть определена расчетно-экспериментальным

путем, аналогично тому, как это описано в работе [3]. Полученная таким образом величина произведения  $k\Phi$  одинакова как в режиме двигателя, так и в режиме генератора при условии равенства тока обмотки возбуждения в обоих режимах.

Ток якоря с учетом (1) и (2) будет:

$$I_{я} = (k\Phi\omega - U_{ТАБ}) / R_{я}.$$

Следовательно, поскольку в режиме 1 напряжение на зажимах питания ВЭД равно  $U_{ТАБ}$ , зарядный ток  $I_3$  равен току якоря  $I_{я} = I_3$ , причем заряд возможен только при положительном значении  $I_3$ . Чтобы построить график  $I_3 = I_3(\omega)$  необходима также зависимость для стабилизированного (ограниченного) тока генератора:  $I_3 = I_{макс}$ . Для Г290Б предельное допустимое значение тока якоря  $I_{макс} = 150A$ .

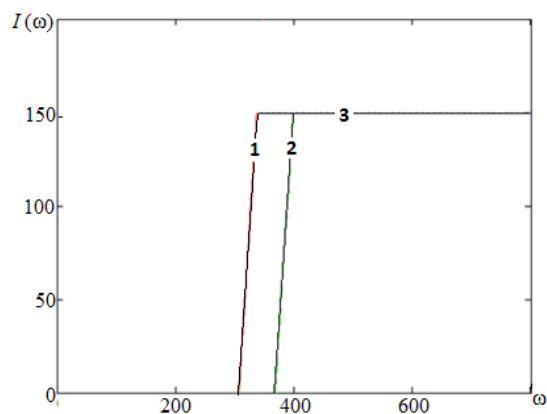


Рис. 2. Зависимость зарядного тока на выходе генератора от угловой скорости

На рис.2 приведена зависимость  $I_3(\omega)$  - зарядного тока на выходе генератора от угловой скорости вала ВЭД. Зависимость 1 для  $U_{ТАБ} = 60В$ , 2 - для  $U_{ТАБ} = 72В$ . Зависимость 3 – участок, где производится ограничение тока генератора,  $\omega \in [\omega_1, \omega_{\max}]$ . Величина  $\omega_1$  – это обороты идеального холостого хода для данного напряжения ТАБ. При зарядке в режиме 1 полное сопротивление якорной цепи генератора Г290Б включает внутреннее сопротивление ТАБ из 20 последовательно включенных литий-железофосфатных аккумуляторных банок WB-LYP90АНА и составляет величину около 0,04 Ом. Стабилизация тока по уровню 150А производится с помощью системы автоматического регулирования воздействием на ток обмотки возбуждения ВЭД через блок управления обмоткой возбуждения (БУ ОВ) . При приближении к полному заряду напряжение ТАБ растет и затем достигает предельного значения, которое недопустимо превышать, поэтому введена вторая петля САР по напряжению ТАБ также путем управления током обмотки возбуждения. При этом подключенные к каждому элементу ТАБ модули батарейного контроля (МБК) обеспечивают стабилизацию предельного напряжения отдельных элементов. Зарядка ТАБ при рекуперации в режиме 1 имеет смысл только в зоне стабилизации тока, зона нарастания тока перед этой зоной кратковременна и непригодна для полноценного служебного торможения, поэтому ее необходимо заменить на описанный ниже режим 2. Поскольку при уменьшении скорости начинает уменьшаться ток заряда, а значит и момент служебного торможения ВЭД, следует в случае прекращения работы петли САР по току предусмотреть переключение на режим 2. В режиме 2, скорость автомобиля  $V < V_{кр}$ , где  $V_{кр}$  – скорость при которой ВЭД имеет обороты равные оборотам идеального холостого хода. При рекуперации в режиме 2, для сохранения энергии в ТАБ, т.е. зарядки ТАБ, выходное напряжение повышается с помощью DC-DC преобразователя. Уравнение баланса напряжений цепи якоря в этом режиме будет:

$$E - (R_{я} + R_{вп})I_{я} = 0,$$

где  $R_{вп}$  входное сопротивление

повышающего DC-DC конвертора для зарядки ТАБ. Якорный ток  $I_{я}$  в этом режиме имеем:

$$I_{я} = E / (R_{я} + R_{вп}).$$

Ток зарядки ТАБ  $I_3$  будет:

$$I_3 = I_{я} \eta_{DC-DC} / K_{DC-DC}$$

Где  $\eta_{DC-DC}$  – КПД конвертора,  $K_{DC-DC}$  - коэффициент повышения напряжения DC-DC конвертора. Режим 3, как и режим 1, обязательно должен иметь две САР – одну по максимальному току якорной обмотки и вторую по предельно-допустимому напряжению ТАБ. Может быть введено, еще и ограничение тока зарядки ТАБ, если есть вероятность превышения его предельного значения. Однако в конверсионном автомобиле в диапазоне скоростей режима 2 из-за ограниченной мощности ВЭД ток вряд ли превысит предельное для литий-железофосфатных батарей значение 3С, где С - емкость ТАБ. Регулирование, как тока, так и напряжения в процессе работы САР для ВЭД с электромагнитным возбуждением в режиме генератора, как уже было сказано, удобно осуществлять изменением тока обмотки возбуждения. Однако, если есть необходимость в этом диапазоне скоростей иметь максимальный тормозной момент при рекуперации, регулирование нужно будет проводить также путем регулирования скважности открытого состояния силовых электронных ключей DC-DC преобразователя. Рассмотрим работу этого преобразователя. В качестве выпрямителя питающего этот преобразователь работает трехфазный мостовой выпрямитель на обратных диодах полевых транзисторов VT2, VT4, VT6, диодах D1 – D3 и сглаживающем конденсаторе С2. Когда обороты СЕМ в процессе торможения снижаются, и напряжение на С2 становится меньше напряжения ТАБ по команде от блока управления рекуперацией (БУ РЕК) начинает работать полумостовой преобразователь. При этом поочередно открываются транзисторы VT7–VT8. Причем рабочая частота этого процесса подобрана так, чтобы обеспечить резонанс контура в который входит емкость конденсаторов С3,С4,С2 и суммарная индуктивность, включающая в себя индуктивность катушки L1 и индуктивность рассеяния первичной обмотки

нагруженного трансформатора ТР1, вторичная обмотка которого нагружена на двухполупериодный выпрямитель на диодах D4 – D5, который в свою очередь нагружен заряжаемым тяговым аккумулятором. БУ РЕК не только управляет транзисторами VT7–VT8, но и следит за напряжением на ТАБ и за током через ТАБ по напряжению на шунте  $R_{ш}$ . С помощью воздействия на ток обмотки возбуждения СЕМ через блок управления током обмотки возбуждения (БУ ОВ) производится ограничение предельного тока и предельного напряжения зарядки. Переключение транзисторов VT7–VT8 в резонансном полумостовом преобразователе производится при нулевом токе, что существенно повышает КПД и позволяет использовать менее мощные, а значит и более дешевые транзисторы. Практическая реализация рекуперативной зарядки ТАБ с использованием резонансного полумостового преобразователя в подзаряжаемом гибридном автомобиле подтвердила работоспособность и высокую эффективность.

### Выводы

Рассмотренные особенности рекуперации конверсионного подзаряжаемого гибридного автомобиля позволяют реализовать дополнительные возможности по экономии топлива и электроэнергии. Предложенная методика рекуперативного торможения подзаряжаемого гибридного автомобиля позволяет также сохранять вырабатываемую электрическую энергию.

Для реализации предложенной методики разработан эффективный блок преобразователя напряжения ВЭД в режиме генератора в рабочее напряжение заряда тягового аккумулятора.

### Литература

1. Конверсія легкового автомобіля в гібридний. / [Бажинов О.В., Двадненко

- В.Я., Хакім Мауш], монографія. – Харків: ХНАДУ, 2014. – 200 с.
2. Бажинов А.В., Двадненко В.Я. Хакім Мауш. Электропривод для конверсионного гибридного автомобиля. Автомобильный транспорт (Харьков), вып.30,2012. с.7 – 12.
3. Двадненко В.Я. Расчет основных характеристик тягового вентильного электродвигателя на базе автомобильного генератора. // Автомобильный транспорт, вып.35, 2014. с.80 - 86.
4. Двадненко В.Я. Обеспечение устойчивости вентильного электродвигателя конверсионного гибридного автомобиля // Вісник НТУ «ХПИ». – 2014 – № 67 (1109). - С. 9 -17.
5. Двадненко В.Я. Особенности двухзонного регулирования вентильного электропривода гибридного автомобиля / В.Я. Двадненко, С.А. Сериков // 75-я Международная научно-техническая конференция ААИ «Перспективы развития автомобилей. Развитие транспортных средств с альтернативными энергоустановками», 14.11 – 15.11.2011 – г. Тольятти, Россия – 2011.
6. Бажинов А.В. Система контроля заряда и разряда литий-ионных аккумуляторных батарей гибридных автомобилей и электромобилей / А.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, А. М. Дробинин, Хакім Мауш.// Вісник СевНТУ- збірник наукових праць. – 2012. – випуск134. – С. 36 – 39.
7. Василевский В.И. Автомобильные генераторы/ В.И. Василевский, Ю.А. Купеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1978. – 159 с.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 12.10.2015