

В.Я. ДВАДНЕНКО, канд. техн. наук, доц. ХНАДУ, Харьков

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КОНВЕРСИОННОГО ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

Рассмотрены особенности применения тягового вентильного электродвигателя на основе генераторной синхронной электрической машины для конверсии обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль. Предложена методика обеспечения устойчивости такого электродвигателя с помощью электронного управления компенсацией реакции якоря. Разработан и практически реализован на основе разработанной методики блок управления возбуждением вентильного электродвигателя на основе автомобильного генератора Г290.

Ключевые слова: компенсация реакции якоря, вентильный электродвигатель, конверсия автомобиля, гибридный автомобиль, электропривод.

Введение. Конверсия обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль обеспечивает существенное, в несколько раз, снижение стоимости километра пробега и также существенное снижение вредных выбросов. Происходит это при эксплуатации автомобиля за счет замены неэкономичных режимов работы ДВС на электропривод, когда вместо углеводородного топлива расходуется значительно более дешевая электроэнергия тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ), запасенная в основном при зарядке от сети, а также при рекуперации. Но для такой конверсии необходим недорогой и одновременно имеющий подходящие характеристики тяговый электродвигатель. Вентильные электродвигатели (ВЭД) с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов широко применяются в гибридных автомобилях и электромобилях. Они имеют высокие значения мощности и КПД при минимальных габаритах и весе, а также имеют подходящую для тягового электропривода механическую характеристику. Однако такие тяговые вентильные электродвигатели, имеют высокую стоимость, что снижает экономическую привлекательность преобразования обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль.

Анализ публикаций. В работах [1-3] показано, что ВЭД, который удовлетворяет требованиям к гибридному электроприводу для конверсии, может быть создан на базе синхронной электрической машины разработанной в качестве мощного автомобильного генератора. Для этого в ней нужно установить датчики положения ротора и микроконтроллер, который по сигналам этих датчиков обеспечит соответствующую работу силовой электроники - управляемого трехфазного моста, формирующего из постоянного напряжения ТАБ переменные напряжения якорных обмоток этого ВЭД [1].

© В.Я. Двадненко, 2014

В автомобильных генераторах применяют синхронные электрические машины с электромагнитным возбуждением. Электромагнитное возбуждение в ВЭД по сравнению с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов несколько уменьшает КПД, но одновременно имеет ряд полезных для гибридного автомобиля преимуществ. Среди них – возможность организовать регулирование во второй зоне посредством управления потоком возбуждения. Это позволяет расширить рабочий диапазон скоростей вращения ротора, а значит, увеличить передаточное число от ВЭД к ведущим колесам. В результате удается повысить пусковой вращающий момент без увеличения запаса мощности ВЭД. Вторым преимуществом использования ВЭД с электромагнитным возбуждением является меньший тормозной момент в обесточенном состоянии, что улучшает накат гибридного автомобиля. Третье преимущество – возможность простого управления ВЭД в режиме высокоскоростного холостого хода и рекуперации (генераторном режиме) путем регулировки относительно небольшого тока системы возбуждения [3].

Конструкция ВЭД на основе автомобильного генератора хорошо приспособлена к работе в подкапотном пространстве автомобиля, а благодаря массовому выпуску автомобильных генераторов стоимость ВЭД получается относительно невысокой. Эти обстоятельства делают перспективной разработку ВЭД на основе автомобильных генераторов.

Цель и постановка задачи. Синхронная электрическая машина с независимым электромагнитным возбуждением, разработанная в качестве автомобильного генератора переменного тока, может быть основой для тягового ВЭД. Однако, в случае применения этой электрической машины в режиме ВЭД, возникает необходимость решить некоторые проблемы. Одной из таких проблем является обусловленное реакцией якоря нарушение электрической и механической устойчивости [6]. В гибридном автомобиле в режиме тягового электропривода такая неустойчивость проявляется в виде сильных ударных перегрузок в трансмиссии и ухудшении разгонной динамики. Целью данной работы является выбор методики компенсации реакции якоря в электрической машине с вращающейся обмоткой возбуждения для обеспечения необходимой устойчивости ВЭД, разработанного на основе автомобильного генератора. Кроме того, целью работы является разработка варианта схемотехнического решения, позволяющего на практике реализовать эту методику.

Разработка методики обеспечения устойчивости ВЭД. В качестве тяговых ВЭД используют синхронные машины, включенные по схемам с достаточно малым межкоммутационным интервалом. Для таких ВЭД в установившемся режиме может быть использована стандартная модель электропривода постоянного тока в предположении о бесконечно малом

межкоммутационном интервале без учета реакции якоря и индуктивности фазных обмоток якоря [3-5]. В этом случае для якорной цепи ВЭД применимо следующее уравнение баланса напряжений:

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

где: U – питающее напряжение ВЭД,

E – ЭДС вращения,

$R_{\text{я}}$ – суммарное сопротивление якорной цепи,

$I_{\text{я}}$ – ток якоря.

С учетом указанных выше упрощений ЭДС вращения E и вращающий момент M для ВЭД определяются соответственно из выражений:

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

$$M = k\Phi I_{\text{я}}, \quad (3)$$

где: ω – угловая скорость ВЭД,

Φ – магнитный поток возбуждения.

Величина Φ без учета реакции якоря будет постоянной. Величина конструктивного коэффициента k в (2) и (3) в системе СИ одинакова и определяется выражением: $k = pN/(2\pi a)$, где: p – число пар полюсов, N – число активных проводников, a – число параллельных ветвей якорной обмотки [3]. Для расчета механической и токоскоростной характеристик ВЭД существенную трудность вызывает определение магнитного потока возбуждения Φ . Поэтому целесообразно определить необходимое для расчетов произведение $k\Phi$ следующим расчетно-экспериментальным путем. Из (1) и (2) для режима холостого хода ВЭД, получаем необходимую для дальнейших расчетов величину $k\Phi$:

$$k\Phi = (U - R_{\text{я}} I_{\text{яxx}}) / \omega_{\text{xx}}. \quad (4)$$

Величины $I_{\text{яxx}}$ – ток якоря и ω_{xx} – угловая скорость ротора полученные экспериментально в режиме холостого хода ВЭД. Из выражений (1) и (2) получим зависимость угловой скорости ВЭД от тока якоря (токоскоростную характеристику):

$$\omega(I_{\text{я}}) = U / (k\Phi) - R_{\text{я}} I_{\text{я}} / (k\Phi). \quad (5)$$

Подставив в (5) выражение для тока $I_{\text{я}}$, полученное из (3), будем иметь зависимость угловой скорости ВЭД от момента на валу (механическую характеристику):

$$\omega(M) = U / (k\Phi) - R_{\text{я}} M / (k\Phi)^2. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) получены без учета реакции якоря, т.е. при $\Phi = \text{const}$. Для учета размагничивающего действия реакции якоря величина Φ может быть представлена в виде:

$$\Phi = \Phi(I_{\text{я}}) = \Phi_0 - \Delta\Phi(I_{\text{я}}), \quad (7)$$

где Φ_0 - поток, создаваемый током возбуждения,

$\Delta\Phi(I_{\text{я}})$ - зависящее от тока якоря уменьшение магнитного потока системы возбуждения ВЭД.

При подстановке в выражения (5) и (6) значения Φ из выражения (7), видим, что увеличение тока якоря увеличивает падение напряжения в цепи якоря и стремится уменьшить скорость вращения, а рост $\Delta\Phi(I_{\text{я}})$ при увеличении тока якоря, наоборот, стремится увеличить скорость вращения. Вид токоскоростной и механической характеристик зависит от того, какой из этих факторов будет преобладать. При более сильном влиянии падения напряжения характеристики имеют падающий характер, в случае преобладания действия реакции якоря возможен возрастающий характер. Преобладание действия реакции якоря имеет место для электрических машин независимого электромагнитного возбуждения с малым воздушным зазором между ротором и статором и высокой индукцией в этом зазоре. Эти особенности конструкции характерны и для автомобильных генераторов. Следует отметить, что в ВЭД с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов преобладания действия реакции якоря не наблюдается, что обусловлено низкой относительной магнитной проницаемостью материала постоянных магнитов, что эквивалентно увеличению зазора [5].

Под устойчивой работой двигателя понимают его способность вернуться в точку равновесия после кратковременного воздействия возмущения, нарушившего это равновесие. Неустойчивая работа будет происходить при возрастающих механических характеристиках двигателя, поскольку, при возмущении любого знака, изменение момента будет приводить к увеличению этого возмущения. В общем виде критерием устойчивости будет неравенство $dM/d\omega < dM_c/d\omega$, где M_c момент сопротивления вращению электродвигателя [4].

Рассмотрим электрическую устойчивость ВЭД. Уравнение баланса напряжений в случае неустановившегося процесса имеет вид:

$$U - (k\Phi\omega + R_{\text{я}}I_{\text{я}}) = L dI_{\text{я}}/dt, \quad (8)$$

где L - индуктивность якорной цепи двигателя.

В установившемся режиме уравнение (8) совпадает с уравнением (1), поскольку в состоянии равновесия $dI_{\text{я}}/dt = 0$. При отклонении от состояния равновесия в случае увеличения тока устойчивость будет обеспечена, если

возникающие изменения соотношения между напряжением U и ЭДС $E = k\Phi(I_{\text{я}})\omega$ стремятся вернуть ток в первоначальное состояние, т.е. вызвать уменьшение тока. При этом производная $dI_{\text{я}}/dt$ будет отрицательной. Соответственно при уменьшении тока производная $dI_{\text{я}}/dt$ будет положительной. Поэтому, условием электрической устойчивости будет неравенство:

$$\frac{d}{dI} \left(L \frac{dI}{dt} \right) < 0$$

Для этого условия, учитывая уравнение (8), имеем:

$$\frac{d}{dI} [U - (k\Phi\omega + R_{\text{я}}I_{\text{я}})] < 0$$

Следовательно:

$$\frac{dU}{dI} < \frac{d}{dI} (k\Phi\omega + R_{\text{я}}I_{\text{я}}) \quad (9)$$

Из неравенства (9) видно, что для обеспечения электрической устойчивости нужно, чтобы при изменении тока сумма ЭДС вращения и падения напряжения в якорной цепи $k\Phi\omega + R_{\text{я}}I_{\text{я}}$ изменялась в большей степени, чем питающее напряжение U [6].

Как видно из выражений (5)-(7) и (9), для обеспечения как механической, так и электрической устойчивости необходимо компенсировать реакцию якоря, т.е. при увеличении тока якоря надо предотвратить или снизить уменьшение потока возбуждения. Для этого в электродвигателях постоянного тока с независимым возбуждением предусматривают дополнительную обмотку возбуждения, с последовательным согласным включением в цепь якоря. Такая обмотка содержит мало витков провода с большим сечением и называется компенсационной или стабилизирующей. Поскольку в автомобильном генераторе обмотка возбуждения, как правило, расположена на роторе, введение дополнительной компенсационной обмотки с током якоря крайне затруднительно и практически нецелесообразно. Для решения этой проблемы в ВЭД на основе автомобильного генератора, без изменения конструкции системы возбуждения, выбрана следующая методика компенсации реакции якоря.

1. Питание обмотки возбуждения осуществлять от ТАБ через управляемый импульсный понижающий преобразователь напряжения, поскольку в режиме ВЭД питающее напряжение существенно выше, чем рабочее напряжение генератора, под которое рассчитана обмотка возбуждения.

2. Установить датчик тока якоря (шунт или с датчиком Холла).

3. Обеспечить аналоговое или цифровое управление напряжением обмотки возбуждения $U_{ов}$ с учетом сигнала датчика якорного тока по закону:

$$U_{ов} = U_0 + rI_{я}, \quad (10)$$

где: U_0 – минимальное напряжение обмотки возбуждения,
 r – весовой коэффициент.

Величина r имеет размерность сопротивления и, чтобы не превышать допустимое напряжение на обмотке возбуждения, должна удовлетворять условию $U_0 + rI_{я\max} = U_{ном}$, где $I_{я\max}$ – максимальный ток якоря, $U_{ном}$ – номинальное рабочее напряжение генератора. Выбор напряжения U_0 сделать по результатам испытаний ВЭД на автомобиле. В частном случае может быть $r = R_{ш}$, где $R_{ш}$ сопротивление шунта в случае применения шунта в качестве датчика тока.

Управление напряжением, а не током обмотки возбуждения было выбрано по следующим причинам. Температурный режим ротора генератора рассчитан разработчиком так, чтобы питание обмотки возбуждения производилось во всех условиях от напряжения не более чем номинальное напряжение генератора. Например, для автомобильного генератора 6311.3701 (Г290) номинальное напряжение 28В, при температуре обмотки возбуждения 20°C ее сопротивление 7 ом, ток возбуждения 4А; при температуре 100°C сопротивление обмотки возбуждения 9,24 ом, ток возбуждения 3А, следовательно, при токовом управлении во всех условиях нужно иметь максимальный ток возбуждения 3А. Чтобы не допустить снижения момента при токовом управлении возбуждением, нужно учитывать еще и температуру обмотки возбуждения, что ведет к неоправданному усложнению схемы.

Практическая реализация компенсации реакции якоря. Устройство питания системы возбуждения с компенсацией реакции якоря было разработано для ВЭД на основе генератора Г290 и установлено на конвертированном гибридном автомобиле «Ланос-пикап». Конверсия была произведена на кафедре автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Функциональная схема ВЭД с компенсацией реакции якоря приведена на рис.1. В схеме использованы следующие сокращения: Ш – шунт (датчик тока), БУВ – блок управления возбуждением, ОВ – обмотка возбуждения, СЭМ – синхронная электрическая машина, $Q1 \dots Q6$ – силовые ключи управляемого трехфазного моста контроллера ВЭД, $C1$ – емкость, отсекающая индуктивность соединительных проводов. Основной причиной изменения тока якоря, приводящей к нестабильности, является изменение ЭДС вращения, а конкретно изменение угловой скорости ВЭД (скорости автомобиля). Поэтому постоянная времени этого процесса велика (сотни миллисекунд или секунды). Для эффективной компенсации нестабильности постоянные времени датчика и исполнительного устройства должны быть существенно меньше постоянной времени изменения ЭДС вращения.

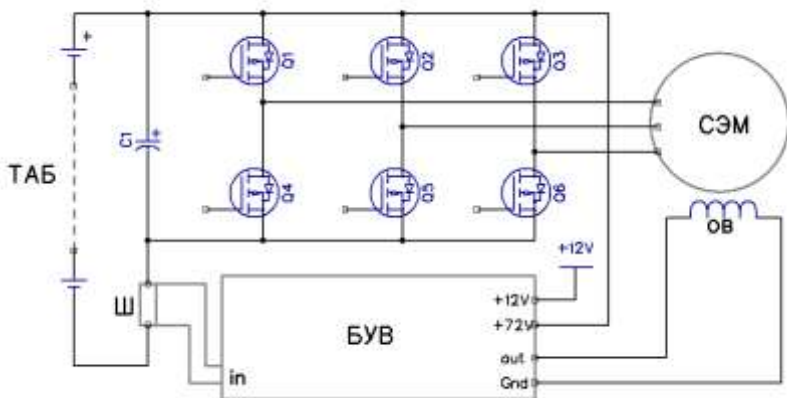


Рис.1. - Функциональная схема ВЭД с компенсацией реакции якоря.

Как видно из рис.1, постоянная времени датчика тока определяется произведением $C1 \cdot R_n$, где $R_n = U/I_a$. Для гибридного автомобиля «Ланос-пикап» в инверторе ВЭД $C1 = 6600$ мкФ, при средних значениях тока якоря значение $R_n = 1,44$ Ом, следовательно, постоянная времени для датчика тока около 10 мс. Постоянная времени для обмотки возбуждения генератора Г290 определяется отношением $L_{ов} / R_{ов}$, где $L_{ов} = 68$ мГ и $R_{ов} = 7$ Ом, соответственно индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения. Постоянная времени для обмотки возбуждения также получается около 10 мс. Следовательно, вышеуказанное условие эффективной компенсации выполняется. Принципиальная схема блока управления возбуждением, приведена на рис.2. При разработке импульсного блока управления возбуждением учитывались следующие условия. Один из выводов обмотки возбуждения и минус ТАБ соединены с массой автомобиля; $U_{ном} = 28$ В; $U = 50...72$ В; для силового ключа желательно применение транзистора с n-каналом; напряжение на шунте (датчике тока) при максимальном токе якоря – 110 мВ; при перегрузке или коротком замыкании на выходе схема должна переходить в режим стабилизации тока 6...7 А; уточненное при испытаниях значение $U_o = 26$ В. Для реализации описанной выше методики компенсации якоря был выбран ШИМ-контроллер U1 SC3524N. Этот контроллер в режиме монтажного ИЛИ имеет эффективный диапазон длительности рабочего цикла 0...90% и поэтому позволяет получить требуемое на выходе напряжение во всем диапазоне входных напряжений. Кроме того он имеет встроенный источник опорного напряжения и схему ограничения тока, что позволяет уменьшить число деталей на плате. Для управления силовым ключом Q1 с n-каналом в схеме применен драйвер верхнего ключа - микросхема U2 IR2117.

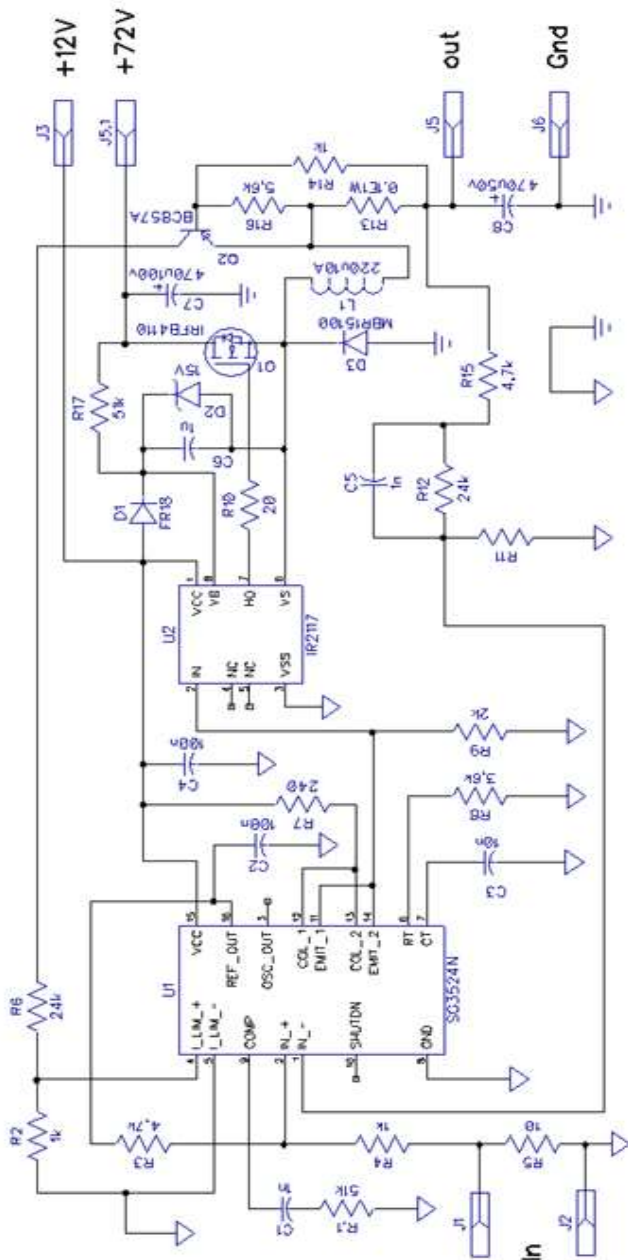


Рис.2. Принципиальная схема блока управления возбуждением

Этот драйвер имеет бустерное питание, для которого задействованы элементы $D1$, $D2$, $C6$, $R17$. Понижающий импульсный преобразователь ($Q1$, $D3$, $L1$, $C6$) имеет относительно высокую рабочую частоту - 100 кГц, что позволяет уменьшить габариты катушки индуктивности $L1$. Рабочая частота задана в контроллере $U1$ резистором $R8$ и конденсатором $C3$. Часть выходного напряжения блока после делителя $R11$, $R12$, $R15$ подана на вход IN_- компаратора микросхемы $U1$, а опорное напряжение полученное из стабильного напряжения REF_OUT 5В с помощью делителя $R3$, $R4$ подано на вход IN_+ . С этим опорным напряжением просуммировано входное напряжение U_{in} , снимаемое с шунта Ш (рис.1), $U_{in} = R_{ш}I_{я}$, что вводит зависимость напряжения на обмотке возбуждения от тока якоря и позволяет обеспечить компенсацию реакции якоря. Выбором номиналов делителей эта компенсация может быть оптимизирована таким образом, чтобы выполнялись требования условия (10) при отсутствии ударов в трансмиссии во всех режимах эксплуатации гибридного автомобиля, и в то же время величина напряжения U_0 , а значит жесткость механической характеристики, оставались достаточно высокими. Кроме того, излишне уменьшенный магнитный поток возбуждения снижает разгонную динамику автомобиля и уменьшает КПД ВЭД. Резистор $R5$ предотвращает попадание на выход высокого напряжения при обрыве цепи сигнала токоизмерительного шунта. Защита от короткого замыкания и перегрузок осуществляется подачей напряжения более 200 мВ на вход I_LIV_+ контроллера $U1$. Это напряжение появляется, когда падение напряжения на токоизмерительном резисторе $R13$ обеспечит открывание транзистора $Q2$. Резисторы $R14$, $R16$ позволяют точнее установить порог ограничения тока, а резисторы $R2$, $R6$ ограничивают напряжение на входе I_LIV_+ контроллера $U1$. Элементы схемы $C1$, $C5$, $R1$ обеспечивают компенсацию контура обратной связи понижающего импульсного стабилизатора, а конденсаторы $C2$, $C4$ и $C7$ выполняют функцию блокировки питающих напряжений. При разработке печатной платы блока учитывалось необходимое в силовой электронике разделение цепей сигнальной земли (в виде треугольника) и силовой земли (в виде горизонтальных черточек), которые имеют соединение между собой только в одном месте.

Выводы. Предложенная методика компенсации реакции якоря для ВЭД, сделанного на основе мощного автомобильного генератора, позволяет обеспечить устойчивую работу электропривода гибридного автомобиля во всех режимах, при этом сохраняется возможность иметь механическую характеристику с высокой жесткостью, а также иметь высокий КПД ВЭД. Разработанная схема понижающего импульсного преобразователя позволяет осуществить не только экономичное питание обмотки возбуждения ВЭД от ТАБ гибридного автомобиля, но и обеспечить механическую и электрическую устойчивость электропривода. Предложенная методика и ее схемная реализация проверены на практике в конверсионном гибридном

автомобиле «Ланос-пикап». Результаты испытаний подтвердили эффективность технического решения.

Список литературы. 1. *Бажинов О.В.* Конверсія легкового автомобіля в гібридний. /Бажинов О.В., Двадненко В.Я., Хакім М., – Харків: ХНАДУ, 2014. – 200 с. 2. *Бажинов О.В.* Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Двадненко В.Я., – Харків: ХНАДУ, 2011. – 236 с. 3. *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. 4. *Ключев В.И.* Теория электропривода / В.И. Ключев: - М: Энергоатомиздат, 2001. – 697 с. 5. *Овчинников И.Е.* Вентильные электрические двигатели и привод на их основе / И.Е. Овчинников: – СПб: Корона-век, 2006. – 336 с. 6. *Богдан Н.В.* Троллейбус. Теория, конструирование, расчет. / Н.В. Богдан, Ю.Е. Атаманов, А.И. Сафонов – Минск: Ураджай, 1999. – 262 с.

Bibliography (transliterated). 1. *Bazhinov O.V.* Konversiya legkovogo avtomobilya v gibridniy. /Bazhinov O.V., Dvadenko V.Ya., Hakim M., – Kharkiv: HNADU, 2014. – 200 p. 2. *Bazhinov O.V.* Sinergetichnyy avtomobil'. Teoriya i praktika / Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A., Dvadenko V.Ya., – Kharkiv: HNADU, 2011. – 236 p. 3. *Dvadenko V.Ya.* Osobennosti dvuhzonovogo regulirovaniya ventil'nogo elektroprivoda gibridnogo avtomobilya / V.Ya. Dvadenko, S.A. Serikov // 75-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya AAI «Perspektivy razvitiya avtomobiley. Razvitie transportnyh sredstv s al'ternativnymi energoustanovkami», 14.11 – 15.11.2011 – Tol'yatti, Rossiya – 2011. 4. *Klyuchev V.I.* Teoriya elektroprivoda / V.I. Klyuchev: - Moscow: Energoatomizdat, 2001. – 697 p. 5. *Ovchinnikov I.E.* Ventil'nye elektricheskie dvigatel i privod na ih osnove / I.E. Ovchinnikov: – SPb: Korona-vek, 2006. – 336 p. 6. *Bogdan N.V.* Trolleybus. Teoriya, konstruirovaniye, raschet. / N.V. Bogdan, Yu.E. Atamanov, A.I. Safonov – Minsk: Uradszhay, 1999. – 262p.

Поступила (received) 25.12.2014