

УДК 621.313.333

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Предложена методика расчета вентильного электродвигателя на базе мощного автомобильного генератора для конверсии обычного автомобиля в гибридный автомобиль. Приведены и проанализированы результаты расчета основных характеристик электродвигателя на основе автомобильного генератора Г290 в режиме рекуперации.

Ключевые слова: вентильный электродвигатель, конверсия автомобиля, гибридная силовая установка, электропривод, результаты расчета вентильного электродвигателя.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано методику розрахунку вентильного електродвигуна на базі потужного автомобільного генератора для конверсії звичайного автомобіля в гібридний автомобіль. Наведено та проаналізовано результати розрахунку основних характеристик електродвигуна на основі автомобільного генератора Г290 в режимі рекуперації.

Ключові слова: вентильний електродвигун, конверсія автомобіля, гібридна силова установка, електропривод, результати розрахунку вентильного електродвигуна.

MATHEMATICAL MODEL OF THE BLDC TRACTION ELECTRIC MOTOR IN THE REGENERATIVE BRAKING MODE

V. Dvadnenko, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),

Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The method of calculating the basic parameters of the BLDC motor in regenerative braking mode proposed. The motor based on the powerful alternator of the vehicle to convert an ordinary car into a hybrid one is offered. The results of calculation of basic characteristics of the engine in regenerative mode on the basis of the G290 car alternator are given.

Key words: BLDC motor, vehicle conversion, hybrid propulsion system, electric drive, BLDC motor calculation results.

Введение

Конверсия обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль обеспечивает существенное снижение стоимости километра пробега а также 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 характери-

стику. 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 соответствует требованиям гибридного электропривода, 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) [1,5]. Кроме того, необходимо решить проблемы механической и электрической устойчивости такого ВЭД. Один из вариантов решения этой проблемы рассмотрен в работе [9]. 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 [6], а в генераторном режиме обеспечить оптимальное рекуперативное торможение. Эти обстоятельства делают перспективным процесс создания ВЭД на основе автомобильных генераторов. Расчет основных параметров такого ВЭД в режиме электродвигателя приведен в работе [8].

Цель и постановка задачи

При конверсии обычного автомобиля в гибридный автомобиль для расчета различных режимов рекуперативного служебного торможения необходима математическая модель тягового ВЭД с управляемым электромагнитным возбуждением для генераторных режимов. Целью данной работы является разработка методики расчета основных параметров тягового ВЭД в режиме генератора в различных режимах рекуперативного тор-

можения конверсионного гибридного автомобиля. Нагружен такой генератор в режиме рекуперативного торможения может быть либо непосредственно на тяговую аккумуляторную батарею (ТАБ), либо на ТАБ через повышающий DC-DC преобразователь или нагружен на резистивную нагрузку.

При расчете необходимо рассматривать режим ограничения тока, который возникает в области рабочих оборотов ВЭД на некоторых ее участках. Токковый режим на этих участках поддерживается системой автоматического регулирования (САР) тока фаз в интервале оборотов, где необходимо ограничение предельно-допустимого тока фаз. Такой интервал занимает большую часть зоны рекуперативного торможения.

Разработка методики расчета и результаты расчета

Расчет тягового электропривода конверсионного автомобиля возможен при наличии исходных данных электродвигателя, таких как мощность, габариты, вес, стоимость, вращающий или тормозной моменты, угловая скорость, пусковые характеристики, КПД и т.д., на основании которых производится выбор электрической машины, управляющей и силовой электроники, типа и параметров ТАБ, вида и величины передаточного отношения механической передачи.

Для получения полного набора исходных данных и создания математической модели ВЭД, которая может быть использована для этого электропривода, требуется набор внутренних параметров электрической машины, таких как сопротивление, индуктивность и взаимоиндукция обмоток, параметры магнитной цепи, магнитный поток системы возбуждения, конструктивный коэффициент, величина механических и магнитных потерь и т.д. При этом многие из требуемых параметров не приводятся изготовителем электрической машины, как, например, в случае применения для ВЭД генераторной синхронной электрической машины, а прямое их измерение не всегда возможно или представляет очень большие трудности.

Для того, чтобы преодолеть эти проблемы в данной работе реализован следующий подход, а именно: использован ряд промежуточных интегральных характеристик, доступных

для простого измерения, и на их основе вычислены недостающих параметры. Такой подход использован для создания математических моделей ВЭД как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.

Математическое описание работы ВЭД является достаточно сложной задачей из-за того, что магнитный поток вблизи насыщения (или «колена» петли гистерезиса) нелинейно зависит от тока в обмотках двигателя. Это связано с тем, что ЭДС вращения двигателя или генератора и электромагнитный момент пропорциональны произведениям потока соответственно на скорость ротора и ток якоря. Во многих случаях можно предположить, что двигатель или генератор с независимым возбуждением работает при постоянном потоке возбуждения [4]; такое предположение допустимо, если ротор выполнен с высококоэрцитивными постоянными магнитами или система возбуждения имеет компенсацию реакции якоря (что необходимо сделать также и в ВЭД на основе автомобильного генератора). Тогда, если исключить из рассмотрения зону кратковременных перегрузок по току якоря, математическое описание процессов преобразования энергии в вентильном двигателе упрощается. Это позволяет с приемлемой на практике точностью анализировать работу ВЭД в тяговом и генераторном режимах и рассчитывать основные интегральные параметры.

В качестве автомобильных генераторов используют СЭМ, работающие с достаточно малым отклонением формы генерируемой фазной ЭДС от синусоиды. Уменьшению этих отклонений способствует применение в автомобильных генераторах клювообразных (когтеобразных) полюсов ротора. Для таких СЭМ может быть использована стандартная модель обобщенной электрической машины [4,7,10]. Дальнейшее рассмотрение ВЭД в режиме генератора производится относительно положительного и отрицательного выводов трехфазного диодного моста генератора, образованного обратными диодами управляемых силовых ключей инвертора. Все силовые ключи по управлению находятся в состоянии «выключено». Уравнение баланса напряжений для обмотки возбуждения и уравнение баланса напряжений для нагруженной якорной цепи в общем случае будут иметь вид

$$u_b = i_b R_b + L_b di_b/dt$$

$$e - u_r - i_a R_a - L_a di_a/dt = 0,$$

где u_r – напряжение на выводах генератора, при этом к выводам генератора может быть подключена нагрузка, u_b – питающее напряжение обмотки возбуждения ВЭД, e – ЭДС вращения, R_b – суммарное сопротивление цепи обмотки возбуждения, i_b – мгновенное значение тока обмотки возбуждения, i_a – мгновенное значение тока якоря, L_a – суммарная индуктивность цепи якоря, L_b – суммарная индуктивность цепи обмотки возбуждения, R_a – суммарное сопротивление якорной цепи. Значение суммарного сопротивления якорной цепи R_a должно включать измеренное сопротивление постоянному току между любыми двумя фазными выводами синхронной электрической машины (с учетом температуры), а также сопротивление двух обратных диодов силовых ключей управляемого трехфазного моста инвертора ВЭД при якорном токе.

Математическое моделирование в системной технике автомобильного транспорта во многих случаях использует сведение динамических задач к статическим задачам. Это делают путем замены динамических сил на эквивалентные им в данный момент времени статические силы (принцип Даламбера). Кроме того, мощные переходные процессы при включении, которые требуют решения в теории цепей динамической задачи, в ВЭД не происходят, поскольку они практически полностью гасятся необходимой для мощных ВЭД защитой. Обычно эта защита выполнена в виде быстродействующей САР фазных токов. В связи с вышесказанным, считаем целесообразным рассматривать математическую модель ВЭД для конверсионного гибридного автомобиля в статическом режиме.

Учтем то, что в случае статического (установившегося) режима имеет место наличие постоянного потока возбуждения, при этом $L_b di_b/dt = 0$, и наличие выпрямленного трехфазным диодным мостом постоянного тока якоря, тогда $L_a di_a/dt = 0$. Если принять во внимание то обстоятельство, что определение потока возбуждения для расчетов производится косвенным методом (описанным ниже), имеем возможность использовать только статическое уравнение баланса напряжений якорной цепи ВЭД, которое в случае установившегося генераторного режима принимает вид

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

где U_{Γ} – напряжение на клеммах генератора, E – ЭДС вращения, $I_{\text{я}}$ – ток якоря.

Определим ЭДС вращения E для ВЭД. ЭДС каждого проводника обмотки статора $e_{\text{пр}}$, пересекаемого вращающимся магнитным полем ротора, определяется по закону индукции и равна

$$e_{\text{пр}} = Blv.$$

где B – магнитная индукция, l – длина проводника, v – относительная скорость перемещения проводника. Среднее значение ЭДС проводника $e_{\text{пр,ср}}$ при относительном перемещении ротора в пределах полюсного деления можно определить через среднее значение магнитной индукции

$$e_{\text{пр,ср}} = B_{\text{ср}} lv.$$

Введение понятия среднего значения ЭДС проводника $e_{\text{пр,ср}}$ и среднего значения индукции $B_{\text{ср}}$ в рамках данного математического моделирования возможно потому, что они строго входят в среднее значение произведения $k\Phi$, которое будем использовать в дальнейших расчетах и которое, как будет описано ниже, найдем расчетно-экспериментальным (расчетно-эмпирическим) путем с использованием измеренных средних значений напряжений и угловой скорости для холостого хода ВЭД.

Если обмотка якоря имеет N активных проводников и $2a$ параллельных ветвей, то число последовательно соединенных проводников в каждой параллельной ветви будет $N/(2a)$. Тогда среднее значение ЭДС машины

$$E = B_{\text{ср}} lv \frac{N}{2a} \quad (2)$$

Скорость пересечения магнитного поля проводниками будет

$$v = \omega r, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость ротора ВЭД, r – радиус расточки статора. Магнитный поток возбуждения Φ по определению равен

$$\Phi = B_{\text{ср}} 2\pi rl / (2p),$$

где $2p$ число полюсов ВЭД, (p – число пар полюсов). Величина $2\pi rl / (2p)$ представляет собой поверхность сердечника якоря, приходящуюся на один полюс. Отсюда среднее значение магнитной индукции будет

$$B_{\text{ср}} = \frac{p\Phi}{\pi rl} \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в (2) имеем

$$E = k\Phi\omega, \quad (5)$$

В (5) использовано обозначение:

$$k = pN / (2\pi a), \quad (6)$$

Величина k называется конструктивный коэффициент. Величина конструктивного коэффициента k может также включать в себя учет конструктивных особенностей электрической машины, например, коэффициент скока.

Для получения уравнения баланса мощностей умножим уравнение (1) на $I_{\text{я}}$

$$E I_{\text{я}} - U_{\Gamma} I_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = 0, \quad (7)$$

где $E I_{\text{я}} = P_{\text{с}}$ полная электрическая мощность генератора, представляющая собой сумму мощности на нагрузке генератора и мощности тепловых потерь в генераторе; $U_{\Gamma} I_{\text{я}} = P$ – электрическая мощность, которая идет от генератора к нагрузке.

Переписав полученный баланс мощностей (7) имеем

$$P = E I_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2,$$

откуда видим, что величина мощности на выходе генератора P представляет собой разность между полной электрической мощностью генератора и электрическими потерями, которые превращаются в тепло внутри генератора. Полная электрическая мощность равна механической мощности подведенной к генератору, если не учитывать потери в подшипниках, вентиляторные потери и потери в магнитопроводах ВЭД. Механическая мощность может быть записана как ωM , где M механический момент, приложенный к валу генератора, поэтому в этом приближении с учетом (5) имеем

$$E I_{\text{я}} = k\Phi\omega I_{\text{я}} = \omega M.$$

Следовательно, для механического момента, вращающего ротор генератора, имеем выражение

$$M = k\Phi I_{\text{я}}, \quad (8)$$

На практике для математического моделирования ВЭД существенную трудность вызывает определение как магнитного потока возбуждения Φ , так и значения конструктивного коэффициента k . Воспользовавшись тем обстоятельством, что они встречаются всегда в виде произведения, считаем целесообразным определить произведение $k\Phi$ следующим расчетно-экспериментальным путем. Используем то, что в рамках принятых допущений величина $k\Phi$ одинакова как в режиме электродвигателя, так и в режиме генератора. Запишем уравнение баланса напряжений якорной цепи для двигательного режима ВЭД [8].

$$U - E - R_{\text{ядв}} I_{\text{я}} = 0, \quad (9)$$

где U – постоянное напряжение питания ВЭД, $R_{\text{ядв}}$ – суммарное сопротивление якорной цепи в режиме электродвигателя, т.е. с учетом сопротивления каналов двух открытых силовых ключей управляемого трехфазного моста.

Используя выражения (9) и выражение (5), справедливое в том числе и для двигательного режима ВЭД, выделяем необходимую для дальнейших расчетов величину $k\Phi$

$$\begin{aligned} U - k\Phi \omega - R_{\text{ядв}} I_{\text{я}} &= 0; \\ k\Phi &= [U - R_{\text{ядв}} I_{\text{яxx}}] / \omega_{\text{xx}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $I_{\text{яxx}}$ – ток якоря в режиме холостого хода; ω_{xx} – угловая скорость ротора в режиме холостого хода,

Далее для определения $I_{\text{яxx}}$ и ω_{xx} проводим эксперимент: доработанный генератор с датчиками положения ротора и блоком инвертора включаем как электродвигатель в режиме холостого хода. Измерение тока якоря в режиме холостого хода $I_{\text{яxx}}$ и питающего напряжения ВЭД U и полного активного сопротивления якоря $R_{\text{ядв}}$ не вызывают трудностей. По измеренной частоте сигнала f с одного из датчиков положения ротора с учетом числа пар полюсов вычисляем скорость вращения вала на холостом ходу ВЭД $n = f/p$ (обороты в секунду) и затем получаем значе-

ние угловой скорости ω_{xx} на холостом ходу ВЭД, $\omega_{\text{xx}} = 2\pi n$.

На рис.1 приведены экспериментально снятые в режиме холостого хода зависимости тока и скорости вращения от напряжения ТАБ для ВЭД на основе автомобильного генератора Г290Б при напряжении питания обмотки возбуждения 28В. Кроме того, на графике также приведена зависимость потребляемой мощности на холостом ходу, которая понадобится для расчета КПД. Для определения величины $k\Phi$ целесообразно выбрать допустимое максимальное напряжение, при этом будет максимальный КПД, и, следовательно, минимальная погрешность [8]. Поскольку известна вырабатываемая электрическая мощность ВЭД в режиме генератора $P_{\text{эл}} = U_{\text{Г}} I_{\text{я}}$, можно вычислить КПД для ВЭД η без учета механических потерь в подшипниках, потерь на вентиляцию и магнитных потерь. Если $P_{\text{мех}} = \omega M$ – механическая мощность подводимая к валу генератора, имеем

$$\begin{aligned} \eta &= P_{\text{эл}} / P_{\text{мех}} = U_{\text{Г}} I_{\text{я}} / \omega M = U_{\text{Г}} I_{\text{я}} / (\omega I_{\text{я}} k\Phi) = \\ &= U_{\text{Г}} / (\omega k\Phi) = U_{\text{Г}} / E \end{aligned}$$

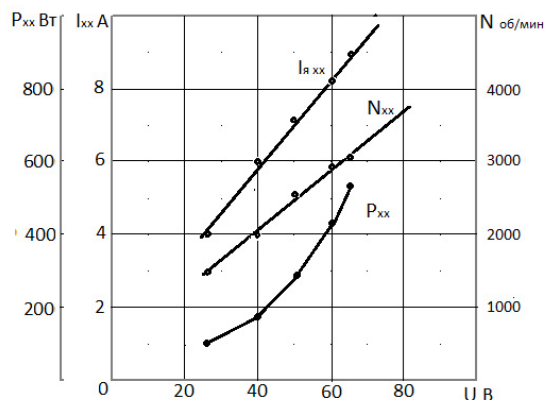


Рис.1. Экспериментальные зависимости тока, мощности и скорости вращения от напряжения для режима холостого хода

Принимая во внимание, что:

$$\begin{aligned} U_{\text{Г}} &= E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = E - R_{\text{я}} E / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) = \\ &= E [1 - R_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}})], \end{aligned}$$

имеем для КПД следующее выражение:

$$\begin{aligned} \eta &= U_{\text{Г}} / E = [E - R_{\text{я}} E / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}})] / E = \\ &= 1 - R_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) = R_{\text{н}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) \end{aligned} \quad (11)$$

В таком приближении КПД ВЭД равен отношению напряжения на клеммах генератора

к ЭДС вращения или разности между единицей и отношением полного сопротивления якоря к сумме этого сопротивления и сопротивления нагрузки или равен отношению сопротивления нагрузки к сумме этого сопротивления и полного сопротивления якоря. В таком приближении КПД равен:

$$\eta = I - R_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) = 1 - 0,04 / (0,04 + 0,166) = 0,806.$$

Подставляя в (11) $U_{\text{Г}}$ полученное из (1) и умножая числитель и знаменатель на $I_{\text{я}}$ (чтобы перейти к размерности мощности), получим

$$\eta = (EI_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2) / (EI_{\text{я}}). \quad (12)$$

Из (12) следует, что КПД ВЭД в генераторном режиме равен отношению разности полной электрической мощности и потерь в виде электрического нагрева якорной цепи к полной электрической мощности. Получим более точное значение КПД с учетом того, что в знаменателе (12) должна быть полная механическая мощность. Для этого к полной электрической мощности нужно прибавить механические потери в подшипниках, потери на вентиляцию, магнитные потери и другие, трудно учитываемые потери. Для этого используем приведенную на рис.1 экспериментально снятую зависимость потребляемой электрической мощности холостого хода ВЭД в режиме двигателя от напряжения питания. Поскольку на рис.1 есть зависимость скорости вращения на холостом ходу от напряжения питания, необходимо выбирать точку U зависимости $N_{\text{хх}}(U)$, соответствующую скорости вращения ВЭД в режиме генератора, и в этой точке определить $P_{\text{элхх}} = I_{\text{яхх}} U$. При расчете полного КПД ВЭД в генераторном режиме на основе СЭМ с электромагнитным возбуждением к потерям надо добавлять небольшую мощность, рассеиваемую обмоткой возбуждения $P_{\text{в}} = I_{\text{в}} U_{\text{в}}$, т.е. произведение тока возбуждения на напряжение возбуждения.

С учетом этих потерь имеем КПД для генератора

$$\eta = (EI_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 - P_{\text{в}}) / (EI_{\text{я}} + P_{\text{элхх}} - R_{\text{яхх}} I_{\text{яхх}}^2) = (k\Phi\omega I_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 - P_{\text{в}}) / (k\Phi\omega I_{\text{я}} + I_{\text{яхх}} U - R_{\text{яхх}} I_{\text{яхх}}^2), \quad (13)$$

где $R_{\text{яхх}}$ – суммарное сопротивление якорной цепи в режиме двигателя на холостом ходу. В выражении (13) учтено, что мощность потерь, определяемую слагаемым в числителе $R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$, учитывают полную мощность потерь на электрический нагрев, поэтому потери на электрический нагрев $R_{\text{яхх}} I_{\text{яхх}}^2$ из экспериментально полученной электрической мощности холостого хода надо вычесть.

Проверим разработанную математическую модель генератора. Для этого сравним известные по заводским данным обороты выхода на режим максимального тока с их расчетными значениями. Максимальный ток генератора 6311.3701 (Г290Б) равен 150 А, следовательно, при напряжении этого генератора 25В (такое напряжение приведено в заводских данных по нагрузочным испытаниям) сопротивление нагрузки будет $R_{\text{н}} = 25\text{В} / 150\text{А} = 0,166$ Ом. Для определения $k\Phi$ используем выражение (10) и экспериментально измеренную скорость вращения вала на холостом ходу ВЭД при питающем напряжении 64,2В: $N_{\text{хх}}(64,2\text{В}) = 3123$ 1/мин, $I_{\text{яхх}} = 9\text{А}$, $R_{\text{яхх}} = 0,03$ Ом. Расчетный максимальный ток запишем с учетом полного сопротивления якорной цепи

$$I_{\text{макс}} = E / (R_{\text{н}} + R_{\text{я}}) = k\Phi\omega / (R_{\text{н}} + R_{\text{я}}), \quad (14)$$

где $R_{\text{я}} = R_{\text{яо}} + R_{\text{яд}}$, $R_{\text{яо}}$ полное активное сопротивление обмотки якоря, для Г290 измеренное $R_{\text{яо}} = 0,025$ Ом, $R_{\text{яд}}$ – сопротивление двух обратных диодов ключей управляемого трехфазного моста. Падение напряжения на одном таком диоде для двух параллельно соединенных MOSFET транзисторов IRFP4468 при токе 150А примерно 1,1В, поэтому при токе 150А имеем для двух последовательно включенных транзисторов сопротивление $R_{\text{яд}} = 0,015$ Ом. $R_{\text{я}} = R_{\text{яо}} + R_{\text{яд}} = 0,025 + 0,015 = 0,04$ Ом. Выразим из (14) угловую скорость ω , при которой достигается ток 150А,

$$\omega = I_{\text{макс}} (R_{\text{н}} + R_{\text{я}}) / (k\Phi).$$

Получим число оборотов в минуту N , поскольку в таких единицах они приведены в заводских данных:

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi N / 60; \quad N = 60\omega / 2\pi; \\ N &= 60 I_{\text{макс}} (R_{\text{н}} + R_{\text{я}}) / [2\pi (k\Phi)] = \\ &= 60 * 150 * (0,187 + 0,04) / (2 * 3,14 * 0,196) = \\ &= 1489 \text{ об/мин.} \end{aligned}$$

По заводским данным обороты достижения максимального тока равны 1450 об/мин. Проведенное сравнение показывает различие менее 3% и, следовательно, имеет место хорошее совпадение заводских данных с результатами расчета при использовании предложенной математической модели.

Рассчитаем КПД такого ВЭД в режиме генератора при максимальном токе, используя выражения (11) и (13). В приближении по формуле (11) КПД равен:

$$\eta = I - R_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) = 1 - 0,04 / (0,04 + 0,166) = 0,806.$$

По формуле (13) с учетом данных на рис. 1, а также учитывая, что напряжение на обмотке возбуждения 28В и ток обмотки возбуждения 4А, посчитаем уточненный КПД:

$$\begin{aligned} H &= (k\Phi\omega I_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 - P_{\text{в}}) / (k\Phi\omega I_{\text{я}} + I_{\text{яxx}} U - R_{\text{яxx}} I_{\text{яxx}}^2) = \\ &= (0,196 \cdot 155,8 \cdot 150 - 0,0377 \cdot 150^2 - \\ &- 28 \cdot 4) / (0,196 \cdot 155,8 \cdot 150 + 100 - 0,03 \cdot 16) = \\ &= 0,7736. \end{aligned}$$

Полученное значение КПД 77,36% соответствует мощности 3,75 кВт. КПД среди параметров генератора 6311.3701 (Г290Б) не приводится, экспериментальное измерение КПД является достаточно сложной задачей, поэтому примем во внимание, что КПД генератора легкового автомобиля 50% ÷ 60% и быстро растет с увеличением мощности (размеров) генератора. Так КПД генератора электростанции может достигать 98% и более. Поскольку мощность генератора Г290Б существенно больше мощности генератора легкового автомобиля, соответственно у Г290Б выше и КПД.

Применение этого метода для математического моделирования готовых СЭМ с электромагнитным возбуждением позволил обойти необходимость решения достаточно сложной задачи расчета магнитной цепи СЭМ. Использованию этого метода при математическом моделировании ВЭД для конверсии обычного автомобиля в гибридный способствует также то обстоятельство, что СЭМ полностью подготавливается для работы в режиме двигателя, точнее в режиме ВЭД, а именно устанавливаются датчики положения ротора, изготавливается силовой электронный инвертор (коммутатор), имеется мощный источник питания (ТАБ). Боль-

шое число экспериментальных точек в этом методе не требуется, особенно при малых токах обмотки возбуждения, где зависимость магнитного потока от тока практически линейная.

Генераторный режим ВЭД в конверсионном гибридном автомобиле востребован потому, что, во-первых, необходимо служебное торможение с помощью ВЭД, и во-вторых, потому, что при торможении с помощью ВЭД возможна рекуперация, позволяющая сохранить часть кинетической или потенциальной энергии автомобиля. Это снизит расход топлива и электроэнергии. При работе ВЭД в генераторном режиме, аналогично работе ВЭД в режиме двигателя, необходимо обеспечивать ограничение максимального фазного тока с помощью САР. Следовательно, необходимо отдельно производить расчет в области параметров, где есть ограничение (стабилизация) по току и в области, где нет ограничения (стабилизации) по току. Работа ВЭД в качестве генератора в конверсионном гибридном автомобиле происходит в трех режимах:

1. Режим рекуперативного торможения при движении конверсионного автомобиля со скоростью $V > V_{\text{кр}}$, где $V_{\text{кр}}$ скорость при которой выполняется условие $E = U_{\text{ТАБ}}$, где $U_{\text{ТАБ}}$ – напряжение ТАБ.
2. Режим реостатного торможения при движении конверсионного автомобиля. Этот режим возможен при любой скорости движущегося автомобиля.
3. Режим рекуперативного торможения при движении конверсионного автомобиля со скоростью $V < V_{\text{кр}}$.

В режиме 1 уравнение баланса напряжений цепи якоря будет

$$E - U_{\text{ТАБ}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 0, \quad (15)$$

где $U_3 = U_{\text{ТАБ}}$, $U_{\text{ТАБ}}$ – напряжение ТАБ в режиме зарядки, $R_{\text{я}}$ сопротивление якорной цепи в режиме генератора. Ток якоря будет

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

Следовательно, поскольку напряжение на зажимах питания ВЭД равно $U_{\text{ТАБ}}$, зарядный ток равен току якоря $I_{\text{я}} = I_3$, причем заряд возможен только при его положительном значении. Чтобы построить график $I_3 = I_3(\omega)$, необходима также зависимость для стабили-

зированной (ограниченного) тока генератора: $I_3 = I_{\text{макс}}$. Для Г290Б $I_{\text{макс}} = 150\text{А}$.

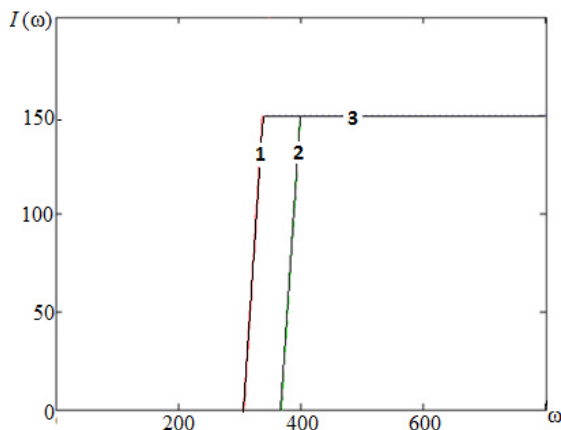


Рис. 2. Зависимость зарядного тока на выходе генератора от угловой скорости вала ВЭД

На рис.2 приведена зависимость $I_3(\omega)$ – зарядного тока на выходе генератора от угловой скорости вала ВЭД. Зависимость 1 для $U_{\text{ТАБ}} = 60\text{В}$, 2 – для $U_{\text{ТАБ}} = 72\text{В}$. Зависимость 3 – участок $\omega \in [\omega_1, \omega_{\text{макс}}]$, где производится ограничение тока генератора. В режиме 1 сопротивление якорной цепи генератора Г290Б 0,04 Ом, стабилизация по току 150А производится на выходе генератора (по низковольтной цепи) воздействием на ток обмотки возбуждения. 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 режим 2 или 3. 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. Поскольку стабилизация напряжения сразу начинает уменьшать ток заряда, а значит, и момент служебного торможения ВЭД, следует в случае начала работы петли САР по напряжению предусмотреть переключение на режим 2.

В режиме 2 постоянное выходное напряжение генератора после выпрямителя преобразуется в переменное, повышается с помощью высокочастотного трансформатора и подается на предпусковой подогреватель (ППП). При этом возникает тормозной момент на ведущих колесах автомобиля и происходит

рекуперативное торможение. Энергия, вырабатываемая генератором, расходуется на подогрев охлаждающей жидкости (ОЖ) ДВС. В гибридном автомобиле ДВС не работает постоянно, ОЖ остывает, поэтому ее подогрев улучшает тепловой баланс ДВС и уменьшает расход топлива. В этом неизрасходованном топливе и сохраняется энергия рекуперации. Уравнение баланса напряжений цепи якоря в этом режиме будет

$$E - (R_{\text{я}} + R_{\text{БК}})I_{\text{я}} = 0,$$

где $R_{\text{БК}}$ входное сопротивление DC-AC конвертора для питания высокочастотным переменным током PPP охлаждающей жидкости ДВС. Для упрощения дальнейших выражений обозначим $R_{\text{я}} + R_{\text{БК}} = R_{\text{с}}$. Ток якоря, а следовательно, и ток, выдаваемый генератором, будет

$$I_{\text{я}} = k\Phi\omega / (R_{\text{я}} + R_{\text{БК}}) = k\Phi\omega / R_{\text{с}} \quad (16)$$

Коэффициент трансформации $n_{\text{тр}}$ высокочастотного трансформатора DC-AC конвертора вначале рассчитаем через величину отношения рабочего напряжения PPP (220В) к оптимальному (заводскому) значению рабочего напряжения генератора Г290Б (28В), в данном случае $n_{\text{тр}} = 220\text{В}/28\text{В} = 7,86$. Из условия сохранения мощности идеального трансформатора эквивалентное входное сопротивление со стороны первичной обмотки трансформатора нагруженного со стороны вторичной обмотки на PPP с сопротивлением $R_{\text{ппп}} = 32\text{ Ом}$ будет: $R_{\text{ппп}} / n_{\text{тр}}^2$. С учетом КПД DC-AC конвертора $\eta_{\text{dc-ac}} = 0,9$ имеем

$$R_{\text{БК}} = \eta_{\text{dc-ac}} R_{\text{ппп}} / k^2 = (0,9) * 32 / 7,86^2 = 0,466\text{ Ом}.$$

Поскольку для электрической машины Г290Б $R_{\text{я}} = 0,04\text{ Ом}$, имеем $R_{\text{с}} = 0,506\text{ Ом}$. Режим 2 обязательно должен иметь САР – по напряжению на PPP. Это необходимо для поддержания постоянной мощности подводимой к PPP. Следовательно, на интервале, где происходит ограничение тока, постоянным является не только ток, но и напряжение, как на PPP, так и на выходе ВЭД. Связано это с тем, что сопротивление нагревателя PPP можно считать постоянным, поскольку выход на рабочий режим нагревателя происходит достаточно быстро. Режим ограничения (стабилизации) тока происходит на интервале $\omega \in [\omega_1, \omega_{\text{макс}}]$, где ω_1 – это угловая скорость при которой достигается предельный ток и

начинается его ограничение. Предположим, что ток ограничен предельным якорным током $I_{\text{яmax}}$. Тогда можно на основании (16) записать равенство

$$I_{\text{яmax}} = k\Phi_{\text{max}} \omega_1 / R_c,$$

где Φ_{max} – полный (неослабленный) поток возбуждения.

Следовательно, в точке ω_1 на интервале $\omega \in [\omega_1, \omega_{\text{max}}]$ имеем

$$\omega_1 = R_c I_{\text{яmax}} / (k\Phi_{\text{max}}), \quad (17)$$

где $(k\Phi_{\text{max}})$ – произведение при полном (неослабленном) потоке возбуждения. Далее запишем условие стабилизации тока

$$I = \omega k\Phi(\omega) / R_c = \text{const} = I_{\text{яmax}} = k\Phi_{\text{max}} \omega_1 / R_c, \quad \omega \in [\omega_1, \omega_{\text{max}}]$$

Или $\omega k\Phi(\omega) / R_c = k\Phi_{\text{max}} \omega_1 / R_c$; откуда

$$\omega k\Phi(\omega) = k\Phi_{\text{max}} \omega_1, \quad \omega \in [\omega_1, \omega_{\text{max}}] \quad (18)$$

Следует отметить, что функциональная зависимость $\Phi(\omega)$ введена для обеспечения возможности работы САР, с ростом угловой частоты растет вырабатываемый генератором ток, чтобы сделать этот ток неизменным и учитывая, что величины k и R_c постоянны, нужно уменьшать (ослаблять) поток по некоторому закону. Определим этот закон. Из (18) следует

$$\Phi(\omega) = \Phi_{\text{max}} \omega_1 / \omega, \quad \omega \in [\omega_1, \omega_{\text{max}}]$$

Учитывая то обстоятельство, что при расчете ВЭД конверсионного автомобиля магнитный поток возбуждения используется не в выделенном виде, а в виде его произведения на конструктивный коэффициент, следует записать зависимость

$$k\Phi(\omega) = (k\Phi)_{\text{max}} \omega_1 / \omega, \quad \omega \in [\omega_1, \omega_{\text{max}}] \quad (19)$$

Также, как и ранее, было получено значение $k\Phi$ с помощью экспериментально-расчетного метода. Аналогично, используя ВЭД в режиме двигателя на холостом ходу, следует получить необходимую для дальнейших расчетов зависимость $k\Phi(\omega)$. Количество экспериментальных точек может быть относительно небольшим, особенно при малых токах обмотки возбуждения.

Регулирование напряжения питания ППП в процессе работы САР для ВЭД с электромагнитным возбуждением в режиме генератора также удобно осуществлять изменением тока обмотки возбуждения.

Пользуясь запасом мощности генератора и тем, что есть ограничение по предельному току генератора и предельному напряжению ППП, сделаем более эффективным служебное торможение на низких скоростях, иначе говоря, введем возможность регулирования «степени рекуперации» [11]. Для этого уменьшим (например за счет увеличения коэффициента трансформации $n_{\text{тр}}$) суммарное сопротивление якорной цепи $R_c = R_{\text{я}} + R_{\text{вк}}$. При этом, как следует из выражения (11), уменьшится и КПД, однако тепловой режим ВЭД не ухудшится, поскольку по прежнему поддерживается стабилизация тока якоря.

Для потребляемой мощности ППП возьмем два значения мощности ППП $P_{\text{п}} = 1500 \text{ Вт}$ (сопротивление 32 Ом) и $P_{\text{п}} = 3000 \text{ Вт}$ (сопротивление 16 Ом), что соответствует мощности серийных ППП «Северс-М1» и «Северс-М3». Соответствующий выбор ППП для конверсионного гибридного автомобиля сделаем по результатам расчета параметров служебного торможения с учетом условий эксплуатации автомобиля.

На рис.4 приведена зависимость якорного тока $I_{\text{я}}(\omega)$ от угловой скорости вала ВЭД для четырех значений суммарного сопротивления $R_c = R_{\text{я}} + R_{\text{нп}}$, которые принимают для кривых 1, 2, 3 и 4 соответственно значения $R_{\text{н1}} = 0,14$; $R_{\text{н2}} = 0,18$; $R_{\text{н3}} = 0,22$ и $R_{\text{н4}} = 0,506$ Ом с учетом ограничения предельного тока якоря на уровне 150 А (линия 5). Эти значения входного сопротивления конвертора выбраны для ППП мощностью 1500 Вт. На рис.5 приведена зависимость якорного тока $I_{\text{я}}(\omega)$ от угловой скорости вала ВЭД для ППП с в два раза большей мощностью 3000 Вт, соответственно значения четырех входных сопротивлений конвертора выбраны в два раза меньшими. Значение $\omega = 400$ радиан в секунду соответствует движению конверсионного автомобиля «Ланос-пикап» со скоростью 58 км/ч, первая на рис. 4 точка перегиба – 15,8 км/ч, в этой точке напряжение генератора 15,4В, мощность на выходе генератора 2310 Вт. Это значение соответствует напряжению на ППП, равному 272В. Однако это слишком много для ППП, рассчитанного на

220В. Требуемое напряжение 220В будет на ППП, благодаря тому, что введена также САР по напряжению на ППП, которая воздействует на обмотку возбуждения.

Вычислим мощность торможения на колесах автомобиля P_k , которая будет в тот момент служебного торможения, когда происходит ограничение напряжения на ППП

$$P_k = P_n / (\eta_{тр} \eta_{рп} \eta_{dc-ac} \eta_r), \quad (20)$$

где $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии (0,91), $\eta_{рп}$ – КПД ременной передачи (0,92), η_{dc-ac} – КПД DC-AC конвертора (0,9) и η_r – КПД генератора. КПД генератора необходимо посчитать при четырех значениях нагрузки генератора $R_{н1} \dots R_{н4}$. Применяя для расчета КПД выражение (11) имеем для ППП мощностью 1500 Вт

$$\eta_{г11} = R_{н1} / (R_{я} + R_{н1}) = 0,14 / (0,04 + 0,14) = 0,77$$

$$\eta_{г12} = R_{н2} / (R_{я} + R_{н2}) = 0,18 / (0,04 + 0,18) = 0,82$$

$$\eta_{г13} = R_{н3} / (R_{я} + R_{н3}) = 0,22 / (0,04 + 0,22) = 0,85$$

$$\eta_{г14} = R_{н4} / (R_{я} + R_{н4}) = 0,506 / (0,04 + 0,506) = 0,92.$$

Вычислим также КПД в четырех точках для ППП мощностью 3000 Вт. Поскольку нагрузка конвертора DC-AC имеет вдвое меньшее сопротивление, возьмем $R_{н1} = 0,07$; $R_{н2} = 0,09$; $R_{н3} = 0,11$ и $R_{н4} = 0,253$ Ом

$$\eta_{г21} = R_{н1} / (R_{я} + R_{н1}) = 0,07 / (0,04 + 0,07) = 0,64$$

$$\eta_{г22} = R_{н2} / (R_{я} + R_{н2}) = 0,09 / (0,04 + 0,09) = 0,69$$

$$\eta_{г23} = R_{н3} / (R_{я} + R_{н3}) = 0,11 / (0,04 + 0,11) = 0,73$$

$$\eta_{г24} = R_{н4} / (R_{я} + R_{н4}) = 0,253 / (0,04 + 0,253) = 0,88.$$

Для ППП мощностью 1500 Вт происходит только ограничение напряжения на ППП, поскольку мощность, отбираемая от генератора менее его максимальной электрической мощности, $P_{гmax} = 4200$ Вт. Учтем, что пре-

дельная мощность генератора Г290Б при напряжении 28В 4200Вт, а КПД $\eta_r = 0,797$, при этом мощность потерь будет:

$$P_{Пгmax} = P_{гmax} (1 - \eta_r) = 852,6 \text{ Вт}.$$

При любой электрической нагрузке мощность электрических потерь, разогревающая генератор $P_{Пгmax}$, не должна превышать эту величину, поэтому можно записать уравнение

$$(1 - \eta_r) P_{гmax} = P_{Пгmax}.$$

Откуда получим максимально допустимую мощность

$$P_{гmax} = P_{Пгmax} / (1 - \eta_r) = 852,6 / (1 - 0,64) = 2368 \text{ Вт}.$$

Возьмем наименьший из полученных для нагрузки 3000 Вт и сопротивления нагрузки 0,07 Ом КПД $\eta_{г21} = 0,64$, тогда мощность генератора при торможении не должна превышать

$$P_{гmax} = P_{Пгmax} / (1 - \eta_r) = 852,6 / (1 - 0,64) = 2368 \text{ Вт}.$$

Такая мощность генератора получается в результате действия САР при ограничении предельного тока генератора (150А для генератора Г290Б). Аналогично для ППП 3000Вт при сопротивлении нагрузки 0,09 Ом имеем предельную мощность генератора 2750 Вт, также поддерживаемую токовой САР. При сопротивлениях нагрузки 0,11 Ом и 0,253 Ом предельная мощность будет больше мощности ППП (3000Вт) и токовая САР не будет работать. Окончательно тормозную механическую мощность на колесах посчитаем по формуле (20), следовательно, имеем

$$P_{к11} = 1500 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г11}) = 2585 \text{ Вт}.$$

$$P_{к12} = 1500 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г12}) = 2427 \text{ Вт}.$$

$$P_{к13} = 1500 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г13}) = 2342 \text{ Вт}.$$

$$P_{к14} = 1500 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г14}) = 2163 \text{ Вт}.$$

Средняя тормозная мощность на колесах с ППП мощностью 1500 Вт будет $P_{к1cp} = 2379$ Вт. Для ППП мощностью 3000 Вт имеем

$$P_{к21} = 2368 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г21}) = 4913 \text{ Вт}.$$

$$P_{к22} = 2750 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г22}) = 5292 \text{ Вт}.$$

$$P_{к23} = 3000 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г23}) = 5457 \text{ Вт}.$$

$$P_{к24} = 3000 \text{ Вт} / (0,753 * \eta_{г24}) = 4573 \text{ Вт}.$$

Средняя тормозная мощность на колесах с ППП мощностью 3000 Вт будет $P_{к2ср} = 5059 \text{ Вт}$.

Вычислим тормозной момент на колесах в точке ω_1 для наименьшего сопротивления нагрузки для ППП мощностью 1500 Вт и 3000 Вт. Механическую мощность на колесах можно записать

$$P_k = M_k \omega_k,$$

где ω_k – угловая скорость колеса,

$$\omega_k = \omega / K_{п}$$

$$M_k = P_k / \omega_k = P_k K_{п} / \omega,$$

где $K_{п}$ коэффициент передачи между валом ВЭД и колесами. Для конверсионного автомобиля «Ланос-пикап» $K_{п} = 6,88$, тогда тормозной момент на колесах в точке ω_1 для наименьшего сопротивления нагрузки для ППП мощностью 1500 Вт будет

$$M_k = P_k K_{п} / \omega = 2585 * 6,88 / 110 = 161 \text{ Н*м},$$

$$M_k = P_k K_{п} / \omega = 4913 * 6,88 / 53,6 = 630 \text{ Н*м}.$$

Для конверсионного автомобиля «Ланос-пикап» с массой $m = 1100 \text{ кг}$ радиусом колеса $r_k = 0,275 \text{ м}$ в точке ω_1 имеем тормозное усилие для ППП 1500 Вт: $B = M_k / r_k = 585 \text{ Н}$, отрицательное тормозное ускорение при этом будет: $-0,53 \text{ м/с}^2$, для ППП 3000 Вт имеем тормозное усилие 2290 Н, отрицательное тормозное ускорение при этом будет: $-2,1 \text{ м/с}^2$

Рассмотрим, как меняется сила тока якоря в случае реостатного торможения при изменении скорости

$$I_{я} = E / R_c = k\Phi \omega / R_c$$

на интервале $\omega \in [\omega_0, \omega_1]$,

$$I_{я} = I_{я\max}$$

на интервале $\omega \in [\omega_1, \omega_{\max}]$.

На рис. 3 приведен график этой зависимости для ВЭД на основе генератора Г290Б, имеющего значение $I_{я\max} = 150 \text{ А}$ для ППП с мощностью 1500 Вт при различных значениях R_c .

Зависимость 1 для $R_c = 0,14 \text{ Ом}$, зависимость 2 для $R_c = 0,506 \text{ Ом}$, зависимость 3 для $R_c = 0,18 \text{ Ом}$, зависимость 4 для $R_c = 0,22 \text{ Ом}$ и общая для всех горизонтальная прямая 5 в областях стабилизации (ограничения) тока $\omega \in [\omega_1, \omega_{\max}]$. В этих областях частично сливаются продолжения предыдущих зависимостей.

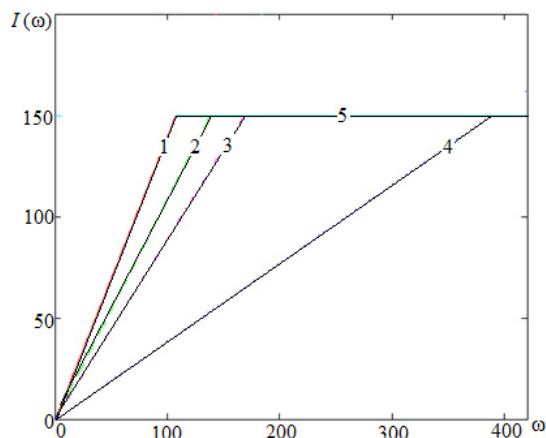


Рис. 3 Зависимость тока якоря от скорости в случае реостатного торможения для предпускового подогревателя мощностью 1500 Вт

На рис. 4 приведен график этой зависимости для ВЭД на основе генератора Г290Б, имеющего значение $I_{я\max} = 150 \text{ А}$ для ППП с мощностью 3000 Вт при различных значениях R_c . Зависимость 1 для $R_c = 0,07 \text{ Ом}$, зависимость 2 для $R_c = 0,09 \text{ Ом}$, зависимость 3 для $R_c = 0,11 \text{ Ом}$, зависимость 4 для $R_c = 0,253 \text{ Ом}$ и общая для всех горизонтальная прямая 5 в областях стабилизации (ограничения) тока $\omega \in [\omega_1, \omega_{\max}]$.

Получим зависимость тормозного момента от угловой скорости, вначале для интервала $\omega \in [\omega_0, \omega_1]$

$$M_T = k\Phi I_{я} = k\Phi E / R_c = \omega (k\Phi)^2 / R_c \quad (21)$$

Запишем зависимость тормозного момента от угловой скорости для интервала $\omega \in [\omega_1, \omega_{\max}]$. На этом интервале появляется зависимость произведения $k\Phi$ от ω , ранее полученная для этого интервала в выражении (19). Ток якоря на этом интервале постоянен, вследствие действия САР по току: $I_{я} = \text{const} = I_{я\max}$, следовательно имеем

$$M_T = k\Phi(\omega) I_{я\max} = I_{я\max} (k\Phi)_{\max} \omega_1 / \omega, \quad \omega \in [\omega_1, \omega_{\max}]. \quad (22)$$

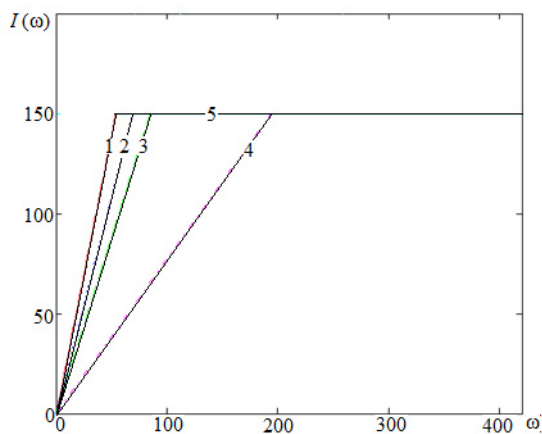


Рис. 4. Зависимость тока якоря от скорости в случае реостатного торможения для предпускового подогревателя мощностью 3000 Вт

Вначале построим график для нескольких значений произведения $k\Phi$ (несколько ступеней ослабления магнитного потока возбуждения). На рис.5 приведен график этой зависимости для ВЭД на основе генератора Г290Б, имеющего значение $I_{я\max} = 150\text{А}$. На графике зависимость 1 для максимального значения $k\Phi = 0,196$, зависимость 2 для $k\Phi = 0,147$, зависимость 3 для $k\Phi = 0,098$, зависимость 4 для $k\Phi = 0,0735$, зависимость 5 для $k\Phi = 0,049$, зависимость 6 – общая для всех гипербола в областях стабилизации (ограничения) тока предыдущих зависимостей $\omega \in [\omega_1, \omega_{\max}]$. На этой кривой частично сливаются продолжения предыдущих зависимостей.

Зависимости на рис. 5 имеют вид, совпадающий с аналогичными зависимостями, приведенными в работе [12] для электрического торможения автомобилей с тяговым электроприводом. В этой работе рассмотрено электрическое торможение карьерных самосвалов с электрической трансмиссией, которое регулируется изменением потока возбуждения и, иногда, путем переключения нагрузки реостатного торможения.

На рис.5 зависимости 1 и 6 образуют предельную характеристику момента электрического торможения $M_t(\omega)$, а частичные характеристики получаются при ослаблении потока возбуждения, т.е. зависимости 2 и 6, 3 и 6, 4 и 6, 5 и 6.

Предельная характеристика имеет узкую область высоких значений тормозного момен-

та в диапазоне скоростей, поэтому учитывая то обстоятельство, что в конверсионном гибридном автомобиле электропривод относительно небольшой мощности, естественно желание для служебного электрического торможения иметь достаточно высокий тормозной момент в широком диапазоне скоростей.

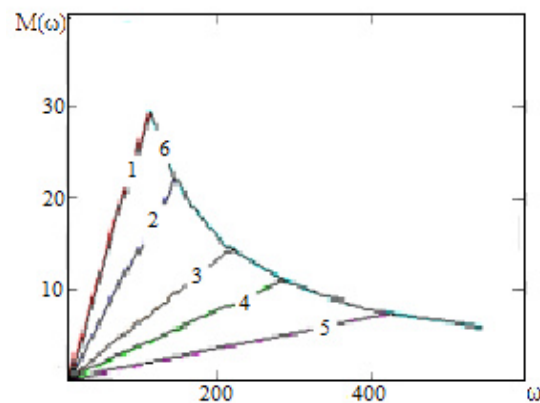


Рис. 5. Зависимость момента от скорости для нескольких значений ослабления магнитного потока возбуждения

Сделать характеристику электрического торможения с высоким уровнем тормозного момента в области высоких скоростей можно, если изменять сопротивление нагрузки генератора, увеличивая его пропорционально с ростом скорости. Для этого вначале проведем расчет зависимости тормозного момента от угловой скорости с полным потоком возбуждения для нескольких номиналов тормозных резисторов. График такой зависимости приведен на рис.6. Зависимость 1 для $R_c = 0,14\text{ Ом}$, зависимость 2 для $R_c = 0,22\text{ Ом}$, зависимость 3 для $R_c = 0,36\text{ Ом}$, зависимость 4 для $R_c = 0,506\text{ Ом}$ и приведенная для справки горизонтальная прямая 5 соответствует максимальному тормозному моменту при максимально допустимом токе якоря. Каждая из зависимостей 1 – 4 имеет точку перегиба на прямой 5, т.е. для каждого значения тормозного резистора существует такая угловая скорость, при которой с данным значением $k\Phi$ достигается максимальный тормозной момент.

Если увеличивать значение R_c при увеличении скорости, то можно, как видно из выражения (22), поддерживать в широком интервале скоростей высокий постоянный момент, соответствующий максимально допустимому току обмотки якоря.

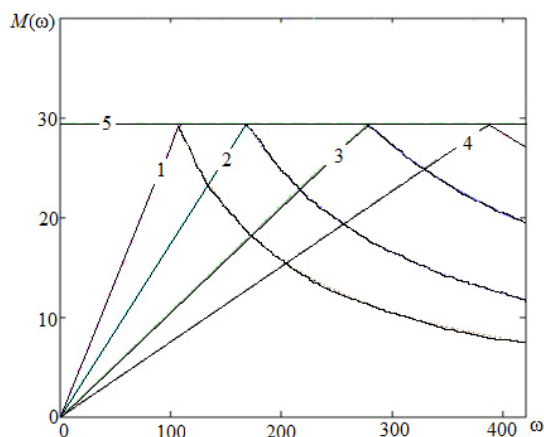


Рис. 6. Зависимости тормозного момента от угловой скорости с полным потоком возбуждения

Для этого зависимость $R_c(\omega)$ должна быть пропорциональной ω , поскольку зависимость (19) обратно пропорциональна ω . Следовательно, зависимость $R_c(\omega)$ должна быть линейной. Для нахождения этой зависимости возьмем две точки графика на рис.6, а именно, точки перегиба зависимостей $M_1(\omega)$ и $M_4(\omega)$. Координаты переменной ω в точке перегиба зависимостей $M_1(\omega)$ и $M_4(\omega)$ обозначим соответственно ω_1 и ω_4 . Получим эти значения для соответствующих точек перегиба из выражения (17)

$$\omega_1 = R_{c1} I_{\text{яmax}} / (k\Phi_{\text{max}}) \quad (23)$$

$$\omega_4 = R_{c4} I_{\text{яmax}} / (k\Phi_{\text{max}}). \quad (24)$$

В координатах ω и R_c имеем точки (ω_1, R_{c1}) и (ω_4, R_{c4}) . По этим двум точкам построим зависимость $R_c(\omega)$. Уравнение этой зависимости будет

$$(R_{c1} - R_{c4}) \omega + (\omega_4 - \omega_1) R_c(\omega) + (\omega_1 R_{c4} - \omega_4 R_{c1}) = 0. \quad (25)$$

С учетом (23) и (24) имеем

$$R_c(\omega) = \omega (R_{c1} - R_{c4}) / (\omega_4 - \omega_1) \quad (26)$$

Зависимость (26) для ВЭД на основе СЭМ Г290Б приведена на рис.7. Начинается эта зависимость от значения $R_c = 0,14$, которое обусловлено предельным током якоря, и, как было показано выше от предельной мощностью нагрева якорной обмотки.

Необходимое для эффективного служебного торможения повышение $R_c(\omega)$ с увеличением

скорости будем осуществлять путем повышения входного сопротивления DC-DC или DC-AC конвертора, меняя базовую скважность открытого состояния ключей полумоста в сторону уменьшения этой скважности. Если в DC-DC конвертере максимальная скважность $\chi_{\text{max}} = 1$ при минимальном входном сопротивлении $R_{\text{вхmin}}$, то для достижения повышенного входного сопротивления $R_{\text{вх}}$ необходима скважность $\chi = R_{\text{вхmin}} / R_{\text{вх}}$. В полумостовом (мостовом) DC-AC конвертере базовая скважность $\chi_b < 0,5$, поскольку нужны защитные интервалы для предотвращения сквозных токов. Например, если $\chi_b = 0,45$, то уменьшаем скважность относительно этого значения также пропорционально отношению $R_{\text{вхmin}} / R_{\text{вх}}$.

$$\chi = \chi_b (R_{\text{вхmin}} / R_{\text{вх}})$$

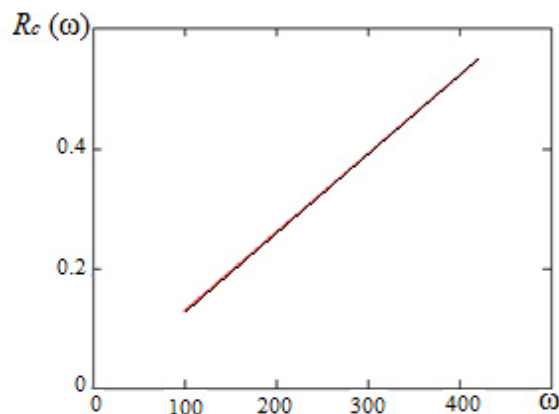


Рис. 7. Зависимость оптимального входного сопротивления DC-AC конвертора от скорости

После введения переменного входного сопротивления конвертора, являющегося нагрузкой ВЭД в режиме генератора, получим зависимость тормозного момента, изображенную на рис.8 для нескольких значений $I_{\text{яmax}}$. Зависимость 1 – 150А, зависимость 2 – 125А, зависимость 3 – 100А и зависимость 4 – 75 А, Эти значения водителю можно выбирать с помощью регулировки «Степень рекуперации» [11]. Необходимость в такой регулировке может возникнуть, например, на затяжных спусках.

В режиме 3, когда скорость $V < V_{\text{кр}}$ при рекуперации для сохранения энергии в ТАБ, т.е. зарядки ТАБ, выходное напряжение повышается с помощью DC-DC конвертора. Уравнение баланса напряжений цепи якоря в этом режиме будет

$$E - (R_{\text{я}} + R_{\text{вп}})I_{\text{я}} = 0,$$

где $R_{\text{вп}}$ входное сопротивление повышающего DC-DC конвертора для зарядки ТАБ. Якорный ток $I_{\text{я}}$ в этом режиме имеем

$$I_{\text{я}} = E / (R_{\text{я}} + R_{\text{вп}}).$$

Ток зарядки ТАБ I_3 будет

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

где $\eta_{\text{DC-DC}}$ – КПД конвертора, $K_{\text{DC-DC}}$ – 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.

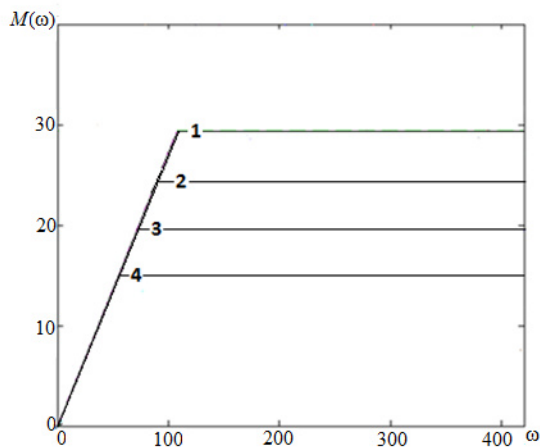


Рис. 8. Зависимость тормозного момента от скорости при оптимальном изменении входного сопротивления DC-AC конвертора

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-железо-фосфатных батарей значение $3C$, где C – 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,

также, как и в режиме 2, регулирование нужно будет проводить путем регулирования скважности открытого состояния силовых электронных ключей DC-DC конвертора.

Выводы

Предложенная методика расчёта для ВЭД в генераторном режиме на основе СЭМ с электромагнитным возбуждением позволяет, имея основные параметры СЭМ, а также некоторые легкодоступные для измерения параметры ВЭД в режиме электродвигателя, получить основные характеристики, необходимые для расчета тормозного режима электропривода гибридного автомобиля, а именно:

- зависимость от угловой скорости тормозного момента ВЭД (механическую характеристику) в различных режимах,
- зависимость тормозного тока якоря СЭМ от угловой скорости (токоскоростную характеристику,
- зависимости допустимой максимальной мощности ВЭД в генераторном режиме от скорости и нагрузки,
- зависимость КПД от нагрузки в генераторном режиме,
- зависимость тормозного момента от скорости при оптимальном изменении входного сопротивления DC-AC конвертора
- рассчитать не только внешние, но и частичные характеристики ВЭД в генераторном режиме.

Литература

1. Бажинов О.В. Конверсія легкового автомобіля в гібридний / Бажинов О.В., Двадненко В.Я., Хакім М. – Х.: 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. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
3. Бажинов А.В. Электропривод для конверсионного гибридного автомобиля / А.В. Бажинов., В.Я. Двадненко, Хаким Мауш // Автомобильный транспорт. – 2012. – Вып. 30. – С. 7–12.
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. – С.Пб: Корона-век, 2006. – 336 с.
6. 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.
7. Сериков С.А. Управление вектором тока тягового вентильного электродвигателя силовой установки гибридного автомобиля / С.А. Сериков // Автомобильный транспорт. сб. науч. тр. – 2009. – Вып. 25. – С. 127–133.
8. Двадненко В.Я. Расчет основных характеристик тягового вентильного электродвигателя на базе автомобильного генератора // Автомобильный транспорт. – 2014. – Вып. 35. – С. 80–86.
9. Двадненко В.Я. Обеспечение устойчивости вентильного электродвигателя конверсионного гибридного автомобиля // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 67 (1109). – С. 9–17.
10. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
11. Smart Fortwo Electric Drive III // Электронный ресурс: <http://www.zr.ru/content/articles/687727-smart-fortwo-electric-drive-son-elektrika/>
12. Теория и расчет тягового привода электромобилей / Ефремов И.С., Пролыгин А.П., Андреев Ю.М., Миндлин А.Б. – М.: Высшая школа, 1984. – 383 с.

Рецензент: Ю.В. Батыгин., профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 17 июля 2015 г.
