

УДК 621.313.333

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Предложена методика расчета вентиляного 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.

Ключевые слова: вентиляный электродвигатель, конверсия автомобиля, гибридная силовая установка, электропривод, результаты расчета вентиляного электродвигателя.

РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА БАЗІ АВТОМОБІЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано методику розрахунку вентиляного 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.

Ключові слова: вентиляний електродвигун, конверсія автомобіля, гібридна силова установка, електропривід, результати розрахунку вентиляного електродвигуна.

ESTIMATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF THE TRACTION BLDC MOTOR ON THE BASIS OF VEHICLE ALTERNATOR

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

Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. A method of estimation of basic parameters of the BLDC motor based on the vehicle powerful alternator to convert an ordinary vehicle into a hybrid one is offered. The results of estimation of basic characteristics of the electric motor on the basis of the automobile alternator G290 are presented.

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

Введение

Конверсия обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль обеспечивает существенное, в несколько раз, снижение стоимости километра пробега и также существенное снижение вредных выбросов. Но

для такой конверсии необходим недорогой и одновременно имеющий подходящие характеристики электродвигатель. Вентильные электродвигатели (ВД) широко применяются в гибридных автомобилях, поскольку имеют высокие значения мощности и КПД при минимальных габаритах и весе, а также

подходящую для тягового электропривода механическую характеристику. Однако тяговые вентильные электродвигатели, пригодные для конверсии, имеют высокую стоимость, что снижает экономическую выгоду 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 мощного автомобильного генератора. Для этого из генератора нужно удалить трехфазный диодный мост, установить датчики положения ротора и обеспечить его работу с соответствующим контроллером и силовой электроникой [1]. Конструкция такого ВЭД хорошо приспособлена к работе в подкапотном пространстве автомобиля, а благодаря массовому выпуску автомобильных генераторов, стоимость ВЭД получается относительно невысокой. Эти обстоятельства делают перспективным процесс создания ВЭД на основе автомобильных генераторов.

Цель и постановка задачи

Производители генераторов никаких характеристик для их работы в режиме вентильного электродвигателя не приводят, а они необходимы при конверсии обычного автомобиля в гибридный автомобиль для расчета тягового электропривода. Следовательно, возникает необходимость проведения расчёта основных характеристик ВЭД на базе автомобильного генератора. Целью данной работы является разработка методики расчета основных параметров такого ВЭД, а именно: мощности, требуемого напряжения тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ), механической и токоскоростной характеристик, КПД и т.д.

Разработка методики расчета и результаты расчета

Математическое описание механической характеристики 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 и электромагнитный момент пропорциональны произведению

ям потока соответственно на скорость ротора и ток якоря. Во многих случаях можно предположить, что двигатель с независимым возбуждением работает при постоянном потоке возбуждения; 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, уравнения токоскоростной и механической характеристик линеаризуются, а математическое описание процессов преобразования энергии в вентильном двигателе упрощается, что позволяет с приемлемой на практике точностью анализировать работу двигателя и рассчитывать основные интегральные параметры тягового электропривода. В качестве тяговых ВЭД используют синхронные машины, включенные по схемам с достаточно малым межкоммутационным интервалом. Это также относится и к выбранной нами трехфазной схеме с реверсивным питанием. Для таких ВЭД может быть использована стандартная модель электропривода постоянного тока в предположении о бесконечно малом межкоммутационном интервале без учета реакции якоря на магнитный поток возбуждения и без учета индуктивности фазных обмоток якоря [4–6]. В этом случае в установившемся режиме для якорной цепи ВЭД может быть применено 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 конструктивного коэффициента k в (2) и (3) в системе СИ одинакова и определяется выражением [3]

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

где p – число пар полюсов; N – число активных проводников; a – число параллельных ветвей якорной обмотки.

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. Используя выражения (1) и (2) для режима холостого хода ВЭД, получаем необходимую для дальнейших расчетов величину $k\Phi$

$$k\Phi = (U - R_{я}I_{я\text{хх}})/\omega_{\text{хх}}, \quad (4)$$

где $I_{я\text{хх}}$ – ток якоря в режиме холостого хода; $\omega_{\text{хх}}$ – угловая скорость ротора в режиме холостого хода.

Далее проводим эксперимент: доработанный генератор с блоком инвертора включаем как электродвигатель в режиме холостого хода. Измерение тока якоря в режиме холостого хода $I_{я\text{хх}}$ и питающего напряжения ВЭД U не вызывает трудностей. По измеренной частоте сигнала f с одного из датчиков положения ротора вычисляем скорость вращения вала ВЭД $n = f/p$ (обороты в секунду) и затем получаем значение угловой скорости $\omega_{\text{хх}}$ на холостом ходу ВЭД, $\omega_{\text{хх}} = 2\pi n$. Значение суммарного сопротивления якорной цепи $R_{я}$ должно включать сопротивление постоянно-му току между любыми двумя фазными выводами синхронной электрической машины, сопротивление каналов двух силовых ключей управляемого трехфазного моста инвертора ВЭД, сопротивление соединительных проводов и внутреннее сопротивление ТАБ. Поскольку значение $k\Phi$ теперь известно, из выражений (1) и (2) получим зависимость угловой скорости ВЭД от тока якоря (токоскоростную характеристику)

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

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

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

Механическая характеристика (6) представляет собой линейную функцию. При подаче

на ВЭД полного напряжения ТАБ имеем внешнюю механическую характеристику ВЭД. Для достаточно мощного ВЭД внешнюю механическую характеристику на всем интервале $0 < \omega < \omega_{\text{хх}}$ реализовать невозможно, поскольку на интервале $0 < \omega < \omega_1$, где $0 < \omega_1 < \omega_{\text{хх}}$, значение тока якоря будет превышать предельно допустимые значения для обмоток ВЭД, силовых ключей инвертора и для ТАБ. Значение ω_1 может быть определено по токоскоростной характеристике (5) путем подстановки $I_{я} = I_{я\text{макс}}$

$$\omega_1 = U/(k\Phi) - R_{я}I_{я\text{макс}}/(k\Phi).$$

Другими словами, прямой пуск, без ограничения тока тягового ВЭД, не допустим. В связи с этим обязательно должны быть приняты меры по ограничению тока, например, силовой инвертор содержит датчики тока и схему ограничения максимального тока. Поэтому с таким инвертором на интервале $0 < \omega < \omega_1$ ток якоря равен стабилизированному блоком инвертора предельно допустимому значению $I_{я} = I_{я\text{макс}}$, следовательно, там $M_{\text{макс}} = k\Phi I_{я\text{макс}}$. В координатах ω, M на интервале $0 < \omega < \omega_1$ механическая характеристика будет представлять собой прямую $M = M_{\text{макс}}$, параллельную оси абсцисс, а на интервале $\omega_1 < \omega < \omega_{\text{хх}}$ – линейную зависимость, задаваемую выражением (6).

Построим механические характеристики ВЭД на основе синхронной электрической машины (автомобильного генератора) Г290. Для построения внешней механической характеристики используем такие параметры генератора Г290: $R_{я} = 0,03$ Ом, $I_{я\text{макс}} = 150$ А. Для определения $k\Phi$ используем выражение (4) и экспериментально измеренную скорость вращения вала на холостом ходу ВЭД при питающем напряжении 72 В: $N_{\text{хх}}(72\text{В}) = 3570$ 1/мин. Напряжение питания ВЭД примем $U = 100$ В. Для построения частичных механических характеристик, поскольку управление осуществляется изменением напряжения с помощью широтно-импульсной модуляции, примем те же данные, но возьмем меньшие значения U , т.е. $U = 65$ В, $U = 40$ В, $U = 20$ В, $U = 4$ В.

Из расчетов следует, что $M_{\text{макс}} = k\Phi I_{я\text{макс}} = 28,9$ Н/м. При напряжении ТАБ 65В $\omega_{\text{хх}} = 336,8$ 1/с, $\omega_1 = 313,5$ 1/с; при напряжении ТАБ 100В $\omega_{\text{хх}} = 518,2$ 1/с, $\omega_1 = 482,3$ 1/с.

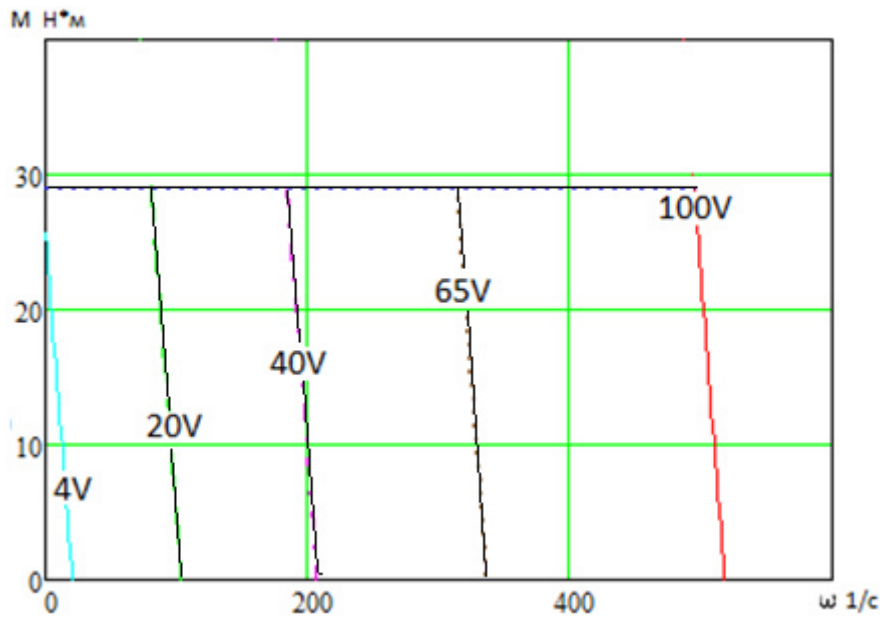


Рис. 1. Механические характеристики при различных напряжениях ТАБ

Известно [4, 5], что механическая мощность ВЭД $P_{мех}$

$$P_{мех} = M\omega. \quad (7)$$

Как видно из графиков на рис. 1, максимальная механическая мощность будет равна

$$P_{мехmax} = M_{max}\omega_1, \quad (8)$$

где ω_1 – точка излома соответствующей механической характеристики.

Следовательно, для электрической машины Г290 при напряжении ТАБ 100 В имеем $P_{мехmax} \approx 13,94$ кВт, при напряжении ТАБ 65 В – $P_{мехmax} \approx 9,06$ кВт. Увеличивая напряжение ТАБ, можно повышать мощность ВЭД за счет увеличения скорости вращения вала, ограничением является предельно допустимая величина этой скорости.

Поскольку потребляемая от ТАБ электрическая мощность ВЭД $P_{эл} = UI_{я}$, можно вычислить КПД для ВЭД η без учета механических потерь в подшипниках, потерь на вентиляцию и магнитных потерь

$$\eta = P_{мех} / P_{эл} = \omega M / UI_{я} = \omega I_{я} k\Phi / (UI_{я}) = \omega k\Phi / U = E / U. \quad (9)$$

В таком приближении КПД ВЭД равен отношению ЭДС вращения к напряжению питания. Подставляя U , полученное из (1), и

умножая числитель и знаменатель на $I_{я}$ (чтобы перейти к размерности мощности), получим

$$\eta = \omega M / (\omega M + R_{я} I_{я}^2) = P_{мех} / (P_{мех} + R_{я} I_{я}^2). \quad (10)$$

Из (10) следует, что КПД ВЭД равен отношению механической мощности ВЭД к сумме этой механической мощности и потерь в виде электрического нагрева якорной цепи.

Поскольку в знаменателе (10) слагаемые имеют размерность мощности, можно к ним добавить еще одно слагаемое, учитывающее оставшиеся потери, чтобы получить КПД для ВЭД с учетом механических потерь в подшипниках, потерь на вентиляцию и других трудно учитываемых потерь.

Для этого используем экспериментально снятую зависимость электрической мощности холостого хода ВЭД от напряжения питания $P_{элхх} = I_{яхх} U$. Поскольку на холостом ходу некоторые из ранее неучтенных потерь имеют зависимость от ω (например, вентиляционные потери), а скорость вращения ВЭД на холостом ходу при выбранном напряжении выше рабочей скорости вращения в стационарном режиме, будет некоторая погрешность в определении КПД. Однако очевидно, что эта погрешность имеет высший порядок малости. С учетом этих потерь имеем

$$\eta = \omega M / (\omega M + R_{я} I_{я}^2 + I_{яхх} U - R_{я} I_{яхх}^2). \quad (11)$$

В выражении (11) учтено, что мощность потерь, определяемая слагаемым $R_{я}I_{я}^2$, учитывает полную мощность потерь на электрический нагрев, поэтому потери на электрический нагрев $R_{я}I_{яxx}^2$ из экспериментально полученной электрической мощности холостого хода надо вычесть. На интервале $0 < \omega < \omega_1$ ток якоря равен стабилизированному предельно допустимому значению $I_{я} = I_{яmax}$ и $M = M_{max} = k\Phi I_{яmax}$, следовательно, на этом интервале имеем для КПД следующее выражение

$$\eta = \omega k\Phi I_{яmax} / (\omega k\Phi I_{яmax} + R_{я}I_{яmax}^2 + I_{яxx} U - R_{я}I_{яxx}^2). \quad (12)$$

Получим выражение для КПД на интервале $\omega_1 < \omega < \omega_{xx}$, для чего преобразуем механическую характеристику (6) в зависимость $M = M(\omega)$

$$M = (1/R_{я})[Uk\Phi - \omega(k\Phi)^2]. \quad (13)$$

Подставляя M из (13) в (11), а также подставляя в (11) полученный из (1) и (2) ток якоря $I_{я} = (U - \omega k\Phi)/R_{я}$, получим следующее выражение для определения КПД

$$\eta = \{[Uk\Phi - \omega(k\Phi)^2] \omega\} / \{[Uk\Phi - \omega(k\Phi)^2] \omega + (U - \omega k\Phi)^2 + R_{я}I_{яxx} U - (R_{я})^2 I_{яxx}^2\}. \quad (14)$$

Если в уравнении механической характеристики (6) подставить $M = 0$, то получим значение угловой скорости ВЭД при идеальном холостом ходе

$$\omega_{ихх} = U / (k\Phi). \quad (15)$$

В режиме двигателя угловая скорость зависит от U и M и никогда не превышает $\omega_{ихх}$. Регулирование ВЭД при тяговом режиме (педалью акселератора) сопровождается изменением U , следовательно, чтобы иметь зависимости КПД, пригодные для всех режимов работы, необходимо нормировать угловую скорость на $\omega_{ихх}$. Нормированная скорость (новый аргумент) ω_0 тогда

$$\omega_0 = \omega / \omega_{ихх}, \quad (16)$$

или

$$\omega = \omega_0 * \omega_{ихх}. \quad (17)$$

Изменяются также и границы интервалов для нормированной скорости соответственно на $0 < \omega_0 < \omega_{01}$ и $\omega_{01} < \omega_0 < 1$, где $\omega_{01} = \omega_1 / \omega_{ихх}$.

Подставив (17) в (12), получим выражение для КПД при нормированной скорости на интервале $0 < \omega_0 < \omega_{01}$

$$\eta = \omega_0 * \omega_{ихх} M_{max} / (\omega_0 * \omega_{ихх} M_{max} + R_{я}I_{яmax}^2 + I_{яxx} U - R_{я}I_{яxx}^2)$$

или после преобразований, учитывая (15)

$$\eta = \omega_0 U I_{яmax} / (\omega_0 U I_{яmax} + R_{я}I_{яmax}^2 + I_{яxx} U - R_{я}I_{яxx}^2). \quad (18)$$

Для КПД при нормированной скорости на интервале $\omega_{01} < \omega_0 < 1$ имеем

$$\eta = \{[Uk\Phi - \omega_{ихх}\omega_0(k\Phi)^2]\omega_{ихх}\omega_0\} / \{[Uk\Phi - \omega_0\omega_{ихх}(k\Phi)^2]\omega_0\omega_{ихх} + (U - \omega_0\omega_{ихх}k\Phi)^2 + R_{я}I_{яxx} U - (R_{я})^2 I_{яxx}^2\}$$

или после преобразований

$$\eta = (1 - \omega_0)U^2 \omega_0 / [(1 - \omega_0)U^2 \omega_0 + (1 - \omega_0)^2 U^2 + R_{я}I_{яxx} U - (R_{я})^2 I_{яxx}^2]. \quad (19)$$

Построим зависимость КПД от нормированной угловой скорости для генератора Г290, имеющего параметры: $R_{я} = 0,03$ Ом, $I_{яmax} = 150$ А, $U = 65$ В, $I_{яxx} = 9$ А.

На графике этой зависимости, приведенном на рис. 2, в точке $\omega_0 = \omega_{01} \approx 0,93$ происходит переход от графика $\eta_1(\omega_0)$, полученного из выражения (18), к графику $\eta_2(\omega_0)$, полученному из выражения (19).

На рис. 3 изображено семейство зависимостей КПД от ω_0 с учетом такого перехода, для чего неиспользуемые участки зависимостей удалены.

Цифрами на рис. 3 обозначены:

зависимость 1 для $U = 65$ В и $I_{яxx} = 9$ А; (внешняя механическая характеристика); зависимость 2 для $U = 40$ В и $I_{яxx} = 6$ А; зависимость 3 для $U = 25$ В и $I_{яxx} = 4$ А; (частичные механические характеристики).

Из графиков на рис. 3 можно видеть, что максимальный КПД получается при максимальном питающем напряжении. Объясняется это тем, что с ростом напряжения растет угловая скорость и механическая мощность ВЭД, а основные потери, зависящие от ограниченного тока, остаются практически мало меняющимися.

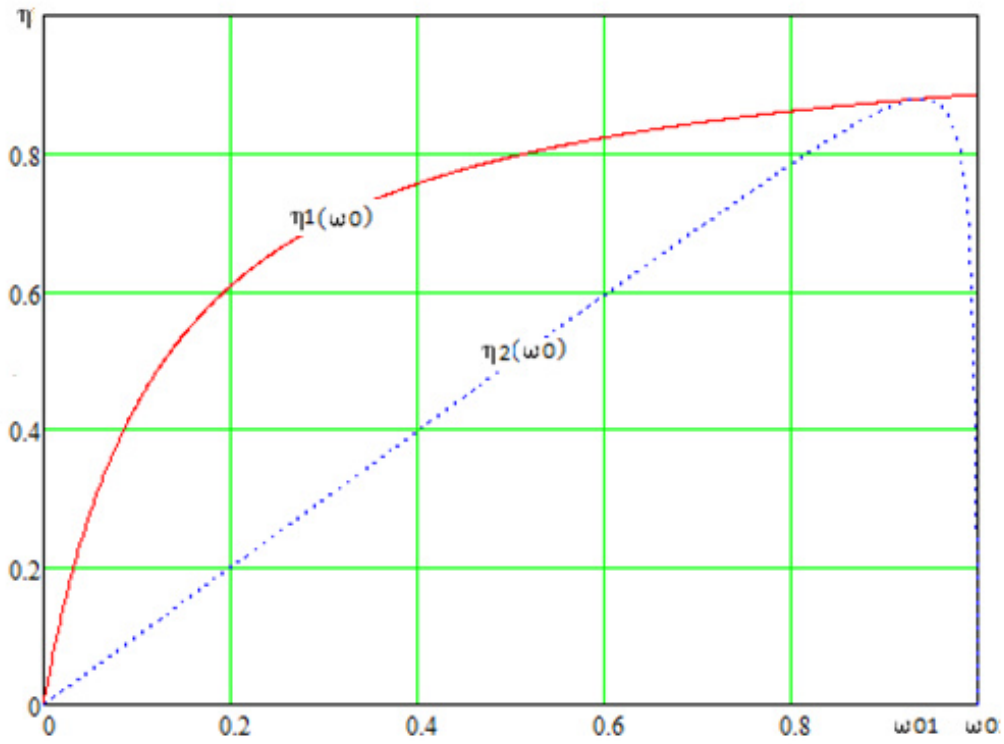


Рис. 2. Зависимость КПД от нормированной угловой скорости

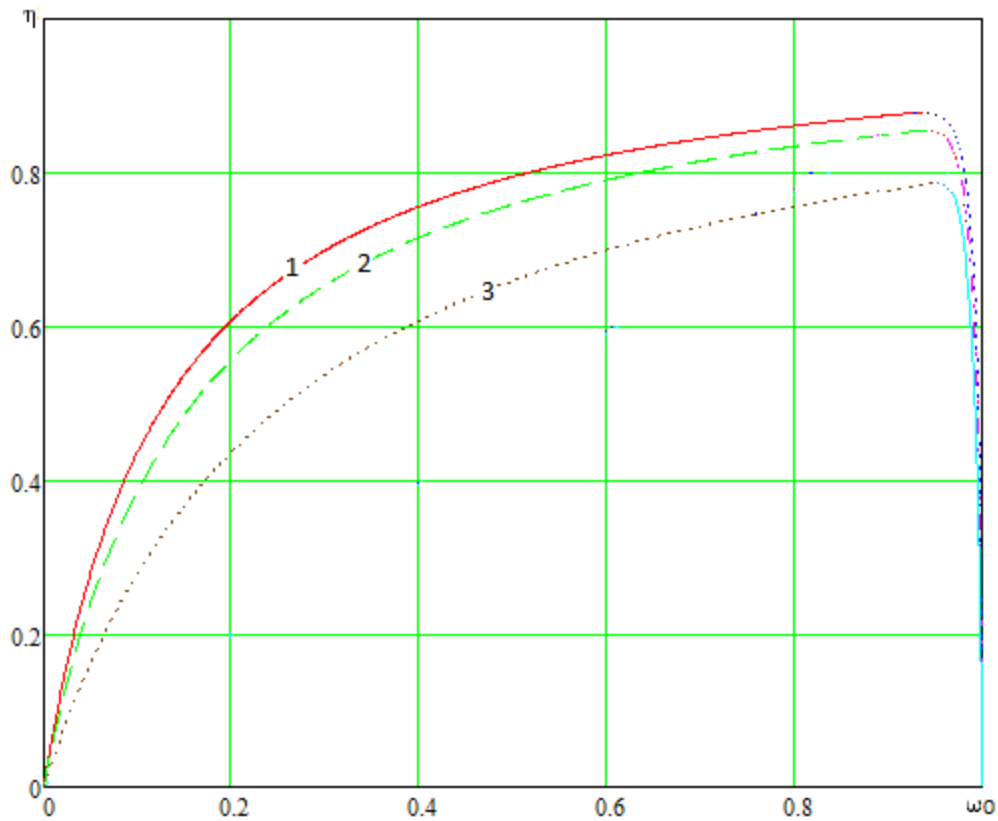


Рис. 3. Семейство зависимостей КПД от нормированной угловой скорости для трех значений напряжения ТАБ

При расчете полного КПД ВЭД с электромагнитным возбуждением к потерям надо добавлять небольшую мощность, рассеиваемую обмоткой возбуждения, т.е. произведение тока возбуждения на напряжение возбуждения. Потери на возбуждение снижают КПД для ВЭД на основе генератора Г290 примерно на 1 %.

Выводы

Предложенная методика расчёта для ВЭД на основе мощного автомобильного генератора позволяет, имея основные параметры генератора и некоторые легкодоступные для измерения параметры электродвигателя, получить основные характеристики, необходимые для расчета тягового электропривода гибридного автомобиля, а именно:

- зависимость угловой скорости от вращающего момента ВЭД (механическую характеристику);
- зависимость угловой скорости ВЭД от тока якоря (токоскоростную характеристику);
- зависимость максимальной мощности ВЭД от напряжения ТАБ;
- зависимость КПД от угловой скорости;
- рассчитать не только внешние, но и частичные характеристики ВЭД.

Литература

1. Бажинов О.В. Конверсія легкового автомобіля в гібридній / О.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, Хакім Мауш. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 200 с.
2. Бажинов О.В. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Двадненко. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
3. Бажинов А.В. Электропривод для конверсионного гибридного автомобиля / А.В. Бажинов., В.Я. Двадненко, Хаким Мауш // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 30. – С. 7–12.
4. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 698 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 // Перспективы развития автомобилей. Развитие транспортных средств с альтернативными энергоустановками: материалы 75-й Международной научно-технической конференции ААИ 14.11–15.11.2011. – г. Тольятти, Россия. – 2011.

References

1. Bazhinov O.V., Dvadenko V.Ya., Hakim Mausch. Konversiya legkovogo avtomobilya v gibridniy. Kharkiv, KHNADU Publ., 2014. 200 p.
2. Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A., Dvadenko V.Ya. Sinergetichniy avtomobil. Teoriya i praktika. Kharkiv, KHNADU Publ., 2011. 236 p.
3. Bazhinov A.V., Dvadenko V.Ya. Hakim Mausch. Elektroprivod dlya konversionnogo gibridnogo avtomobilya. *Avtomobilnyy transport: sb. nauch. tr.*, 2012, vol. 30. pp.7–12.
4. Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 698 p.
5. Ovchinnikov I.E. Ventilnye elektricheskie dvigateli i privod na ih osnove. S.Pb: Korona-vek Publ., 2006. 336 p.
6. Dvadenko V.Ya., Serikov S.A. Osobennosti dvuhzonovogo regulirovaniya ventilnogo elektroprivoda gibridnogo avtomobilya. *Perspektivy razvitiya avtomobiley. Razvitiye transportnyh sredstv s alternativnymi energo-ustanovkami: materialy 75 Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. AAI 14.11–15.11.2011, g. Tolyatti, Rossiya*, 2011.

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

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2014 г.