

Применение ветрогенератора для зарядки тяговых аккумуляторных батарей

д.т.н. проф. Долбилин Е.В., д.т.н. проф. Овсянников Е.М., д.т.н. проф. Кошеляев Е.М.

*Университет машиностроения
8 (495) 223-05-23, доб. 13-12*

Аннотация. Показана целесообразность использования ветроустановки для зарядки тяговых аккумуляторных батарей. Проведен анализ ветрогенераторов и выбран способ регулирования оптимальным режимом генератора. Рассчитано внутреннее сопротивление аккумулятора и выбран метод стабилизации электрического режима генератора.

Ключевые слова: ветрогенератор, синхронный генератор, тяговая аккумуляторная батарея

Применение мощных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на автомобилях, эксплуатируемых в городе, где средние скорости движения невелики, крайне нерентабельно. Отсюда появились рациональные пути решения эколого-экономической проблемы автотранспорта:

- применение на автомобиле совместно с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) тягового электропривода (ТЭП), питаемого от накопителей энергии различной физической природы - гибридные автомобили (ГА);
- замена ДВС тяговым электроприводом, имеющим высокий КПД (85...90%), «нулевую» токсичность выбросов, отсутствие шума - электромобили (ЭМ).

Использование гибридных автомобилей и электромобилей требует применения мощных тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), практически ежедневной их подзарядки. Зарядку аккумуляторов можно осуществлять на зарядных станциях, которые появляются в России, или в домашних условиях. Однако ввиду высокой цены электроэнергии или ее отсутствия необходимо использовать альтернативные источники электроэнергии, такие как солнечная энергия или энергия ветра.

Для стран с благоприятным условием солнечного излучения имеется возможность эффективного использования солнечных батарей (СБ) на основе солнечных элементов (СЭ) для подзарядки ТАБ. Работая совместно с ТАБ, СБ позволяет увеличить срок службы ТАБ и повысить длину пробега автомобиля без перезарядки ТАБ. Солнцемобили продемонстрировали пробег в день до 300 км при максимальной скорости порядка 150 км/ч. Однако Россию нельзя отнести к странам с большим числом солнечных дней в году, даже ее южные районы. Поэтому для России целесообразно применение ветроустановок. Наша страна вследствие своего географического положения находится в выгодных условиях. Она обладает неисчерпаемыми ресурсами энергии ветра. Имеются огромные области в России, где применять энергию ветра можно с максимальной эффективностью, например побережье Северного Ледовитого океана от Кольского полуострова до Чукотки, территория севернее приблизительно шестидесятой параллели, Камчатка. Длительность действия ветра в этих районах приблизительно 300-320 суток в году. Также можно отметить и более южные районы, где целесообразно применение ветроустановок, например Калмыкия, Волгоградская область и другие районы.

Разработано большое количество ветрогенераторов. В зависимости от ориентации оси вращения по отношению к направлению потока ветрогенераторы могут быть классифицированы следующим образом:

- с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ветрового потока;
- с горизонтальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветра (подобные водяному колесу);
- с вертикальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветрового потока.

Для зарядки аккумуляторных батарей предпочтение следует отдать ветрогенераторам с вертикальной осью вращения. Для них отпадает необходимость в устройствах для ориентации на ветер, упрощается конструкция и уменьшаются гироскопические нагрузки, вызыва-

ющие дополнительные напряжения в лопастях, системе передач и прочих элементах установок с горизонтальной осью вращения. Они нечувствительны к тому, с какой стороны дует ветер, поэтому имеют только одну жёстко фиксированную ось вращения. Это намного упрощает конструкцию и повышает её надёжность и долговечность. Кроме того, они работают при намного меньшей скорости ветра (2-4 м/с), могут устанавливаться без специальной железобетонной конструкции, например на крыше постройки, создают значительно меньший шум при вращении лопастей. При этом создаваемая мощность генератора может достигать 10 кВт и более, что достаточно для зарядки аккумуляторов. Ветроустановки можно устанавливать на станциях зарядки, заправочных станциях и в жилом частном секторе.

На ветроустановках используются 2 вида генераторов: синхронный вентильный генератор и генератор на постоянных магнитах.

Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам синхронного вентильного генератора относятся его низкая цена и возможность получения больших мощностей без значительного увеличения веса. Вентильный генератор – тип генератора, который способен кратковременно выдавать ток в 3-4 раза выше номинального. Также эти генераторы оптимальны для подключения оборудования с высокими стартовыми токами. Это электродвигатели, насосы, компрессоры, дисковые пилы и тяговые аккумуляторы. Вентильный генератор представляет собой комбинацию синхронного генератора и управляемого полупроводникового коммутатора, выполняющего функции коммутации фаз статорной обмотки в зависимости от положения ротора.

В синхронных машинах второго типа постоянно направленное поле возбуждения образуется с помощью постоянных магнитов. Синхронные машины с постоянными магнитами не нуждаются в возбудителе и в скользящем контакте, обладают высоким КПД, их надёжность существенно выше, чем у обычных синхронных машин, в которых вращающаяся обмотка возбуждения и щеточное устройство достаточно часто повреждаются.

К недостаткам генераторов на постоянных магнитах относят их высокую цену и большой вес. Недостатком таких генераторов является также невозможность регулировать выходное напряжение. Однако изменение напряжения под нагрузкой не очень велико.

Вентильный генератор с возбуждением от постоянных магнитов не имеет коллектора и щеточного механизма. Выходное переменное напряжение не регулируется и зависит от частоты вращения ротора, мощности нагрузки, состояния аккумуляторной батареи. Генератор размещается внутри опорно-монтажного стола. Вращение на вал генератора передается непосредственно от ротора или через мультипликатор. Генератор имеет номинальную частоту вращения от 200 до 300 об./мин, выпрямленное напряжение генератора составляет 100 – 300 В, имеет нулевой момент страгивания, не требует обслуживания в процессе эксплуатации.

Рассмотрим влияние параметров синхронных машин с постоянными магнитами (СДПМ) на их режимы работы. Выражение электромагнитного момента M [1]:

$$M = i_{sq} \cdot (\Psi_0 + i_{sd} \cdot L_{dq}), \quad (1)$$

где: i_{sq} – ток статора; Ψ_0 – потокосцепление, обусловленное постоянными магнитами;

L_{dq} – индуктивность в системе координат dq .

Анализируя (1), можем судить о связи параметров СДПМ с их режимами работы, основывая на знаке развиваемого электромагнитного момента при различных вариантах расположения вектора тока статора на плоскости системы координат (d, q) , связанной с ротором, и соотношениях между составляющими вектора тока, потоком от постоянных магнитов и индуктивностями.

СДПМ работает в генераторном режиме, когда $M < 0$. Рассмотрим явнополусные машины, которые имеют свойство $L_d < L_q$. Графически возможные режимы работы СДПМ изображены на рисунке 1.

Теоретически можем управлять синхронным генератором в четырех квадрантах комплексной плоскости. Однако рассмотрим возможность рационального регулирования тока

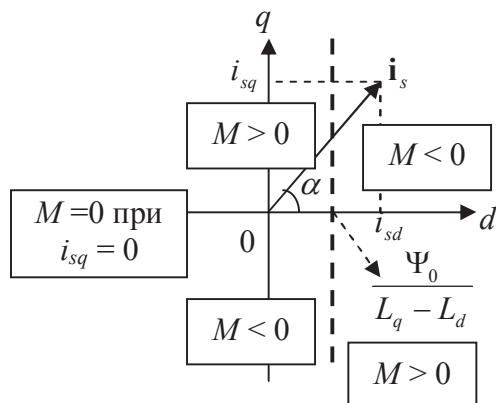


Рисунок 1. Режимы работы СДПМ в зависимости от расположения вектора тока статора в системе координат (d, q)

Представим уравнение электромагнитного момента [2]:

$$M = \Psi_0 \cdot I_s \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} \cdot L_{dq} \cdot I_s^2 \cdot \sin 2\alpha, \quad (2)$$

и ставим задачу определения условия глобального максимума момента M при известных параметрах СДПМ и заданном значении тока статора I_s .

В такой постановке задачи можно представить момент M в функции от угла α поворота вектора тока статора от оси d (рис.1), т.е. $M = f(\alpha)$.

Условием существования максимума момента являются:

$$\frac{dM}{d\alpha} = 0 \text{ и } \frac{d^2M}{d\alpha^2} > 0 \text{ в генераторном режиме.}$$

Из (2) имеем:

$$\frac{dM}{d\alpha} = \Psi_0 \cdot I_s \cdot \cos \alpha - (L_q - L_d) \cdot I_s^2 \cdot \cos 2\alpha; \quad (3)$$

$$\frac{d^2M}{d\alpha^2} = -M + \frac{3}{2} \cdot (L_q - L_d) \cdot I_s^2 \cdot \sin 2\alpha. \quad (4)$$

Из (3) решение $\frac{dM}{d\alpha} = 0$ позволяет определить угол α , при котором обеспечивается необходимое условие существования максимума момента:

$$\cos \alpha = \frac{\Psi_0 \pm \sqrt{\Psi_0^2 + 8I_s^2(L_q - L_d)^2}}{4I_s(L_q - L_d)}. \quad (5)$$

Связи между расположением вектора тока статора на комплексной плоскости и условиями существования максимума электромагнитного момента представлены в табл. 1. Знаки второй производной момента $(d^2M/d\alpha^2)$ от угла α определяются из (4).

Следует заметить, что только в двух областях $\pi/2 < \alpha < \pi$ гарантируется обеспечение максимума момента в двигательном режиме независимо от параметров машины и $\pi/2 < \alpha < 3\pi/2$ – генераторном режиме. Таким образом, при управлении СДПМ рационально поддерживать вектор тока статора в области $\pi/2 < \alpha < 3\pi/2$, что эквивалентно поддерживать $i_{sd} < 0$. В этом случае из (5) можем определить угол поворота вектора тока статора α относительно оси d , т.е. закон управления СДПМ по максимальной перегрузочной способности (глобальному максимуму момента) при ограничении по току:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\Psi_0 - \sqrt{\Psi_0^2 + 8 \cdot I_s^2 \cdot (L_q - L_d)^2}}{4 \cdot I_s \cdot (L_q - L_d)} \right). \quad (6)$$

В настоящее время выделяются три основных типов ТАБ, пригодных для использования на борту ГА: свинцово-кислотные, никель-металл-гидрид (NiMH) и литиевые аккумуляторы.

Таблица 1

Условия существования максимума электромагнитного момента СДПМ

Диапазон изменения α	$\sin \alpha$ (i_{sq})	$\cos \alpha$ (i_{sd})	$M = I_s \sin \alpha [\Psi_0 - (L_q - L_d) I_s \cos \alpha]$	$d^2 M / d\alpha^2$
$0 < \alpha < \pi / 2$	> 0 (+)	> 0 (+)	$M \geq 0$ при $\Psi_0 \geq (L_q - L_d) I_s \cos \alpha$ $M \leq 0$ при $\Psi_0 \leq (L_q - L_d) I_s \cos \alpha$	не определена
$\pi / 2 < \alpha < \pi$	> 0 (+)	< 0 (-)	$M \geq 0$ – двигательный режим	≤ 0
$\pi < \alpha < 3\pi / 2$	< 0 (-)	< 0 (-)	$M \leq 0$ – генераторный режим	≥ 0
$3\pi / 2 < \alpha < 2\pi$	< 0 (-)	> 0 (+)	$M > 0$ при $\Psi_0 < (L_q - L_d) I_s \cos \alpha$ $M < 0$ при $\Psi_0 > (L_q - L_d) I_s \cos \alpha$	не определена

Для ТАБ важной является ее вольт-амперная характеристика $U_a(I)$ при различных значениях степени заряженности. ВАХ ТАБ представляет собой функцию напряжения на ТАБ от двух переменных - разрядного тока i_p (зарядного - i_3) и времени разряда t_p (заряда - t_3) (или емкость Q), т.е. при разряде - $u_a = f(i_p, t_p)$ или $u_a = f(i_p, Q)$; а при заряде - $u_a = f(i_3, t_3)$ или $u_a = f(i_3, Q)$.

В настоящее время широкое распространение получило уравнение Шеферда [3], описывающее ВАХ ТАБ:

$$u_a(t) = U_{анр} - R_a \cdot I_p - R_{пол} \cdot \frac{I_p}{1-x} + A \cdot \exp(-B \cdot x), \quad (7)$$

где: $U_{анр}$ – напряжение разомкнутой цепи ТАБ в начале разряда также зависит от I_p и Q_p ;

R_a и $R_{пол}$ – внутреннее (омическое) и поляризационное сопротивление ТАБ соответственно; $Q_{анр}$ – начальная емкость; I_p – постоянный разрядный ток; t – текущее время; A и B – постоянные аппроксимации, определенные по экспериментальным данным; $x = I_p t / Q_0$ – степень разряженности ТАБ.

Поляризационное сопротивление значительно меньше внутреннего, следовательно, при $x \ll 1$ уравнение (7) трансформируется к виду:

$$u_a(t) = U_{анр} - R_a \cdot I_p - A \cdot \exp(-B \cdot x). \quad (8)$$

Приняв $x = 0$, можно найти коэффициент A из последнего уравнения:

$$A = U_{анр} - R_{ТАБ} \cdot I_p - u_a(t). \quad (9)$$

Коэффициент B определяется из (7) при другом режиме разряда.

Внутреннее сопротивление ТАБ R_a зависит от степени разряженности x по экспоненциальному закону [4]:

$$R_a = a + b \exp(-cx), \quad (10)$$

где: a , b , c – коэффициенты аппроксимации.

На рисунке 2 приведены зависимости сопротивления от степени разряженности свинцово-кислотных ТАБ «Genesis» и «Electrosorce» (США) [5]. Коэффициенты аппроксимации для этих ТАБ принимаются равными: для «Genesis» - $a = 3,6237$; $b = 0,139$; $c = -28,4253$; для «Electrosorce» - $a = 3,7975$; $b = 0,0150$; $c = -16,0664$.

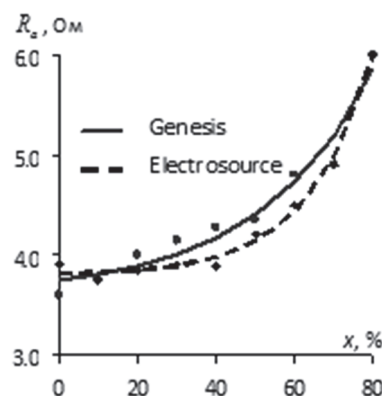


Рисунок 2. Зависимость внутреннего сопротивления свинцово-кислотных ТАБ от их степени разряженности

Среднее значение напряжения U_{cp} при разряде или заряде в интервале от t_1 и t_2 равно:

$$U_{cp} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} u_a dt. \quad (11)$$

Разрядная Q_p и зарядная Q_z емкости ТАБ при произвольной форме тока :

$$Q_z = \int_0^{t_z} i_z dt; \quad Q_p = \int_0^{t_p} i_p dt. \quad (12)$$

Энергия, отданная (полученная) ТАБ при разряде W_p (заряде – W_z):

$$W_p = U_{cp} \cdot \int_0^{t_p} i_p dt \text{ и } W_z = U_{cp} \cdot \int_0^{t_z} i_z dt; \quad (13)$$

Отдача по емкости определяется соотношением: $\eta_Q = Q_p / Q_z$;

$$\text{отдача по энергии} - \eta_w = W_p / W_z. \quad (14)$$

Дифференцируя данное уравнение и приравнявая результат нулю, получим предельный максимальный пусковой ток, соответствующий наибольшей мощности P_a , которая обуславливает динамические показатели АТС: $I_{a, \max} \leq E_{a, \min} / (2R_{a, \max})$. Так как по мере разряда батареи уменьшается ЭДС и возрастает внутреннее сопротивление, то максимальный пусковой ток следует вычислять для $Q = 20 \dots 25 \%$.

Если учесть зависимость внутреннего сопротивления аккумулятора от степени ее разряженности, то представляет интерес форсированная зарядка аккумуляторов. Такая зарядка может производиться токами величиной до 70% от номинальной емкости. Время заряда тем меньше, чем больше величина зарядного тока. Практически при заряде током $0,7C_{20}$ длительность зарядки не должна быть более 30 мин, при $0,5C_{20}$ - 45 мин, а при $0,3C_{20}$ - 90 мин. В ходе форсированного заряда нужно контролировать температуру электролита и при достижении 45°C прекращать зарядку. Использование форсированного заряда должно быть исключением, так как его регулярное многократное повторение для одной и той же батареи заметно укорачивает срок ее службы.

При зарядке аккумулятора при постоянном напряжении, что обеспечивает автоматический регулятор напряжения генератора, в течение всего времени заряда напряжение зарядного устройства остается постоянным. Зарядный ток убывает в ходе заряда по причине повышения внутреннего сопротивления батареи. В первый момент после включения сила зарядного тока определяется выходным напряжением источника питания, уровнем заряженности батареи, а также температурой электролита батарей. Сила зарядного тока в первоначальный момент заряда может достигать $(1,0-1,5)C_{20}$. Для исправных, но разряженных автомобильных аккумуляторов такие токи не принесут вредных последствий. Несмотря на большие токи в

первоначальный момент зарядного процесса, общая длительность полного заряда аккумуляторных батарей приблизительно соответствует режиму при постоянстве тока. Заряд по такой методике предпочтителен, так как он обеспечивает более быстрое доведение батареи до состояния, позволяющего обеспечить пуск двигателя. Кроме того, сообщаемая на первоначальном этапе заряда энергия тратится преимущественно на основной зарядный процесс, то есть на восстановление активной массы электродов. При этом реакция газообразования в аккумуляторе еще невозможна.

При наличии регулятора напряжения возможен модифицированный заряд. Его цель - уменьшить силу тока в начальный период заряда и понизить влияние колебания напряжения в сети на зарядный ток. При использовании этого метода напряжение на клеммах зарядного устройства поддерживается постоянным в пределах от 2,5 до 3,0 В на один аккумулятор. Считается, что для свинцовых аккумуляторов наилучшим является напряжение 2,6 В на аккумулятор, обеспечивающее заряд ориентировочно за 8ч.

Вывод

Синхронный генератор, установленный на валу ротора ветроустановки вертикального типа, обеспечивает оптимальный режим при зарядке тяговой аккумуляторной батареи при наличии регулятора напряжения. Изменение внутреннего сопротивления составляет 150%, что позволяет создать форсированный режим на начальном этапе зарядки.

Литература

1. Овсянников Е.М., Долбилин Е.В., Кошеляев Е.М. Электрооборудование автотранспортных средств с тяговыми электроприводами. - М.: Палеотип, 2001, - 363 с.
2. Теория и расчет тягового привода электромобилей / Под ред. И.С. Ефремова. - М.: Высшая школа, 1984, - 383 с.
3. Shepherd C.M. Design of primary and secondary cells. An equation describing battery discharge. - J. Electrochem. Soc., 1965, vol. 112(7). P. 667-644.
4. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. - М.: Советское радио, 1978, - 150 с.
5. A comparison of energy use and emissions from Direct-Hydrogen, Indirect Methanol and Indirect Hydrocarbon Fuel Cell Vehicles and fuel production / Report of Fuel Cell Vehicle Modeling Project Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2001. 156 pages.

Исследование двигателя с расслоением заряда на экспериментальной установке с выделенным цилиндром

д.т.н. проф. Кузнецов И.В., Сычев А.М., д.т.н. проф. Денисов А.В.
ФГБОУ ВПО «МГИУ», НИИЦ АТ 3 ЦНИИ МО РФ
8 (915) 159-44-62, sam61@mail.msiu.ru

Аннотация. Предложен процесс сгорания расслоенного заряда для двигателя с принудительным воспламенением смеси. Для реализации процесса разработаны и изготовлены детали системы впуска и головка цилиндра. Проведены исследования на экспериментальной установке, созданной на базе полноразмерного двигателя с выделенным цилиндром, который имел автономные системы питания, зажигания и выпуска. Сравнительные исследования выделенного цилиндра, работающего по обычному процессу и процессу с расслоением заряда, показали, что при работе с расслоением заряда улучшается топливная экономичность более чем на 10 % и снижается содержание в отработавших газах оксида углерода (CO), углеводородов (CH) и оксидов азота (NOx) на 40-50 %.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, расслоение заряда, моторный стенд, выделенный цилиндр, вихревое движение, экономичность, отработавшие газы, оксид углерода, углеводороды, оксиды азота