

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТРАКТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY CAPACITY OF THE EXCITATION SYSTEM OF THE TRACTOR GENERATORS

**А.Е. ЧЕРНОВ**<sup>1</sup>, к.т.н.

**А.В. АКИМОВ**<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Научно-исследовательский университет  
МЭИ

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Московский политехнический университет,  
alexzander\_66@mail.ru

**A.E. CHERNOV**<sup>1</sup>, PhD in Engineering

**A.V. AKIMOV**<sup>2</sup>, PhD in Engineering

<sup>1</sup> National Research University "Moscow Power Engineering  
Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,  
alexzander\_66@mail.ru

В статье рассмотрена методика сравнения роторов принципиально различных типов электромашинных преобразователей, а именно генераторов с электромагнитным возбуждением и магнетоэлектрических генераторов. При всех вариантах сравнительного анализа возникает необходимость в сопоставлении энергетических возможностей электрических машин, выполненных с различными по устройству элементами системы возбуждения (постоянными магнитами, катушки возбуждения), что в принципе невозможно осуществить без знания и сопоставления магнитных и энергетических характеристик индукторов генераторов. С целью унификации содержания и хода расчетных исследований по определению электромагнитных параметров генераторов с различными системами возбуждения и получения на этой основе наглядных представлений об их достоинствах и недостатках целесообразно представить используемые при расчетах генераторов характеристики постоянных магнитов и электромагнитов в виде одинаковых по форме и содержанию аналитических или графических зависимостей.

Речь идет прежде всего о зависимостях магнитных потоков в расчетных сечениях элементов систем возбуждения (в нейтральном их сечении  $\Phi_{эм}$  и  $\Phi_m$  от МДС элементов системы возбуждения  $F_{эм}$  и  $\Phi_m$ ).

Наиболее просто эта задача решается приведением магнитных характеристик электромагнитов к такому же виду и с использованием тех же параметров и понятий, что и магнитные характеристики постоянных магнитов. В результате проведенных исследований установлено, что широко используемые в автотрак-торном электрооборудовании постоянные магниты-ферриты, изготавливаемые методом порошковой металлургии из смеси измельченных окислов железа и стронция, в следствии относительно низкого уровня магнитной энергии и низких значений остаточной индукции не в состоянии обеспечить такой же уровень магнитных свойств индукторов, которым обладают индукторы генераторов с электромагнитным возбуждением, а следовательно, их применение в автотракторных генераторах следует считать нецелесообразным.

**Ключевые слова:** постоянный магнит, электромагнитная система, электромагнит, размагничивание материала, кривая размагничивания, кривая возврата, эквивалентный магнит, графический метод

The paper describes the technique of comparing fundamentally different types of transverters rotors, namely generators with electromagnetic excitation and magnetolectric generators.

In all embodiments of the comparative analysis it is necessary to compare power capabilities of electrical machines made with different devices in excitation system (permanent magnets, excitation coils), which in principle cannot be implemented without knowing and comparing the magnetic characteristics of the power generators and inductors. To unify the content and progress of computational studies on determination of electromagnetic parameters of generators with different excitation systems and gaining on this basis visual representations of its advantages and disadvantages it is advisable to represent used in the calculations of generators characteristics of permanent magnets and electromagnets in the form of identical form and content analytic or graphic dependencies.

This is about the dependence of the magnetic flows in calculated sections of the element excitation systems (in their neutral section  $\Phi_{эм}$  and  $\Phi_m$  from magnetomotive force of excitation system  $F_{эм}$  и  $\Phi_m$ ).

Most simply this problem is solved by bringing the magnetic characteristics of the electromagnets to the same form and with the same parameters and concepts as the magnetic characteristics of the permanent magnets.

As a result of researches it is established that widely used in automobile and tractor electrical equipment permanent magnets-ferrites fabricated by powder metallurgy from a mixture of crushed iron oxide and strontium owing to the relatively low level of magnetic energy and low values of residual induction is unable to provide the same level of magnetic properties of the inductors that have the inductors of the generators with electromagnetic excitation, and therefore, their use in automotive generators should be considered inappropriate.

**Keywords:** permanent magnet, electromagnetic system, electromagnet, demagnetization of the material, demagnetization curve, curve of return, equivalent magnet, graphic method.

В настоящее время в электроэнергетических установках отечественных и зарубежных автомобилей в качестве источников электроэнергии используются преимущественно альтернативные генераторы, имеющие электромагнитное возбуждение.

Эти альтернативные генераторы обладают способностью глубокого регулирования потокосцепления обмоток якоря и обеспечением за счет этого постоянства напряжения в широком диапазоне изменения нагрузки и частот вращения приводного двигателя и вполне приемлемые эксплуатационные качества, в частности вполне приемлемый на данном этапе срок службы. Тем не менее, несмотря на очевидные преимущества перед генераторами с возбуждением от постоянных магнитов, не имеют достаточных оснований для рассмотрения их в качестве безальтернативного варианта исполнения электромашинных генераторов для систем электроснабжения автомобилей и других транспортных средств. Основанием для такого заключения являются недостатки этих генераторов, обусловленные применением в их конструкции скользящих контактов и крайне ненадежное самовозбуждение при их одиночной работе (при отсутствии в системе электроснабжения аккумуляторной батареи). Последний недостаток особенно ощутим в случае изготовления магнитопровода из высококачественных магнитомягких материалов с высокой магнитной проницаемостью и узкой петлей гистерезиса.

Генераторы с возбуждением от постоянных магнитов свободны от перечисленных недостатков. Они бесконтактны, а реализованный в них способ создания магнитного поля не требует затрат электроэнергии. Эти электрические машины более мобильны в отношении выхода их на режим. Что же касается регулирования напряжения, то применительно к ним разработан и опробован ряд способов его стабилизации, а опыт эксплуатации генераторов с возбуждением от постоянных магнитов в различного рода автономных электроэнергетических установках, в том числе и автотракторных, доказывает, что применение постоянных магнитов не является непреодолимым препятствием для получения электроэнергии высокого качества.

Приведенные качественные характеристики генераторов с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов играют существенную роль при выборе системы возбуждения генератора для конкретных

условий применения. Однако каждая из них или их совокупность могут стать определяющими лишь после сопоставления массогабаритных и энергетических показателей самих генераторов или построенных на их основе систем генерирования электроэнергии, включающих в себя помимо генераторов устройства обеспечения качества электроэнергии (применительно к автотракторным системам – регулятора или стабилизатора напряжения).

При всех вариантах сравнительного анализа возникает необходимость в сопоставлении энергетических возможностей электрических машин, выполненных с различными по устройству элементами системы возбуждения (постоянными магнитами, катушки возбуждения), что в принципе невозможно осуществить без знания и сопоставления магнитных и энергетических характеристик индукторов генераторов. С целью унификации содержания и хода расчетных исследований по определению электромагнитных параметров генераторов с различными системами возбуждения и получения на этой основе наглядных представлений об их достоинствах и недостатках целесообразно представить используемые при расчетах генераторов характеристики постоянных магнитов и электромагнитов в виде одинаковых по форме и содержанию аналитических или графических зависимостей.

Речь идет прежде всего о зависимостях магнитных потоков в расчетных сечениях элементов систем возбуждения (в нейтральном их сечении  $\Phi_{\text{э.м}}$  и  $\Phi_{\text{м}}$  от МДС элементов системы возбуждения  $F_{\text{э.м}}$  и  $\Phi_{\text{м}}$ ).

Наиболее просто эта задача решается приведением магнитных характеристик электромагнитов к такому же виду и с использованием тех же параметров и понятий, что и магнитные характеристики постоянных магнитов [1, 2].

Представление в указанном виде рабочих характеристик электромагнитов  $\Phi_{\text{э.м}}$  ( $F_{\text{э.м}}$ ) удобно в том отношении, что позволяет оценить энергетические возможности конкретных преобразователей в случае, например, замены в них электромагнитов (если в преобразователе используется электромагнитное возбуждение) на постоянные магниты и, наоборот, в случае замены постоянных магнитов в преобразователях с магнитоэлектрическим возбуждением – на электромагниты при сохранении объема индуктора. Это же обстоятельство позволяет решить и другую достаточно важную с теоретической и практической точки зрения

задачу: определение кривой размагничивания сплава постоянного магнита, в случае замены которым обмотки возбуждения сохранилась бы та же характеристика  $\Phi_{\text{э.м}}(F_{\text{э.м}})$ . реализация этой процедуры позволяет в ходе выполнения расчетов магнитной цепи рассматривать электромагнит как некоторый выполненный из определенного сплава постоянный магнит и тем самым обеспечивает возможность создания унифицированных методик расчета индукторов электрических машин.

Ниже излагается методика построения рабочей характеристики электромагнита и поиска кривой размагничивания сплава постоянного магнита, способного обеспечить такую же характеристику, т.е. по существу методика поиска постоянного магнита, эквивалентного по своим магнитным свойствам конкретному электромагниту.

При расчете генератора с возбуждением от постоянных магнитов используется пересчитанная с учетом размеров постоянных магнитов и построенная в координатах  $(\Phi_{\text{м}}, F_{\text{м}})$

спинка кривой размагничивания материала постоянного магнита (см. рис. 1), уравнение прямой магнитного возврата КМ и зависимость магнитного потока рассеяния постоянного магнита  $\Phi_{\text{см}}$  от МДС  $F_{\text{м}}$  на его концах. С учетом принятых обозначений магнитных величин эти зависимости имеют вид:

$$\Phi_{\text{м}} = \Phi_{\text{м}}(F_{\text{м}}); \tag{1}$$

$$\Phi_{\text{м}} = (F_{\text{ф}} - F_{\text{м}}) \cdot \text{tg}\beta'; \tag{2}$$

$$\Phi_{\text{см}} = F_{\text{м}} \cdot \Delta_{\text{см}}, \tag{3}$$

где  $F_{\text{ф}}$  – фиктивная МДС постоянного магнита (координата точки пересечения прямой магнитного возврата с осью  $F_{\text{м}}$ );  $h_{\text{м}}$  – высота постоянного магнита;  $\beta'$  – угол наклона прямой магнитного возврата, построенной в координатах  $(\Phi_{\text{м}}; F_{\text{м}})$  к оси  $F_{\text{м}}$ , равен:

$$\beta' = \arctg\left(\frac{S_{\text{м}}}{h} \cdot \text{tg}\beta\right),$$

$S_{\text{м}}$  – площадь нейтрального сечения постоянного магнита;  $\beta$  – угол наклона прямой магнитного возврата, построенной в координатах  $(B_{\text{м}}; H_{\text{м}})$  к оси  $H_{\text{м}}$  (проницаемость сплава постоянного магнита).

Уравнения (1)–(3) совместно с уравнениями внешней магнитной цепи, составленными применительно к различным режимам работы разрабатываемых или исследуемых магнитоэлектрических машин (холостому ходу, короткому замыканию, номинальному режиму и др.), обеспечивают возможность решения всех вопросов, связанных с определением электромагнитных параметров, расчетами и построениями их рабочих характеристик [3].

Аналогичные уравнения можно составить и применительно к электромагнитам, если привести их параметры и характеристики к параметрам и характеристикам постоянных магнитов, эквивалентных им с точки зрения результатов взаимодействия с внешней магнитной цепью. Значения коэффициентов приведения параметров электромагнитов к параметрам эквивалентных магнитов определяются из условий равенства магнитных потоков в их нейтральных сечениях ( $\Phi_{\text{э.м}}$  и  $\Phi_{\text{м.э}}$ ) и МДС на концах:

$$\Phi_{\text{э.м}} = \Phi_{\text{м.э}}; \tag{4}$$

$$F_{\text{э.м}} = F_{\text{м.э}}. \tag{5}$$

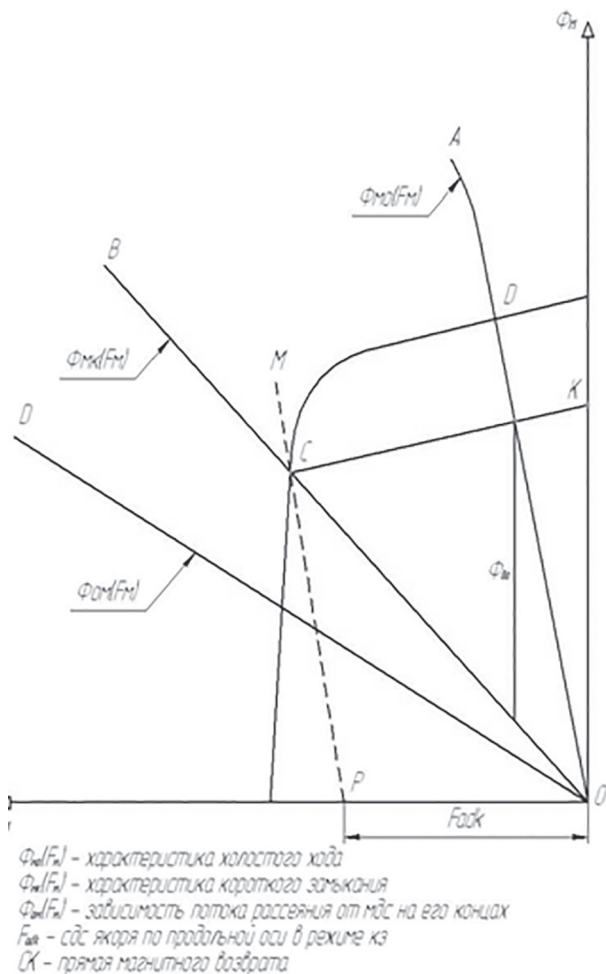


Рис. 1. Диаграмма магнита

Представив  $\Phi_{\text{Э.М}}$  и  $\Phi_{\text{М.Э}}$  в (5) через соответствующие им значения магнитных индукций:

$$\Phi_{\text{Э.М}} = B_{\text{Э.М}} \cdot S_{\text{Э.М}}; \Phi_{\text{М.Э}} = B_{\text{М.Э}} \cdot S_{\text{М.Э}},$$

а МДС  $F_{\text{Э.М}}$  и  $F_{\text{М.Э}}$  – через напряженность магнитного поля соответственно в сердечнике электромагнита и в «материале» эквивалентного ему по магнитным свойствам постоянного магнита:

$$F_{\text{Э.М}} = I_{\text{О.В}} \cdot w_{\text{О.В}} - H_{\text{Э.М}} \cdot h_{\text{Э.М}};$$

$$F_{\text{М.Э}} = H_{\text{М.Э}} \cdot h_{\text{М.Э}},$$

получим:

$$B_{\text{М.Э}} = K_{\text{В}} \cdot B_{\text{Э.М}}; \quad (6)$$

$$H_{\text{М.Э}} = H_{\text{С.М.Э}} - \frac{H_{\text{Э.М}}}{h_{\text{М.Э}}^*}, \quad (7)$$

где  $B_{\text{М.Э}}$ ,  $H_{\text{М.Э}}$  – магнитная индукция и напряженность магнитного поля в нейтральном сечении эквивалентного постоянного магнита;  $H_{\text{Э.М}}$  – напряженность магнитного поля в сердечнике электромагнита;  $h_{\text{М.Э}}^*$  – относительная высота эквивалентного магнита (относительное значение средней силовой линии в нем),  $h_{\text{М.Э}}^* = \frac{h_{\text{М.Э}}}{h_{\text{Э.М}}}$ ;  $h_{\text{М.Э}}$  – средняя длина силовой линии магнитного поля в эквивалентном магните;  $H_{\text{С.М.Э}}$  – условная коэрцитивная сила эквивалентного магнита,  $H_{\text{С.М.Э}} = \frac{I_{\text{О.В}} \cdot w_{\text{О.В}}}{h_{\text{М.Э}}}$ ;  $I_{\text{О.В}}$ ,  $w_{\text{О.В}}$  – МДС обмотки возбуждения;  $K_{\text{В}}$  – коэффициент приведения магнитной индукции в сердечнике электромагнита к значению индукции в нейтральном сечении эквивалентного магнита  $K_{\text{В}} = \frac{S_{\text{Э.М}}}{S_{\text{М.Э}}}$ ;  $S_{\text{Э.М}}$  – площадь сечения сердечника электромагнита (втулки);  $S_{\text{М.Э}}$  – площадь сечения нейтрального сечения эквивалентного магнита.

Для получения однозначного соответствия между параметрами электромагнитов и эквивалентных им по магнитным свойствам постоянных магнитов значения коэффициента приведения по индукции  $K_{\text{В}}$  и относительной длины  $h_{\text{М.Э}}^*$  следует определять, предполагая, что постоянные магниты располагаются в тех же областях индуктора, что и электромагниты, и имеют, одинаковые с последним размеры. При таких условиях под эквивалентными магнитами когтеобразных индукторов (именно о них пойдет речь в дальнейшем) следует подраз-

умевать постоянные магниты цилиндрической формы с осевой длиной, равной осевой длине катушки возбуждения и наружным диаметром  $D_{\text{М.Э.Н}}$ , равным наружному диаметру обмотки возбуждения (рис. 2) и внутренними диаметрами  $D_{\text{М.Э.В}}$ ,  $D_{\text{М.Э.Н}} = D_{\text{О.В.Н}}$ , значения которых могут быть любыми, не выходящими за пределы  $D_{\text{В}} > D_{\text{М.Э}} < D_{\text{О.В.В}}$ .

С точки зрения проектирования генераторов наибольший интерес представляют эквивалентные магниты с внутренними диаметрами, равными диаметру вала  $D_{\text{В}}$  и внутреннему диаметру обмотки возбуждения  $D_{\text{О.В.В}}$  (наружному диаметру втулки – сердечника электромагнита).

Представляют интерес также магниты, имеющие форму и размеры втулки электромагнита. Применительно к ним  $h_{\text{М.Э}}^* = 1$ ,  $K_{\text{В}} = 1$  и согласно (6)  $B_{\text{М.Э}} = B_{\text{Э.М}}$ . Последний вариант выполнения эквивалентного магнита примечателен тем, что в случае реализации для достижения тех же магнитных свойств, что и у электромагнита, постоянный магнит по сравнению с магнитами с большими внутренними диаметрами имеет более высокие значения магнитной индукции  $B_{\text{М.Э}}$ , включая остаточную его индукцию  $Br_{\text{М.Э}}$ .  $Br_{\text{М.Э}} = Br_{\text{Э.М}}$ .

При внутреннем диаметре магнита, равном диаметру вала

$$h_{\text{М.Э}} = h_{\text{Э.М}}, K_{\text{В}} = \frac{D_{\text{О.В.В}} - D_{\text{В}}}{D_{\text{О.В.Н}} - D_{\text{О.В.В}}}, h_{\text{М.Э}}^* = h_{\text{Э.М}}^* = 1.$$

Решив (6) и (7) совместно с уравнением кривой намагничивания  $B_{\text{Э.М}}(H_{\text{Э.М}})$  стали сердечника электромагнита (втулки), получим урав-

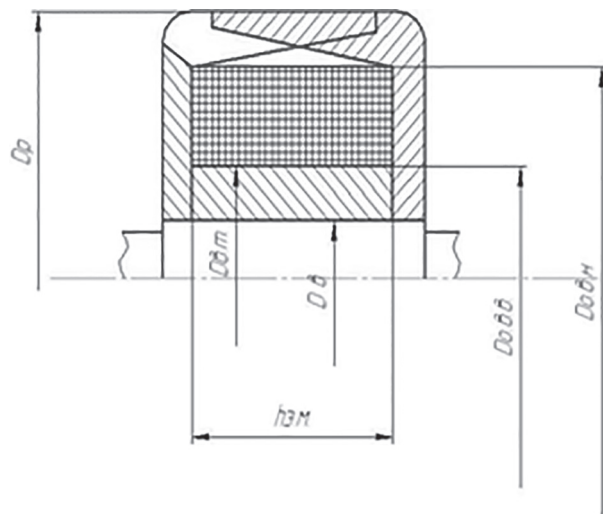


Рис. 2. Эскиз индуктора автомобильного генератора с когтеобразным индуктором

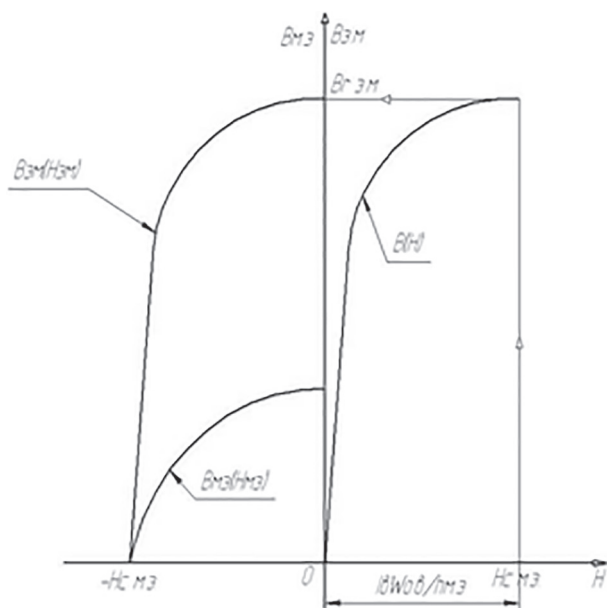


Рис. 3. Построение характеристики магнита эквивалентного электромагниту

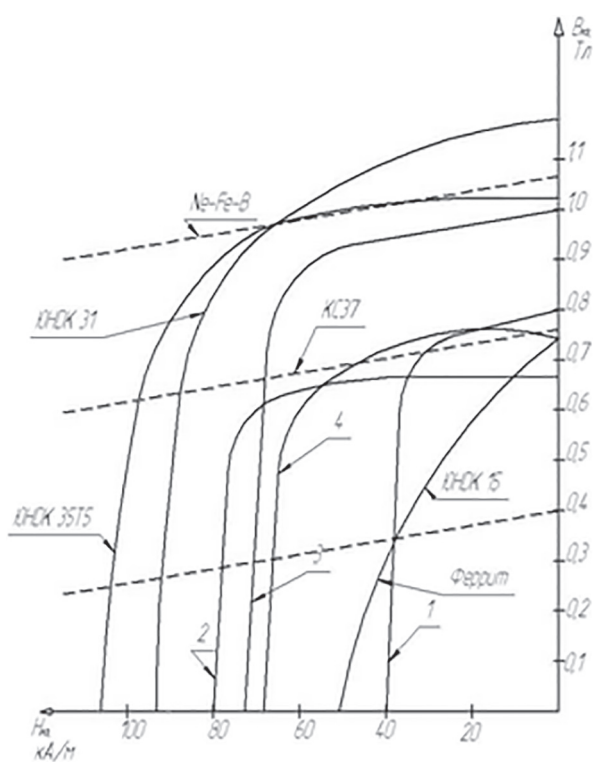


Рис. 4. Кривые сплавов постоянных магнитов и эквивалентных магнитов автомобильных генераторов: 1 – Г-502; 2 – 37.3701; 3 – 94.3701; 4 – 65.3701

нение кривой  $B_{м.э}(H_{м.э})$ , которая определяет магнитные свойства электромагнита в той же степени, в которой уравнения кривых намагничивания магнитотвердых материалов определяют магнитные свойства изготовленных из них постоянных магнитов.

Это обстоятельство позволяет рассматривать кривые  $B_{м.э} = B_{м.э}(H_{м.э})$  как кривые размагничивания материалов постоянных магнитов, эквивалентных по своим магнитным свойствам тем конкретным электромагнитам, применительно к которым каждая из этих кривых получена. Для получения графического изображения кривой размагничивания эквивалентного магнита достаточно переместить кривую намагничивания стали сердечника  $B_{м.э}(H_{м.э})$  рисунка 3 из первого квадранта во второй квадрант на расстояние, равное  $H_{с.э}$ , и изменить масштаб по оси индукции в  $K_b$  раз.

На рисунке 4 в качестве примера показаны кривые размагничивания постоянных магнитов, эквивалентных электромагнитам автомобильных генераторов Г-502 (кривая 1), 37.3701 (кривая 2), 94.3701 (кривая 3), 65.3701 (кривая 4) при изготовлении втулки из стали 10 и внутреннем диаметре эквивалентного магнита, равном  $D_b$ . Все кривые получены при максимальных значениях тока в обмотках возбуждения генераторов, а поэтому характеризуют предельные магнитные свойства соответствующих эквивалентных магнитов. Исходные данные для определения координат базовых точек кривых размагничивания и результаты их расчетов приведены в таблице 1.

Сопоставляя кривые 1, 2, 3, 4 с аналогичными кривыми сплавов постоянных магнитов, можно сделать вывод, что магнитные свойства магнитов, эквивалентных электромагнитам автомобильных генераторов, находятся на уровне магнитных свойств сплавов с направленной кристаллизацией типа ЮНДК. Наиболее энергоемким является материал эквивалентного магнита в генераторе 94.3701. Максимальное значение удельной магнитной энергии этого «материала», оцениваемое произведением  $B_{э.м}(H_{э.м})_{max}$ , равно  $58 \text{ кДж/м}^3$ . Ближайшие к нему по магнитным свойствам сплавы ЮН13ДК23 и ЮНДК 31ТЗБФ имеют  $B(H)_{max}$  от 56 до  $64 \text{ кДж/м}^3$ , а один из лучших из этой классификационной группы сплавов постоянных магнитов ЮНДК 35Т5БА имеет  $B_{э.м}(H_{э.м})_{max} = 72 \text{ кДж/м}^3$ .

Принципиальное отличие эквивалентных постоянных магнитов, являющихся по сути расчетными образцами электромагнитов, от их физических аналогов состоит в том, что они полностью восстанавливают свои магнитные свойства после снятия любого по силе размагничивающего воздействия на них со стороны внешней магнитной цепи [4].

Таблица 1

Технические характеристики	ГГ502	37.3701	94.3701	65.3701
Диаметр расточки, мм	74,0	88,6	95,5	112,0
Активная длина якоря, мм	220	25	27	35
Максимальное значение тока возбуждения, А	10,94	5,40	5,40	3,46
Число витков в обмотке возбуждения	680	420	400	830
Диаметр голого провода, мм	10,56	0,80	0,80	0,71
$(I_{o.в} w_{o.в})_{max}$ , А	1320	2270	2160	2870
Напряжение, В	14	14	14	28
Диаметр вала, мм	17	20	20	30
Диаметр втулки, мм	38	43	49	58
Наружный диаметр обмотки возбуждения, мм	56,0	69,5	66,5	87,0
Длина втулки, мм	33,0	28,0	29,0	41,5
Площадь сечения электромагнита, $S_{э.м}$ , см <sup>2</sup>	90,07	11,37	15,70	19,33
Площадь вала, $S_{в}$ , см <sup>2</sup>	20,260	3,140	3,140	7,065
Площадь эквивалентного магнита, $S_{м.э}$ , см <sup>2</sup>	22,35	34,77	31,57	52,33
Условная коэзитивная сила, кА/м	40,0	81,1	74,0	70,0
Условная остаточная индукция в сердечнике, $Br_{э.м}$	20,07	2,06	2,05	2,04
Коэффициент приведения, $K_{в} = S_{э.м}/S_{м.э}$	0,41	0,33	0,50	0,37
Остаточная индукция эквивалентного магнита	0,820	0,680	1,025	0,760
$(B_{м.э} H_{м.э})_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	22,4	42,0	58,5	39,7

При этом магнитная индукция и напряженность магнитного поля в материале эквивалентных магнитов как при их размагничивании, так и при восстановлении ими магнитных свойств происходит в соответствии с одной и той же кривой  $B_{м.э} = B_{м.э}(H_{м.э})$ .

Отсутствие в семействе магнитных характеристик эквивалентных магнитов частных циклов перемагничивания в виде петель или заменяющих их при расчетах прямых магнитного возврата существенно упрощает их расчет и расчеты сопряженных с ними магнитных цепей по сравнению с аналогичными расчетами, выполняемыми применительно к постоянным магнитам и магнитным цепям магнитоэлектрических генераторов. Это проявляется, в частности, в том, что в ходе выполнения расчетов магнитные характеристики эквивалентных магнитов присутствуют в виде двух уравнений:

$$\Phi_{м.э} = \Phi_{м.э}(F_{м.э}), \Phi_{см.э} = F_{м.э} \cdot \Delta_{см.э},$$

а магнитные характеристики их физических аналогов – в виде трех уравнений.

Помимо этого, при расчетах эквивалентных магнитов по той же причине отпадает необходимость в достаточно объемных и в значительной степени приближенных вычислениях, связанных с определением положения рабочих точек на кривой  $B_{м.э} = B_{м.э}(H_{м.э})$  или на производной от нее кривой  $\Phi_{м.э} = \Phi_{м.э}(F_{м.э})$ , соответствующих режимам наибольшего размагничивания элементов системы возбуждения (режимам размагничивания в свободном состоянии, при ударном коротком замыкании и др.).

Для сравнительной оценки магнитных свойств индукторов генераторов с электромагнитным возбуждением необходимо определить в начале координаты  $Br_{м.э}$  и  $H_{см.э}$  базовых точек предельной кривой размагничивания постоянных магнитов, эквивалентных по магнитным свойствам каждому из сопоставляемых магнитов. За расчетное значение тока в обмотке

возбуждения следует принять при этом максимальное его значение  $-I_{o.в \max}$ . После этого в координатах  $(B_{м.э}; H_{м.э})$  строятся кривые размагничивания эквивалентных магнитов (кривые 1, 2, 3, 4 на рис. 4). Для их построения может быть использован изложенный выше графический метод, предусматривающий получение этих кривых путем перемещения в четвертый квадрант из первого квадранта (см. рис. 3) кривой намагничивания стали сердечника электромагнита (втулки индуктора).

Уровень магнитных свойств постоянных магнитов при работе их на кривой размагничивания и магнитных свойств, выполненных на их основе индукторов, оценивается по максимальному значению произведения координат точек кривых размагничивания сплавов постоянных магнитов  $(B_{м} H_{м \max})$ . Такой подход правомерен и к оценке магнитных свойств электромагнитов и построенных из них индукторов с той лишь разницей, что произведение  $(B H)_{\max}$  необходимо определять в этом случае по кривой размагничивания  $B_{м.э}(H_{м.э})$  условного (эквивалентного магнита). В таблице 1 приведены значения  $(B_{м.э} H_{м.э})_{\max}$  для четырех типоразмеров автомобильных генераторов. Сопоставляя их, можно заключить, что с точки зрения использования объема индуктора, занятого электромагнитом, наиболее удачно спроектирован индуктор автомобильного генератора 94.3701.

Неудачно спроектированным выглядит на общем фоне индуктор Г-502.

Значение  $(B_{м.э} H_{м.э})_{\max}$  для него в 2,6 раза меньше, чем для генератора 94.3701.

Значения параметров эквивалентных постоянных магнитов в таблице 1 приведены для случая посадки их на вал.

В табл. 2 приведены дополнительные данные, относящиеся к магнитам с внутренним диаметром, равным диаметру втулки. Данные табл. 1 и 2 свидетельствуют о том, что уровень магнитных свойств эквивалентных постоянных магнитов, а следовательно и их

физических аналогов, способных в деталях повторить характеристику  $B_{э.м}(F_{э.м})$  электромагнитов, существенно зависит от их внутреннего диаметра. Наиболее просто эта характеристика реализуется при внутреннем диаметре магнитов, равном диаметру вала. При увеличении внутреннего диаметра магнитов (уменьшения площади их поперечного сечения) реализация той же характеристики возможна лишь при применении магнитов с более высокими магнитными свойствами (с большей магнитной энергией).

Предельные внутренние диаметры постоянных магнитов, при которых еще возможна эквивалентная с точки зрения магнитных свойств замена электромагнитов в индукторах генераторов постоянными магнитами, ограничены предельными параметрами кривых размагничивания сплавов постоянных магнитов. Так, например, для сплавов ЮНДК верхний предел остаточной индукции не превышает 1,1 Тл. Поэтому из четырех рассматриваемых типоразмеров автомобильных генераторов заменить электромагнит генератора 94.3701 [5] постоянным магнитом с идентичными магнитными характеристиками при внутреннем диаметре магнита, равном диаметру втулки, не представляется возможным, т.к. сплавов с остаточной индукцией 2,0 Тл не существует.

Приведенные в табл. 1 значения остаточной индукции  $Br_{м.э}$  магнитов, эквивалентных по магнитным свойствам электромагнитам генераторов Г 502, 37.3701 и 65.3701, могут быть обеспечены не только за счет применения сплавов ЮНДК. Не меньший уровень ее может быть достигнут заменой обмотки возбуждения сплавами постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов (самария, неодима и других) [1, 2]. Эти сплавы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы  $H_c$  и практически линейной зависимостью  $B_m$  от  $H_m$ . Коэрцитивная сила самарий – кобальтового сплава КС-37, например, в 4 раза больше коэрцитивной силы сплава ЮНДК 35Т5 (см. рис. 4)

Таблица 2

Технические характеристики	ГГ 502	37.3701	94.3701	65.3701
$S_{м.э}$	13,30	23,40	15,86	33,00
$K_B = S_{э.м} / S_{м.э}$	0,68	0,49	0,99	0,59
$Br_{м.э}$	10,4	1,0	2,0	1,2

и более чем в 12 раз превышает условную коэрцитивную силу эквивалентного постоянного магнита генератора Г-502. Еще большую коэрцитивную силу имеют сплавы Ne-Fe-B, одним из основных компонентов которых является неодим. Для выпускаемых отечественной промышленностью сплавов Ne-Fe-B она достигает 750 кА/м и более.

Достоинством Ne-Fe-B является и достаточно высокие значения остаточной индукции. У сплавов, изготавливаемых для применения в электротехнических изделиях, в том числе и в электрических машинах, значения  $B_r$  равны 1–1,05 Тл, а у лучших образцов этих сплавов они достигают 1,2 Тл. Для сравнения отметим, что у самарий-кобальтового сплава КС-37  $B_r = 0,77$  Тл, а у серийно выпускаемого феррит-стронциевого сплава  $B_r$  около 0,4 Тл.

Что касается широко используемых в автотракторном электрооборудовании постоянных магнитов-ферритов, изготавливаемых методом порошковой металлургии из смеси измельченных окислов железа ( $Fe_2O_3$ ) и стронция (SrO), то они вследствие относительно низкого уровня магнитной энергии ( $(BH)_{max}$  кДж/м<sup>3</sup>) и низких значений остаточной индукции не в состоянии обеспечить такой же уровень магнитных свойств индукторов, которым обладают индукторы генераторов с электромагнитным возбуждением, а следовательно, их применение в автотракторных генераторах следует считать нецелесообразным.

Более конкретные данные относительно целесообразности применения постоянных магнитов в автотракторных генераторах можно получить в результате совместного рассмотрения магнитных характеристик их индукторов с характеристиками внешними к ним индукторам и магнитной цепи.

### Литература

1. Грузков С.А., Останин С.Ю., Сугробов А.М., Сульдин А.В., Тыричев П.А. Магнитные мате-

риалы, монтажные и бортовые провода [Текст]. Москва: Издательство МЭИ. 2005. 248 с.

2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами [Текст]. Москва: Энергоатомиздат. 1977. 356 с.
3. Чернов А.Е. Разработка систем электроснабжения транспортных средств с улучшенными энергетическими и экологическими показателями: дис. ... канд. техн. наук. Москва: МЭИ ТУ. 1994. 185 с.
4. Чернов А.Е., Акимов А.В., Кротов А.Н. Многофункциональный регулятора напряжения для генераторных установок нового поколения // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 2(10). С. 88–91.
5. Чернов А.М., Сугробов А.М. Основные особенности современных гибридных автомобилей // Грузовик. 2011. № 4. С. 8–11.

### References

1. Gruzkov S.A., Ostanin S.Yu., Sugrobov A.M., Sul'din A.V., Tyrichev P.A. Magnitnye materialy, montazhnye i bortovye provoda [Magnetic materials, installation and on-board wires]. Moscow: Izdatel'stvo MEI Publ. 2005. 248 p.
2. Balagurov V.A., Galteev F.F. Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami [Electric generators with per-manent magnets]. Moscow: Energoatomizdat Publ. 1977. 356 p.
3. Chernov A. E. Razrabotka sistem elektrosnabzheniya transportnykh sredstv s uluchshennymi energeticheskimi i ekologicheskimi pokazatelyami: dis. ... kand. tekhn. nauk. [Development of electrical systems of vehicles with improved energy and environmental performance: Ph.D. dissertation]. Moscow: MEI TU. 1994. 185 p.
4. Chernov A.E., Akimov A.V., Krotov A.V. Multifunctional voltage regulator for generator of new generation. Izvestiya MGTU «МАМИ». 2010. No 2(10), pp. 88–91.
5. Chernov A.E., Sugrobov A.M. The main features of the modern hybrid automobiles. Gruzovik. 2011. No 4, pp. 8–11.