

В.В. Шевченко, В.П. Шайда, Е.С. Зубань

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ АВИАЦИИ

*В работе выполнен сравнительный анализ различных сталей, применяемых для изготовления магнитопроводов электродвигателей авиационных агрегатов. Предложены рекомендации по выбору марки сталей для сердечников, которые разработаны на основании испытаний, проведенных на созданном экспериментальном стенде.*

**Ключевые слова:** авиационный двигатель; массогабаритные показатели; надежность; технология изготовления; железо-кобальтовая сталь; железо-никелевая сталь; магнитная проницаемость; индукция насыщения; магнитные потери.

### Введение

**Постановка проблемы.** Требования, предъявляемые к авиационным электрическим машинам (ЭМ), более обширны и строже, чем те, которые предъявляются к общепромышленным. Основными требованиями, которые предъявляются к этим машинам, являются: надежность, минимальные габариты и масса, высокая прочность, стабильность параметров при изменении внешних факторов (широкий диапазон изменения рабочей температуры и т.п.) [1].

Современные направления совершенствования авиационных двигателей заключаются в повышении их надежности и габаритной мощности.

Из двух направлений особенно важным и актуальным является повышение надежности двигателей. И это понятно, т.к. отказ двигателей в авиации влияет на безопасность полета и от надежности их работы зависит жизнь людей. Поэтому к обычным требованиям добавляются особые требования, которые предъявляются как к выбору электромагнитных нагрузок, так и материалам, и при этом нужно учитывать технологию изготовления.

При проектировании любых ЭМ необходимо учитывать возможность их изготовления в соответствии с технологическими возможностями производства. Ведь не каждое техническое решение (новые марки сталей и изоляционных материалов) возможно реализовать на существующем производстве, что объясняется необходимостью наличия современного оборудования, технологий и просто денежных средств. Особенно это касается авиационных двигателей [1–4].

Известно, что требование ограничения габаритов и массы авиационных двигателей привело к тому, что рабочая частота питающего их напряжения

равна 400 Гц. Соответственно это приводит к росту магнитных потерь в сердечниках магнитопровода, по сравнению с двигателем общепромышленного назначения. Поэтому для сердечников применяется электротехническая сталь меньшей толщины, чем в обычных двигателях. Однако существующие марки электротехнических сталей не всегда соответствуют необходимому уровню потерь и специальным требованиям, которые рассмотрены выше.

Одним из путей реализации направлений развития ЭМ является применение сталей с лучшими магнитными свойствами. Поэтому были разработаны и уже применяются на электромашиностроительных предприятиях железо-кобальтовые (Fe-Co) и железо-никелевые (Fe-Ni) стали [1; 2]. Ситуация сложилась таким образом, что практика опережает теорию, в результате нет четких критериев выбора стали, а имеющиеся методики расчета основаны на применении существующих марок электротехнической стали. Для корректировки методик расчета авиационных двигателей используют результаты испытаний опытных образцов, путем ввода поправочных коэффициентов и используя эмпирические зависимости. Расширение номенклатуры и сферы применения таких двигателей привело к необходимости научного обоснования выбора типа стали для сердечника магнитопровода и совершенствования методики проектирования с учетом предъявляемых «строгих» требований и особых условий эксплуатации (большая высота, более низкие температуры эксплуатации).

С учетом изложенного выше исследование вопроса обоснования выбора материалов для изготовления магнитопроводов авиационных двигателей и выработка рекомендаций по их применению для проектировщиков этих машин является актуальным.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является выработка рекомендаций по выбору стали для магнитопроводов авиационных двигателей, с учетом требования обеспечения и максимального сохранения магнитных свойств магнитопроводов при особых условиях эксплуатации. Также необходимо учитывать энергетические (КПД, надежность, устойчивость в переходных режимах) и технологические требования, экономическую целесообразность изготовления двигателей при мелкосерийном производстве.

Для выполнения поставленной цели следует провести сравнительный анализ магнитных характеристик различных марок сталей с учетом диапазона изменения их параметров в условиях эксплуатации на летательных аппаратах. Для аргументированного анализа магнитные характеристики сталей будут получены экспериментально. Также необходимо проанализировать те технологические процессы, которые сопровождают процесс получения листов сердечника, т.к. они влияют на магнитные свойства сталей [5].

### Характеристика сталей, применяемых для магнитопроводов

В настоящее время магнитопроводы (сердечники) ЭМ выполняют шихтованными из тонколистовой электротехнической стали. Для сердечников применяют тонколистовую холоднокатаную изотропную электротехническую сталь [6]. Но она теряет механическую надежность при низких температурах эксплуатации, которая характерна для особых условий эксплуатации.

Кроме электротехнической стали для магнитных систем авиационных двигателей применяют магнитомягкие нелегированные и легированные двойные сплавы с высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой. А именно железо-кобальтовые (Fe-Co) и железо-никелевые (Fe-Ni) стали. Таким образом, рассматривались три типа сталей. Свойства магнитных параметров сталей оцениваются по кривой намагничивания (петля гистерезиса), которая показана на рис. 1 и рядом параметров (точек на этой кривой). К этим параметрам относятся (см. рис. 1) [7]:

$B_R$  – остаточная магнитная индукция, Тл;

$H_S$  – напряженность магнитного поля, соответствующая техническому насыщению, А/м;

$B_S$  – магнитная индукция насыщения, Тл;

$H_C$ , А/м и  $B_C$ , Тл – соответственно напряженность и индукция магнитного поля, соответствующие коэрцитивной силе материала;

$H$  – напряженность магнитного поля, соответствующая заданному значению  $B_H$ , А/м;

$B_H$  – значение магнитной индукции, соответствующей напряженности приложенного магнитного поля, Тл;

$\mu_0$ , – текущая величина абсолютной магнитной проницаемости, измеренная при заданном значении напряженности приложенного магнитного поля, мГн/м.

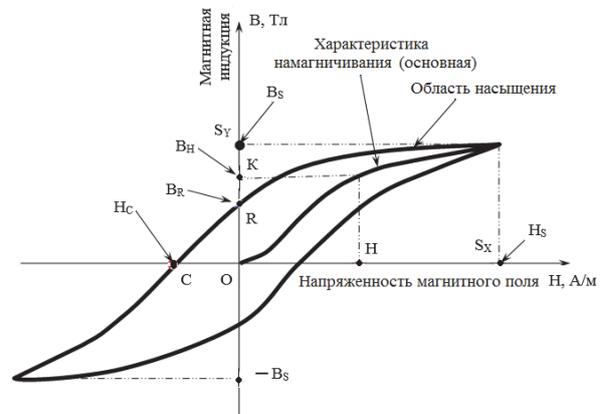


Рис. 1. Кривая намагничивания («петля гистерезиса») тонколистовой стали

Ниже приведены характеристики каждого вида сталей, участвующих в сравнении.

Электротехническая сталь обладает достаточно хорошими магнитными характеристиками: высокой индукцией насыщения, малой коэрцитивной силой и небольшими магнитными потерями. Толщина листов стали, из которой собирают шихтованные сердечники, меняется в диапазоне от 0,15 до 0,5 мм и зависит от частоты питающего напряжения. Электротехническая сталь – сплав железа с кремнием, содержание которого обычно составляет от 0,8 до 4,8 %, в зависимости от марки стали. Добавка кремния увеличивает магнитную проницаемость и электрическое сопротивление стали, понижает коэрцитивную силу, уменьшая тем самым потери на перемагничивание и на вихревые токи [7]. Более высокие концентрации кремния не применяют, так как, уменьшая потери и увеличивая магнитную проницаемость, кремний одновременно уменьшает индукцию насыщения и технологическую пластичность стали, т.е. она становится твердой и хрупкой [7].

Для оценки характеристик электротехнических сталей в сопоставлении с другими магнитными материалами приведем ее параметры:  $H_C$  – от 10 до 65 А/м;  $B_S$  – от 1,95 до 2,02 Тл; максимальная магнитная проницаемость от 3000 до 8000 [7].

Железо-кобальтовая сталь, содержит (30-51) % Со и (1,5-2) % V, (пример – сплав К49Ф2), [7]. Эти сплавы имеют наибольшую индукцию насыщения (до 2,43 Тл), а после отжига (в магнитном поле) имеют сниженные потери на перемагничивание.

Как известно, применение материалов с большим значением индукции насыщения позволяет значительно снизить размеры и массу двигателей. В работе [1] приведена информация о применении сплавов 27ХК и 49К2ФА для сердечников магнитопроводов авиационных ЭМ, со средним уровнем индукции в магнитопроводе 2,2 Тл при приемлемом уровне удельных потерь и меньшими габаритами. Основное достоинство этих сталей – сохранение магнитных свойств при высоких температурах.

Однако в той же работе [1] указано, что эти сплавы чувствительны к механическим воздействиям (удары, сжатие и пр.). Естественно это вызывает дополнительные трудности, т.к. для восстановления магнитных свойств листы перед сборкой должны пройти терромагнитную обработку. Желательно также отказаться от штамповки и перейти на лазерную нарезку. Кроме того, из рассматриваемых материалов эти сплавы имеют самую высокую стоимость.

Fe-Ni стали (пермаллои), применяемые для сердечников авиационных ЭМ, содержат (35–90) % Ni [7]. Эти сплавы характеризуются высокими магнитными характеристиками: у них высокая магнитная проницаемость и на порядок большее удельное электрическое сопротивление, чем у электротехнической стали. Поэтому они особо эффективны при работе в переменных магнитных полях с большой частотой перемагничивания, что характерно для авиационных двигателей. В [7] приведены магнитные параметры Fe-Ni сталей:  $H_c$  – до 6 А/м;  $B_s$  – до 1,55 Тл; максимальная магнитная проницаемость – от 50000 до 60000. Примером может служить сплав типа 50Н. Лучшие магнитные свойства пермаллои приобретают после определенной термической обработки и быстрого охлаждения на воздухе [8]. В процессе сборки и эксплуатации сердечников из пермаллоя не допустимы механические напряжения (удары, рихтование, сдавливание обмоткой и другие) из-за ухудшения магнитных характеристик.

### Методика проведения исследований

Методика проведения измерений магнитных параметров электротехнических сталей и сплавов в магнитных полях определена ГОСТ 8.377 и ГОСТ 12119.4 [9; 10]. Однако в нормативно-технической документации указаны не все характеристики, необходимые для проведения анализа и сравнения. Кроме того, испытания для сталей проводятся в статическом режиме. Нами была разработана программа испытаний сталей в переходных процессах – для разных значений частот. Схема экспериментальной установки для намагничивания и испытания сталей приведена на рис. 2.

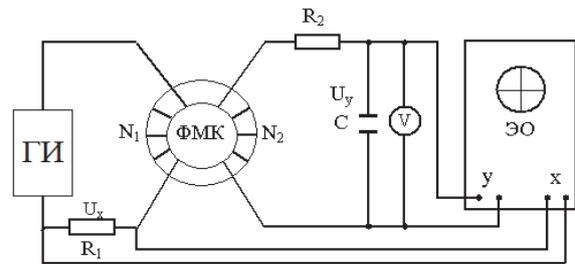


Рис. 2. Схема испытательного стенда

На рис. 2 приняты обозначения:

ГИ – генератор импульсов SIGLENT SDG1020. Применение генератора импульсов дало возможность испытывать стали при разных частотах намагничивающего тока;

ФМК – ферромагнитное кольцо с первичной  $N_1$  и вторичной  $N_2$  обмотками, где  $N_1$  и  $N_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток;

$R_1$  – резистор, который выбирается по зависимости (1) для создания необходимой напряженности магнитного поля:

$$U_x = i_1 \cdot R_1 = \frac{R_1 \cdot l}{N_1} \cdot H, \quad (1)$$

где  $l$  – длина соленоида по средней линии, м.

$R_2$  – резистор, который подбирается согласно (2), Ом. Он необходим для создания интегрирующей цепочки, которая позволяет получить необходимую индукцию в образце, Тл:

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot R_2 \cdot C}{S \cdot N_2} \cdot U = \beta \cdot U, \quad (2)$$

где обозначено  $\beta = \frac{\sqrt{2} \cdot R_2 \cdot C}{S \cdot N_2}$  – постоянная величина

для данной установки;

$C$  – конденсатор, подбирается по (2), мФ. Он необходим для создания интегрирующей цепочки, которая позволяет получить необходимое поле (индукцию) в образце;

$V$  – вольтметр переменного напряжения, диапазоном от 0 до 1 В;

ЭО – двухлучевой электронный осциллограф (в нашей схеме Hantek DSO8060).

Циклическое перемагничивание образца осуществлялось магнитным полем, создаваемым переменным током  $I_1$  в первичной обмотке ФМК. Напряженность магнитного поля, в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа, применительно к ФМК, определяется выражением, А/м:

$$H = \frac{I_1 \cdot N_1}{l}. \quad (3)$$

С учетом (3) и падения напряжения на  $R_1$ , напряжение  $U_x$ , подаваемое на вход «x» осциллографа, определяется соотношением (1), т.е.  $U_x$ , пропорционально  $H$ .

Магнитный поток  $\Phi$  через вторичную обмотку с числом витков  $N_2$ , Вб:

$$\Phi = B \cdot S \cdot N_2, \tag{4}$$

где  $S$  – сечение сердечника.

При изменении магнитного потока  $\Phi$ , по закону Фарадея-Ленца, во вторичной обмотке ФМК наводится ЭДС:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \cdot N_2 \cdot \frac{dB}{dt}. \tag{5}$$

Ток во вторичной обмотке равен, А:

$$i_2 = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R_2} = -\frac{S \cdot N_2}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}. \tag{6}$$

Из (6), после интегрирования, получим:

$$q = \frac{S \cdot N_2}{R_2} \cdot B. \tag{7}$$

Напряжение между пластинами конденсатора, подключенного ко входу осциллографа «у», В:

$$U_y = \frac{q}{C} = \frac{S \cdot N_2}{R_2 \cdot C} \cdot B, \tag{8}$$

т. е.  $U_y$  пропорционально индукции  $B$ .

Так как движение световой точки на экране подчиняется зависимости  $U_y=f(U_x)$ , то, в соответствии с (1) и (8), она будет вычерчивать график  $B=f(H)$ , т.е. петлю гистерезиса. С помощью генератора импульсов можно изменять амплитудное значение тока и, следовательно, на экране осциллографа получать петли гистерезиса, соответствующие различным значениям  $H$  в одинаковом масштабе. На рис. 3 приведен процесс формирования основной кривой намагничивания испытуемой стали при определенной частоте и переменном значении напряженности магнитного поля. Испытания проводились для различных марок сталей с целью получения и сравнения магнитной индукции технического насыщения при различной частоте переменного напряжения (50 и 400 Гц). Характерно, что вершины всех «петель» ( $x_1y_1$ ;  $x_2y_2$ ;  $x_3y_3$ ) лежат на кривой начального намагничивания, а магнитное насыщение соответствует линейному участку наибольшей петли ( $x_3-x_{max}$ ;  $U_3-U_{max}$ ).

С учетом того, что амперметром измеряется действующее значение тока  $I$  и (3), значение напряженности может быть рассчитано, А/м:

$$H = \frac{\sqrt{2} \cdot i \cdot N_1}{l} = \alpha \cdot i, \tag{9}$$

где  $\alpha = \frac{\sqrt{2} \cdot N_1}{l}$  – величина, постоянная для данной установки, указывается на ней.

Индукция магнитного поля определяется по (2) с учетом связи между действующим  $U$  и амплитудным значением напряжения.

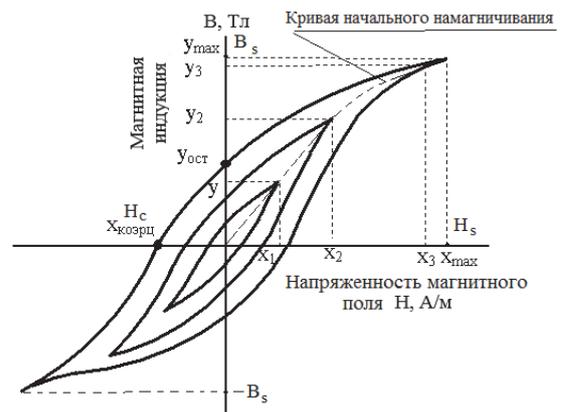


Рис. 3. Получение характеристики намагничивания стали на экспериментальном стенде (три момента времени)

### Подготовка опытных образцов

Опытные образцы сталей были изготовлены и испытаны на стенде Харьковского агрегатного конструкторского бюро, эскиз опытного образца показан на рис. 4. Для всех образцов сталей (электротехническая 2411; Fe-Co сталь 49К2ФА; Fe-Ni сталь 79НМ) был проведен вакуумный отжиг. Эти образцы были названы «образец-свидетель» (именно такой термин используется на предприятии). Из листов «образца-свидетеля» набирается шихтованный пакет, спрессовывается, взвешивается и укладывается в контейнер.

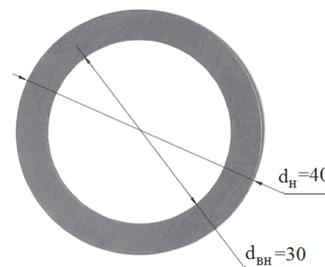


Рис. 4. Лист стали «образца-свидетеля»

Параметры образцов-свидетелей, необходимые для расчетов, представлены в табл. 1. Количество витков обмотки  $N_2$  разное для получения одинакового уровня сигнала. Оценка технических и технологических характеристик трех типов сталей привела к тому, что дальнейшее сравнение велось только для базовой электротехнической (2411) и Fe-Co сталей. Fe-Ni стали из рассмотрения были сняты, т.к. они имели низкое значение индукции насыщения.

Таблица 1

Основные параметры «образцов-свидетелей»

Тип образца	$N_1$	$N_2$	м, г	g, г/см <sup>3</sup>	$S, \text{мм}^2$
2411	80	300	16,1	7,6	19,27
49К2ФА	80	270	16,4	8,15	18,3
79НМ	80	600	18	8,6	19

## Результаты испытаний

Результаты испытаний экспериментальных сталей при разных частотах тока представлены в табл. 2. На рис. 5 представлены основные характеристики намагничивания сталей 49К2ФА и 2411 при

частотах 50 и 400 Гц.

На рис. 6 представлены рабочие характеристики двух аналогичных двигателей с сердечниками из электротехнической (2411) и железо-кобальтовой стали (49К2ФА).

Таблица 2

Результаты испытаний экспериментальных сталей при разных частотах тока

50 Гц						400 Гц					
49К2ФА			2411			49К2ФА			2411		
H, А/м	B, Тл	$\mu\mu_0$ , мГн/м	H, А/м	B, Тл	$\mu\mu_0$ , мГн/м	H, А/м	B, Тл	$\mu\mu_0$ , мГн/м	H, А/м	B, Тл	$\mu\mu_0$ , мГн/м
50,00	0,35	7,08	50,00	0,18	3,70	50,0	0,17	3,32	50,00	0,16	3,17
55,00	0,64	11,47	100,0	0,43	4,28	100,0	0,69	6,92	100,0	0,41	4,14
60,00	0,75	12,54	200,0	0,70	3,50	150,0	1,34	8,93	200,0	0,72	3,62
70,00	1,01	14,16	500,0	1,06	2,11	200,0	1,62	8,08	300,0	0,91	3,04
100,0	1,27	12,66	600,0	1,10	1,83	250,0	1,73	6,90	500,0	1,10	2,20
150,0	1,47	9,81	700,0	1,14	1,63	300,0	1,79	5,98	600,0	1,17	1,94
200,0	1,62	8,16	800,0	1,18	1,48	350,0	1,88	5,38	700,0	1,22	1,74
250,0	1,68	6,73	1000	1,26	1,26	400,0	1,93	4,81	1000	1,30	1,30
350,0	1,84	5,26	1400	1,33	0,95	500,0	1,99	3,98	1400	1,40	1,00
400,0	1,90	4,75	2400	1,47	0,61	600,0	2,08	3,47	2000	1,45	0,72
600,0	2,01	3,36	3200	1,54	0,48	700,0	2,12	3,04	2500	1,51	0,60
930,0	2,17	2,35	3600	1,56	0,43	960,0	2,19	2,28	3200	1,57	0,49
									3600	1,56	0,43
									5000	1,68	0,34

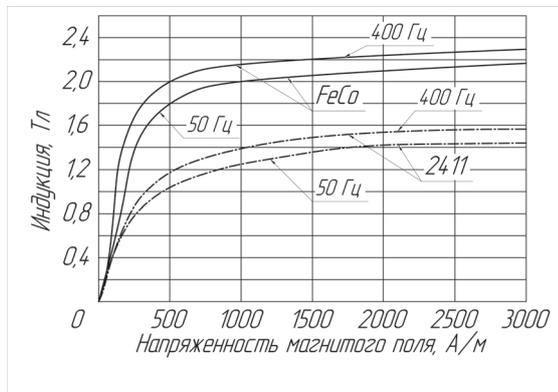


Рис. 5. Основные характеристики намагничивания сталей 49К2ФА и 2411 при частотах 50 и 400 Гц

Рабочие характеристики двигателей (рис. 6) подтверждают, что в диапазоне рабочих мощностей (5,5 кВт) машины с сердечником из стали 49К2ФА имеют более высокие энергетические характеристики ( $\cos\phi$  и  $\eta$ ). А с учетом данных, представленных на рис. 5, можно утверждать, что в двигателе с Fe-Co сердечником может быть достигнута большая мощность (до 7,5 кВт) при сохранении габаритов и массы. Полученные результаты были использованы в расчетной практике Харьковского агрегатного конструкторского бюро.

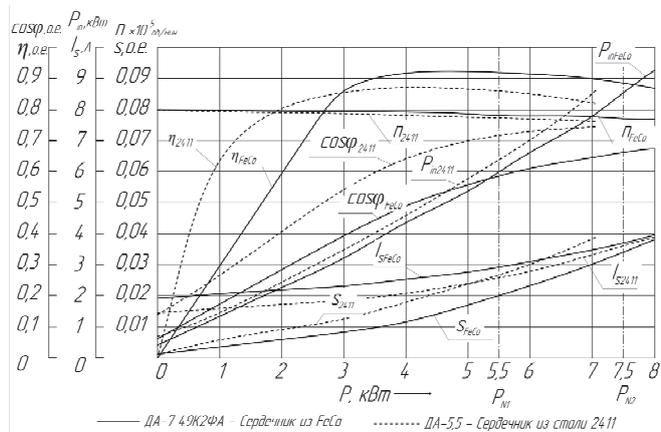


Рис. 6. Рабочие характеристики двигателей с сердечниками из стали 2411 и Fe-Co стали (49К2ФА) при частоте 400 Гц

## Выводы

1) Сравнение трех типов сталей, которые могут быть использованы для изготовления сердечников статоров авиационных двигателей, работающих при частоте 400 Гц, позволяет сделать общий вывод – наилучшими являются оксидированные Fe-Co стали, толщиной 0,2 мм. Они энергоэффективны, имеют меньшие магнитные потери и массогабаритные показатели, наибольшие индукцию насыщения и магнитную проницаемость.

2) Fe-Co стали сохранияют механическую надежность в широком диапазоне изменения температур: от -60 °C до +150 °C, что важно для эксплуатации авиационных двигателей.

3) Fe-Co стали позволяют получать большую мощность в двигателях с такими же массогабаритными показателями, что и двигатели с электротехническими сердечниками. Или позволяют получить такую же мощность при меньших массогабаритных показателях. Худшие показатели имеют Fe-Ni стали, с наиболее низкой индукция насыщения. Вследствие этого они были сняты с рассмотрения при проведении расширенных экспериментальных исследований.

4) Fe-Co стали требуют специальную технологию обработки, т.к. их магнитные свойства ухудшаются при механических воздействиях. Для поддержания и улучшения магнитных свойств Fe-Co сталей необходима специальная термомагнитная обработка – отжиг в вакууме, в слабом магнитном поле. Целесообразно заменить штамповку листов сердечника лазерной нарезкой.

### Список литературы

1. Шарабан Ю.В. Разработка технологии изготовления магнитопровода статора авиационных электродвигателей из железокобальтовых сталей / Ю.В. Шарабан // *Электротехника і Електромеханіка*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – № 6. – С. 54-56.

2. Гетья А.Н. Вопросы применения железокобальтовой стали в электродвигателях авиационных агрегатов / А.Н. Гетья, Ю.В. Шарабан, В.А. Матусевич // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – № 11. – С. 28-35.

3. Науменко В.И. Конструирование электрических машин летательных аппаратов: учебное пособие / В.И. Науменко. – Москва: МАИ, 1987. – 52 с.

4. Способ термомагнитно-механической обработки магнитопроводов из железокобальтовых сплавов: А.с. №1463771 СССР, МКИ С21D 1/04./ В.Н. Воробьев, О.С. Сорокина и др. (СССР). – №4308894/23-02. Заявлено 29.06.87. Оpubл. 07.03.89. – Бюл. №9.

5. Шайхутдинов Д.В. Метод определения магнитных свойств электротехнической стали / Д.В. Шайхутдинов, М.В. Шайхутдинова // *Международный журнал экспериментального образования*. – 2013. – № 11-1. – С. 105-107.

6. Поспелов Л.И. Конструкции авиационных электрических машин / Л.И. Поспелов; под ред. А.Ф. Федосеева. – М.: Энергоиздат, 1982. – 319 с.

7. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы: учебник для студентов вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.

8. Шевченко В.В. Особливості проектування електродвигунів для авіації / В.В. Шевченко, Є.С. Зубань // *Матеріали ХХІV міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». «МикроCAD- 2016»*. – Харків: НТУ «ХПИ», 2016. – Част. 2. – С. 168-170.

9. ГОСТ 12119.4-98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля.

10. ГОСТ 8.377-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.

Поступила в редколлегию 18.04.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.Е. Плюгин, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков.

## ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ МАГНІТНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ АВІАЦІЇ

В.В. Шевченко, В.П. Шайда, Є.С. Зубань

У роботі проведено порівняльний аналіз різних сталей і технологій виготовлення магнітопроводів електродвигунів авіаційних агрегатів. Рекомендації по вибору марки сталей для осердь розроблено на підставі випробувань на створеному експериментальному стенді.

**Ключові слова:** авіаційний двигун; масогабаритні показники; надійність; технологія виготовлення; залізо-кобальтова сталь, залізо-нікелева сталь, магнітна проникність, індукція насичення, магнітні втрати.

## FEATURES OF A CHOICE OF MAGNETIC SYSTEMS MATERIALS FOR AVIATION ELECTRIC MOTORS

V. Shevchenko, V. Shaida, E. Zuban

A comparative analysis of various steels and technologies for manufacturing the magnetic cores of electric engines of aircraft assemblies was carried out in. Recommendations for the selection of steel grades for cores were developed on the basis of tests on the experimental stand created by the authors.

**Keywords:** aircraft engine; weight and size parameters; reliability; manufacturing technology; iron - cobalt steel, iron-nickel steel, permeability, saturation induction, magnetic losses.