

УДК 621.313.13

С. В. Кулябин, А. В. Шестаков

МОДЕРНИЗАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Вентильные электродвигатели находят широкое применение во всех отраслях промышленности. Для вентильных электродвигателей (ВЭД), работающих в авиационных электроприводах, кроме массогабаритных и энергетических показателей, важное значение имеют также показатели быстродействия. В статье рассматриваются вопросы повышения динамических характеристик специального ВЭД при сохранении его энергетических показателей. Приведены результаты аналитического расчета ВЭД при различных напряжениях питания, результаты моделирования ВЭД в программном комплексе ANSYS, результаты расчета косвенных динамических показателей ВЭД. Результаты испытаний промышленных образцов специальных ВЭД, рассчитанных на различные напряжения, подтверждают необходимость выполнения ВЭД на напряжение 54 В, что дает повышение его динамических показателей при сохранении энергетических и массогабаритных показателей.

Ключевые слова: специальный вентильный электродвигатель, динамические показатели, математическое моделирование, рабочие характеристики, экспериментальные исследования.

Специальные вентильные электродвигатели (ВД), благодаря своим достоинствам, могут применяться практически во всех отраслях промышленности. Большую популярность они завоевали в авиационной технике, где основными требованиями, предъявляемыми к аппаратуре и электрическим машинам в частности, являются минимальные массогабаритные показатели, надежность и независимость работы всех узлов машины от условий полета, а также возможные перегрузки. Всем этим требованиям отвечают ВД. Но их широкое применение ограничено повышенной себестоимостью. В этом отношении с ними конкури-

руют асинхронные двигатели с частотным управлением, которые также обладают главными достоинствами ВД, такими как бесконтактность, широкий диапазон изменения частоты вращения. Однако, ВД обладают лучшими массогабаритными показателями и лучшими значениями КПД и $\cos\varphi$, являющимися основными критериями при выборе электрических машин для летательных аппаратов [2].

Перспективность широкого внедрения специальных ВД подтверждает и развитие электроники, поскольку оно дает возможность совершенствования систем управления. Также на этой базе возможны разработки новых методов управления и диагностики; усовершенствования уже существующих. Системы управления становятся все более компактными, функциональными и надежными.

Особый интерес в развитых странах вызывает перспективный тип электроприводов на основе ВД. Но исследования подобных машин осложняются отсутствием единой проектировочной методики.

Сегодня, несмотря на промышленное освоение ВД, многие вопросы, связанные с их проектированием и моделированием, остаются малоизученными и требуют детального анализа и рассмотрения. Одним из важнейших результатов проектирования являются рабочие характеристики машины. В этом плане свойства других электромеханических преобразователей, будь то асинхронная или машина постоянного тока, достаточно изучены. Но для ВД, вследствие многообразия их конструктивных и схемных решений, отсутствует обобщенный инженерный метод расчета рабочих характеристик.

В настоящее время математическое моделирование широко используется при проектировании технологических объектов, систем управления и т. д. Математическое моделирование и связанный с ним компьютерный эксперимент незаменимы в тех случаях, когда натурный эксперимент невозможен или затруднен по тем или иным причинам. Отсюда следует, что математическое моделирование представляет собой важную и необходимую составляющую процесса проектирования [6].

Для ВД, работающих в составе авиационного электропривода, помимо минимальных массогабаритных и энергетических показателей, большое значение имеет также их быстродействие. Поэтому целью нашей работы являлось улучшение динамических показателей специального ВД с постоянными магнитами при сохранении энергетических показателей.

В самом начале была исследована магнитная система вентильного электродвигателя (ВД) на основе полевой компьютерной модели.

Компьютерное моделирование магнитной системы ВД проводилось в программе ANSYS. Размеры магнитной системы и параметры брались из поверочного электромагнитного расчета ВД на напряжение питания 27 В.. Модель модернизируемого ВД изображена на рис. 1. Результаты расчетов рабочих характеристик приведены на рис. 2.

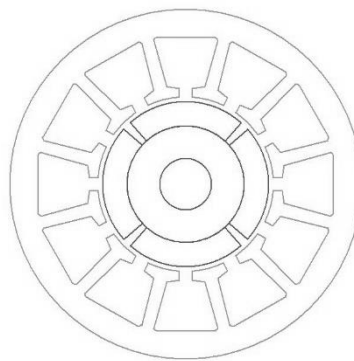


Рис. 1. Модель ВД в ANSYS

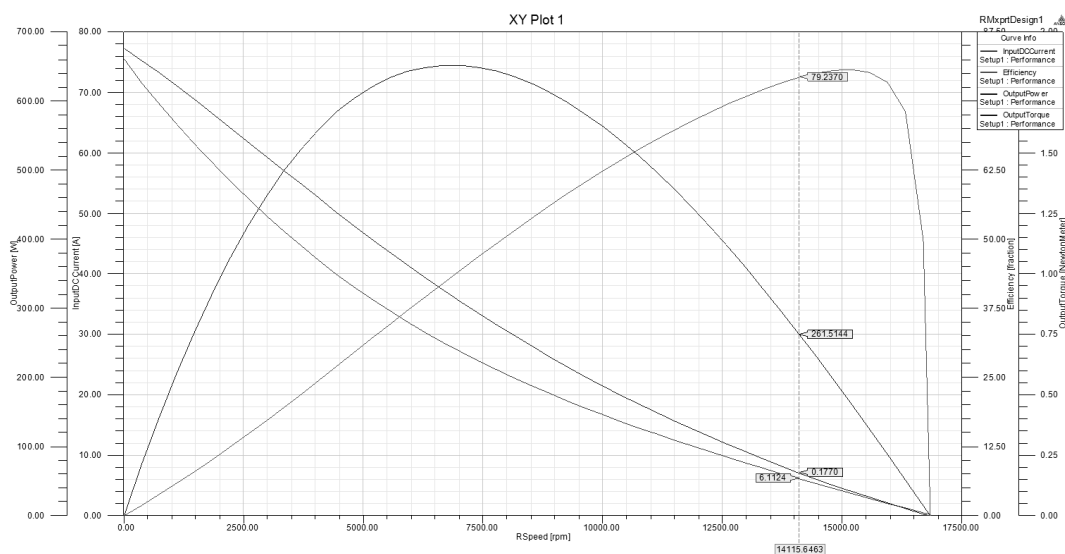


Рис. 2. Характеристики рассчитанного ВД в ANSYS

Для дальнейшего расчета был произведен экспорт модели в ANSYS Maxwell 2D. Результаты расчета магнитных полей приведены на рис. 3 – рис. 5.

По данным, полученным в результате решения полевых задач, рассчитаны зависимости от времени электромагнитного момента (рис. 6), магнитных потерь в стали статора (рис. 7), потерь в материале постоянных магнитов (рис. 8).

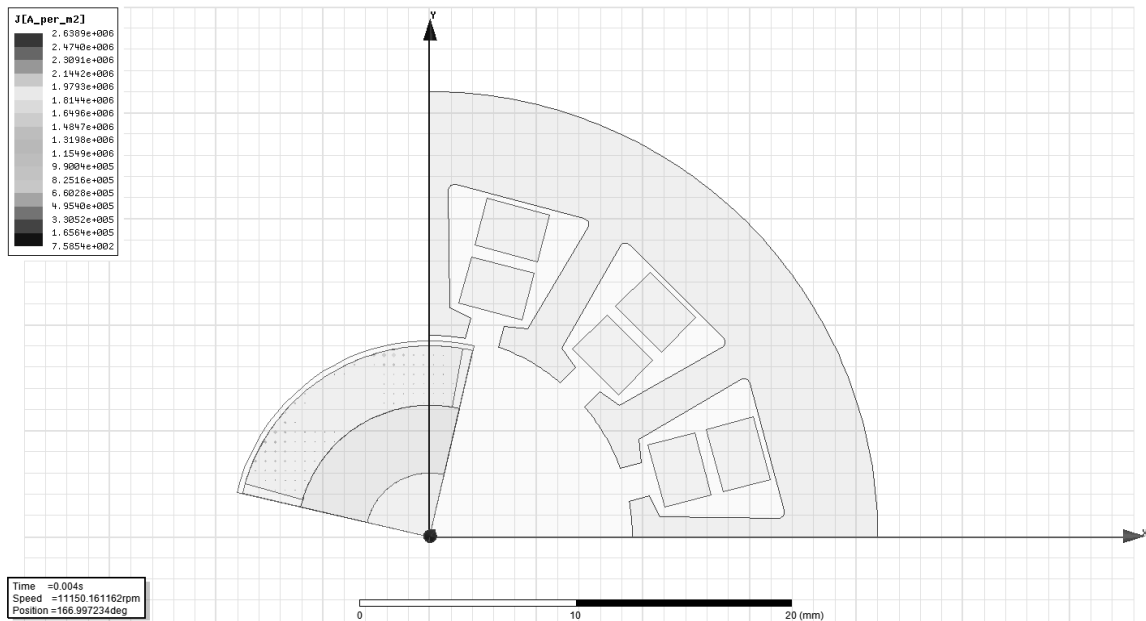


Рис. 3. Компьютерная модель ВД в ANSYS Maxwell 2D

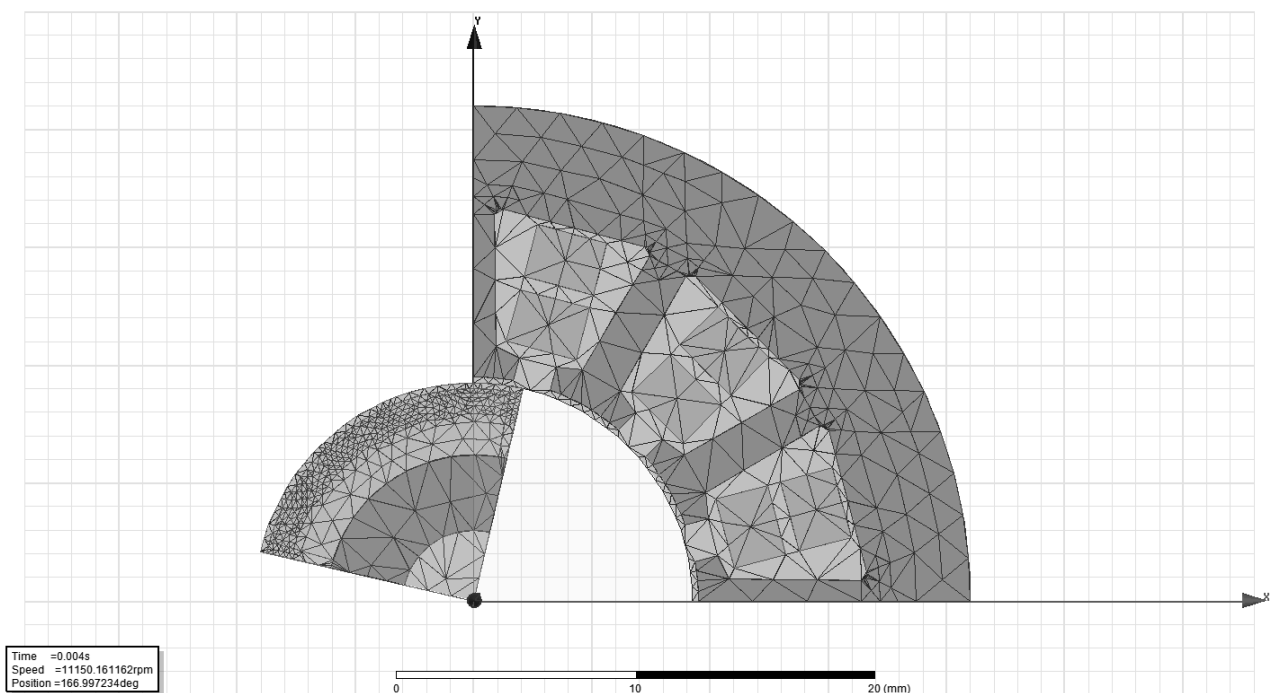


Рис. 4. Построение сетки для расчета на заданной модели ВД

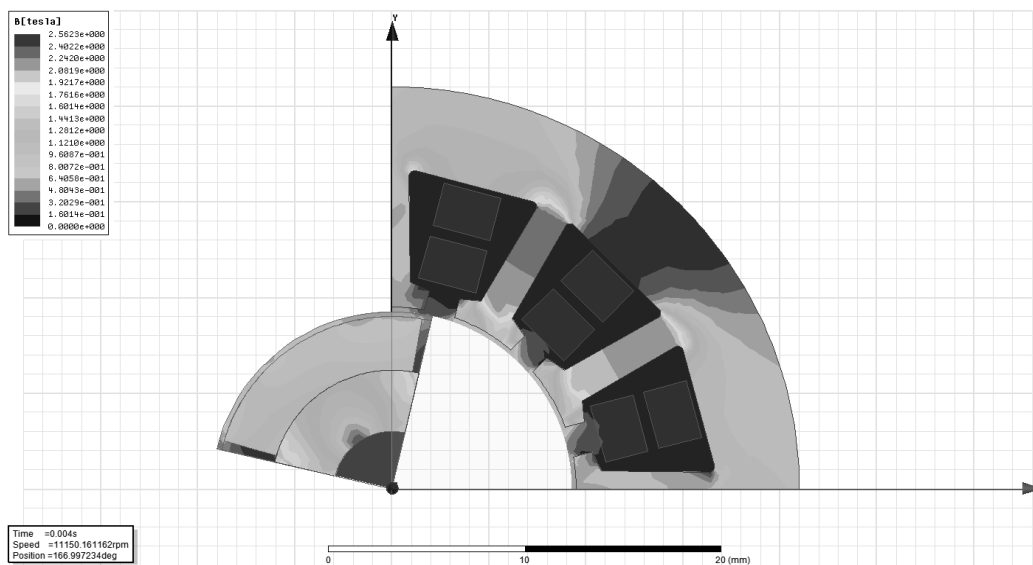


Рис. 5. Полученное распределение индукции на заданной модели ВД

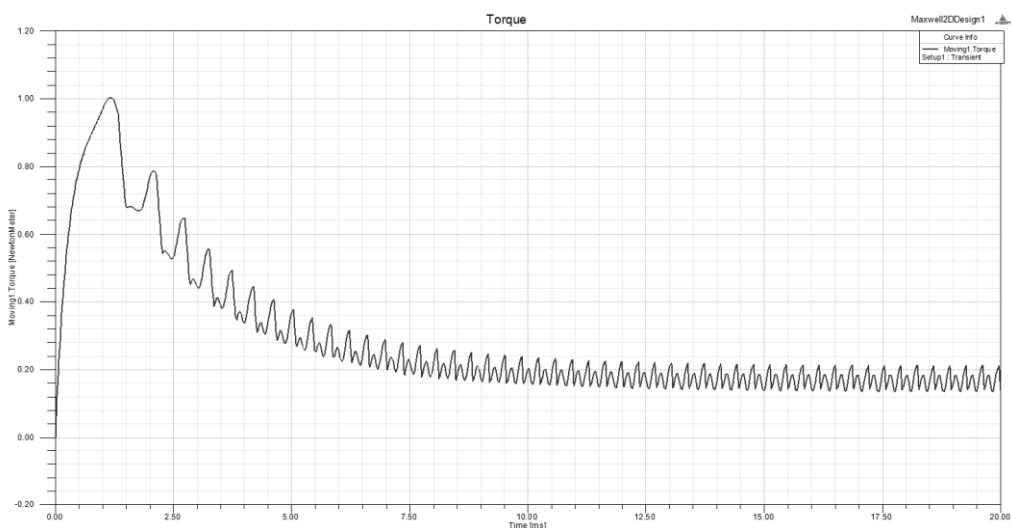


Рис. 6. Осциллограмма момента на заданной модели ВД

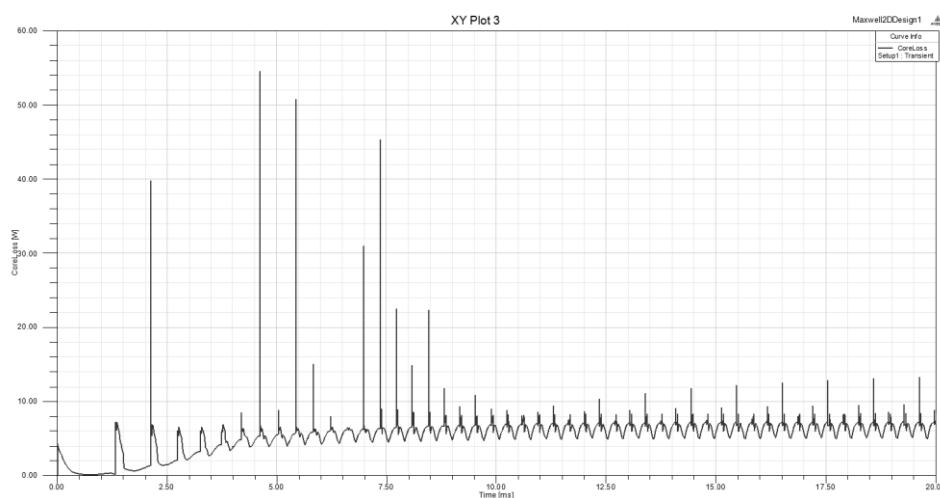


Рис. 7. Осциллограмма магнитных потерь в сердечнике статора на заданной модели ВД

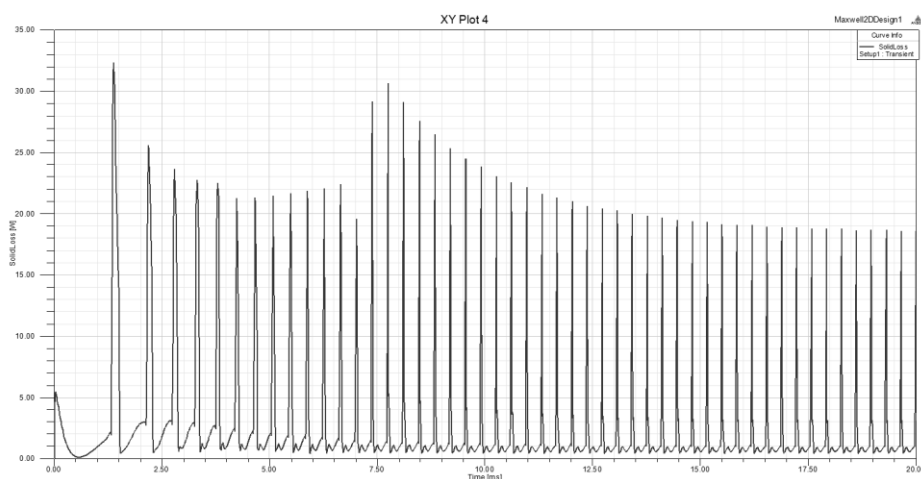


Рис. 8. Осциллограмма потерь от вихревых токов в постоянных магнитах на заданной модели ВД

Для сравнения аналитического расчета и компьютерного моделирования значения параметров сведены в таблицу 1. Кроме того, рассчитывается отклонение параметров по формуле:

$$\varepsilon = \frac{X_B - X_M}{X_B} \cdot 100\% \quad (1)$$

где X_B - наибольшее значение показателя, А/м;

X_M - наименьшее значение показателя.

Различие результатов аналитического расчета и моделирования не превышает 10%. Параметры ВД соответствуют требованиям задания. Превышение индукции в ярме статора в ходе аналитического расчета объясняется возможными не учитываемыми параметрами в ходе аналитического расчета.

Наиболее простым способом оценки динамики вентильных электродвигателей является расчет косвенных динамических показателей. Данный способ позволяет без использования специализированного программного обеспечения и сложных инженерных методик оценить в первом приближении, с помощью аналитических зависимостей, динамику электродвигателей, которые в дальнейшем будут использоваться в электроприводах, работающих в переходных режимах.

Таблица 1

**Сравнение результатов аналитического расчета
и компьютерного моделирования**

Показатель	Аналит. расчет	Моделирование магнитной системы	Отклонение (ε), %
Индукция в воздушном зазоре, Тл	0,611	0,669	8,6
Индукция в зубцах статора, Тл	2,109	2,275	7,3
Индукция в ярме статора, Тл	1,341	1,162	13,3
Индукция в ярме ротора, Тл	1,528	1,5	1,8
Частота вращения об/мин,	14140	14205	0,5
Потребляемый ток, А	6,512	6,1093	6,2
КПД, %	77,9	79,45	1,9
Электромагнитный момент, Н·м	0,164	0,170	3,5
Номинальная мощность, Вт	242,78	253,533	4,2

Косвенные динамические показатели – это параметры, которые могут быть косвенно вычислены через различные показатели электрической машины (ЭМ) или электропривода (ЭП). Они позволяют без применения специальных средств моделирования и расчетов оценить косвенно через известные показатели ЭМ или ЭП их динамику, и связывают конструктивные, геометрические и массогабаритные показатели ЭД и ЭП [1].

Электромагнитная постоянная времени T_{ε} характеризует скорость протекания электромагнитных процессов в обмотках ЭД. Время разгона ВД определяется, главным образом, электромеханическими переходными процессами. Электромагнитная постоянная равна отношению индуктивности обмоток ЭД к их активному сопротивлению [1].

$$T_{\varepsilon} = \frac{L}{R}. \quad (2)$$

где L – индуктивность фазы электродвигателя, Гн;

R – активное сопротивление фазы электродвигателя, Ом.

Электромеханическая постоянная является косвенной оценкой быстродействия системы. Значение электромеханической постоянной определяется из основного уравнения динамики для ВД, при условии разгона от неподвижного состояния до скорости холостого хода при моменте нагрузки на валу, равном 0. В общем случае уравнение динамики ВД имеет вид [1]

$$T_{эм} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{кз}}. \quad (3)$$

где J – момент инерции вращающихся частей электродвигателя, кг*м²;

ω_0 – угловая скорость холостого хода электродвигателя, рад/с;

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60}.$$

n_0 – частота холостого хода электродвигателя, об/мин;

$M_{кз}$ – момент короткого замыкания электродвигателя при ограничении пускового тока равного 30 А, Н*м;

Крутизна мощности характеризует пригодность ВД для его применения в высокодинамичных приводах.

Максимальное значение крутизны мощности ВД определяется в начальный момент пуска, поскольку в начальный момент времени в идеальном случае пусковой момент равен моменту короткого замыкания $M_{п} = M_{кз}$ и пусковой ток равен току короткого замыкания $I_{п} = I_{кз}$. При этом ВД не вращается и, следовательно, потери на перемагничивание (потери в стали) равны 0, пусковая мощность $M_{п}$ определяется только электрическими потерями [1].

Таким образом, можно записать следующее соотношение для крутизны мощности:

$$P = \frac{M_{кз}^2}{J}. \quad (4)$$

При проектировании ВД при выборе в качестве критерия оптимальности максимальной крутизны мощности, ВД проектируется на минимальное значение электромеханической постоянной и максимально возможный пусковой момент.

Динамическая добротность характеризует развиваемое угловое ускорение.

В общем случае угловое ускорение ЭД равно первой производной от угловой скорости по времени, рад/с², [1]

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

Из уравнения динамики ЭД можно записать

$$\varepsilon = \frac{M_{кз}}{J}. \quad (6)$$

Таким образом, ускорение характеризует способность ЭД приводить в движение собственную маховую массу.

Одним из способов повышения динамических показателей ВД при сохранении энергетических показателей является повышение напряжения питания. С учетом имеющихся возможностей системы авиационного электроснабжения было выбрано напряжение 54 В.

Для исследования косвенных динамических ВД с целью их улучшения были выполнены поверочные электромагнитные расчеты и моделирование ВД на напряжения питания 27 В и 54 В.

Результаты расчета косвенных динамических показателей для вентильных электродвигателей на напряжения 27 В и 54 В сведены в таблицу 2.

Как показали исследования у электродвигателя на напряжение 54 В ниже электромагнитная постоянная на 26% и крутизна мощности на 1,7%, выше динамическая добротность на 31% и электромеханическая постоянная на 6,2%.

Электродвигатели предназначены для применения в электроприводах. Как показывают исследования и последние работы, наибольшую роль динамическая добротность играет в специальных электроприводах, которые представляют собой электропривод классической конструкции с редуктором.

Были изготовлены экспериментальные образцы электродвигателей на 27 В и на 54 В и проведены испытания по проверке работоспособности.

Испытания проводились с целью определения параметров электродвигателя, снятия рабочих характеристик для сравнения с расчетными, пригодности

электродвигателя к установке в образец электропривода, предназначенного для проведения заводских испытаний.

Таблица 2

Сравнение косвенных динамических показателей для вентильных электродвигателей на напряжения 27 В и 54 В

Показатель	Обозначение	27 В	54 В
Индуктивность фазы электродвигателя, Гн	L	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Активное сопротивление фазы электродвигателя, Ом	R	0,095	0,323
Электромагнитная постоянная времени, с	T_{Σ}	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$
Момент инерции вращающихся частей электродвигателя, кг·м ²	J	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Угловая скорость холостого хода электродвигателя, рад	ω_0	946	1572
Момент короткого замыкания электродвигателя, Н·м	$M_{КЗ}$	1,536	1,04
Электромеханическая постоянная, с	$T_{ЭМ}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$
Крутизна мощности, Н ² /кг	P	$9,28 \cdot 10^5$	$9,12 \cdot 10^5$
Динамическая добротность, рад/с ²	ε	$6,04 \cdot 10^5$	$8,77 \cdot 10^5$

В таблице 3 представлены расчетные рабочие характеристики ВД при напряжении питания 54 В, в таблице 4 представлены рабочие характеристики образца того же ВД, снятые опытным путем, в таблице 5 представлен процент ошибки по потребляемому току и полезной мощности.

Расчет процента ошибки производится по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{X_{\text{образца}} - X_{\text{расчетное}}}{X_{\text{образца}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Таблица 3

Расчетные рабочие характеристики электродвигателя

М, Н·м	0	0,025	0,066	0,132	0,173 (ном.)	0,23	0,312
--------	---	-------	-------	-------	--------------	------	-------

Технические науки

n, об/мин	14970	14840	14630	14300	14100	13790	13300
I, А	0,421	1,014	2,011	3,602	4,581	6,049	8,392
P ₁ , Вт	27,699	67,896	137,904	254,456	328,135	440,36	622,253
η, о.е.	0	0,561	0,734	0,779	0,776	0,757	0,713
P ₂ , Вт	0	38,094	101,238	198,228	254,62	333,428	443,427

Таблица 4

Рабочие характеристики образца электродвигателя

M, Н·м	0	0,025	0,066	0,132	0,173 (ном.)	0,23	0,312
n, об/мин	15627	15324	15093	14540	14200	14000	13520
I, А	0,31	1,15	2,1	3,8	4,9	6,52	9,5
P ₁ , Вт	29,2	70,2	145,8	280,8	356,4	459,0	621,0
η, о.е.	0	0,647	0,795	0,765	0,758	0,743	0,674
P ₂ , Вт	0	45,45	115,9	214,9	270,33	341,46	418,7

Таблица 5

Процент ошибки образцов электродвигателя

M, Н·м	0	0,025	0,066	0,132	0,173 (ном.)	0,23	0,312
I _{рас} , А	0,42	1,01	2,01	3,60	4,58	6,04	8,39
I _{обр} , А	0,31	1,15	2,1	3,8	4,9	6,52	9,5
% ошибки расчетов по току обр.	-	11,8	4,2	5,2	6,51	7,2	11,6
P _{2,рас} , Вт	0	38,0	101,2	198,2	254,6	333,4	443,4
P _{2,обр} , Вт	0	45,4	115,9	214,9	270,3	341,4	418,7
% ошибки расчетов по полезной мощности обр.	0	16,2	12,6	7,7	5,8	2,3	5,9

Параметры электродвигателя соответствуют расчетным, а образец ВД на напряжение 54 В пригоден к установке в авиационный электропривод для про-

ведения заводских испытаний. Точность расчетов находится в допустимых пределах. Так, превышение по потребляемому току составляет не более 12% при значении момента, близком к номинальному (в диапазоне от 0,05 до 0,25 Н·м). Единичные превышения связаны с неточностью испытательного оборудования.

В ходе испытаний было установлено, что экспериментальный образец ВД на напряжение 54 В – работоспособен. Были выданы рекомендации о проведении опытно-конструкторских работ для создания опытного образца ВД.

По результатам исследований была составлена новая аналитическая методика расчета ВД.

Список литературы

1. *Ииутинов В. В.* Анализ и оптимизация вентильного электродвигателя для высокодинамичного электропривода: дис. ... канд. техн. наук. Киров, 2015. 192 с.
2. *Овчинников И. Е.* Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2007. 336 с.
3. *Ииутинов В. В.* Применение методов оптимизации при проектировании вентильных электродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами для специальных приводов // Электротехника. 2014. № 4. С. 46–50.
4. *Горшков Р. Г.* Разработка и исследование вентильного двигателя с постоянными магнитами на основе математического моделирования магнитного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2011.

КУЛЯБИН Станислав Владимирович – аспирант кафедры электрических машин и аппаратов, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: qstas42@gmail.com

ШЕСТАКОВ Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрических машин и аппаратов, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: shestakov@vyatsu.ru