

В ходе проведения эксперимента на монтажный изгиб при различных температурах (-30°C; -40°C; -50°C; -60°C), образец с изоляцией из ПВХ-пластиката не выдержал испытаний при температуре -50°C. А образец с изоляцией из фторопласта показал устойчивость к воздействию пониженных температур, вплоть до -60°C.

Устойчивость фторопластовой изоляции главным образом связана с химическим строением, а именно с наличием многоуровневых связей. А поливинилхлорид имеет линейное строение.

Результатом проделанной работы являются зависимости изменения предела прочности и относительного удлинения от температуры старения изоляции. На основании полученных данных были сделаны выводы по устойчивости полимерных материалов к воздействию холода.

Было установлено:

1. Изменение физико-механических свойств практически не зависит от температуры.
2. Изоляция, выполненная из фторопласта, показала устойчивость к воздействию пониженных температур до -60°C.

В связи с этим, можно полагать, что кабельные изделия, имеющие фторполимерную изоляцию, пригодны для использования в условиях экстремально низких температур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кулезнёв В. Н., Шершнёв В. А. Химия и физика полимеров // М.: КолосС, 2007, 2-ое издание, перераб. и доп. - 367 с.
2. Бартенев Г. М., Френкель С. Я. Физика полимеров / Под ред. д-ра физ.-мат. наук Ельяшевича А. М. // Л.: Химия, 1990. - 432 с.
3. Бухина М. Ф., Курлянд С. К. Морозостойкость эластомеров // М.: Химия, 1989. - 176 с.

#### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Цыбиков Б.Б.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Энергоэффективный двигатель представляет собой двигатель общепромышленного исполнения, который проектируется с применением специальных подходов, например, с увеличенным значением массы активных материалов, их качества, более надежной изоляцией, замены составных частей двигателя на новые модификации с улучшенными характеристиками энергосбережения. В результате можно получить снижение до 20 % суммарных потерь мощности двигателя. В итоге, можно получить увеличение КПД двигателя на 2...5 %, меньший перегрев обмоток статора, меньший шум и вибрацию, увеличенный срок службы и повышенную надежность. Разумеется, стоимость энергоэффективного двигателя соответственно выше, но эти затраты окупятся за счет меньшего электропотребления в будущем [1,2].

При проведении исследования было отдано предпочтение асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором. Поскольку, такой двигатель, является наиболее распространенным – около 60 % потребляемой энергии приходится именно на него, кроме того электроприводы на их базе охватывают практически все технологические процессы.

На сегодняшний момент в мировом сообществе приняты четыре класса энергоэффективности двигателей – IE1, IE2, IE3 и IE4, что согласно международной классификации расшифровывается как IE1 -стандартный класс, IE2 - высокий класс, IE3 - сверхвысокий класс, IE4 - максимально высокий класс энергоэффективности.

На данный момент наиболее распространенным классом является IE2. Однако, начиная с 1 января 2017 года все европейские производители двигателей будут вынуждены перенастроить свое производство на выпуск электродвигателей класса энергоэффективности не ниже IE3. Исходя из изложенного, поиск путей повышения КПД асинхронных двигателей является актуальной задачей.

Существуют различные способы увеличения КПД двигателя, в общем случае они могут быть сформулированы следующим образом:

1. Изменение обмоточных данных двигателя, (при сохранении поперечной геометрии машины).
2. Изменение длины воздушного зазора (статора и ротора); при сохранении поперечной геометрии машины).
3. Комплексное изменение длины сердечника и обмоточных данных машины (при сохранении поперечной геометрии машины).
4. Изменение пазовой зоны (количество, форма и глубина пазов статора и ротора).
5. Изменение материалов с меньшими удельными потерями для изготовления обмоток и магнитопроводов машины.
6. Использование двигателей с большим габаритом.

Способ с изменением пазовой зоны является наиболее сложным и дорогостоящим, поскольку в данном случае требуется подкорректировать технологию изготовления и непосредственно оборудование. К основному оборудованию относится прессовый комплекс вырубаящий статорные листы из электротехнической стали методом штамповки, приобретение данного оборудования является дорогостоящей задачей для предприятия [3].

При изменении материала изготовления обмотки ротора с литой алюминиевой на литую медную, возможно уменьшить суммарные потери в двигателе, а также позволяют сделать его более компактным - уменьшение длины сердечника статора и ротора за счет увеличения КПД. Сокращение длины двигателя при этом позволит уменьшить потребление меди, электротехнической стали, изоляционных материалов. Но, так как медь имеет меньшее удельное сопротивление, нужно найти решение для обеспечения необходимых пусковых характеристик. Для этого достаточно углубить паз ротора примерно на 15% которое приведет к усилению влияния эффекта вытеснения тока. При использовании данного способа возможно увеличение КПД на 3...5% [4].

В данной статье основное внимание будет уделено наиболее экономически целесообразному способу повышения энергоэффективности, то есть повышение КПД машины происходит за счет увеличения длины магнитопровода статора и уменьшении числа витков обмотки статора [5, 6, 7]. Данный комплексный подход является наиболее простыми и доступными, так как не требуют больших дополнительных затрат связанных с переоснащением основного производства.

В данной статье была поставлена задача рассмотрения возможности повышения КПД машины до уровня энергоэффективности IE2. Наряду с повышением КПД двигателя, переход на использование электродвигателей класса IE2 позволяет:

- экономить большое количество энергии;
- увеличить срок жизни двигателя и смежного с ним оборудования;
- повысить коэффициент мощности;
- улучшить перегрузочную способность;

- уменьшить затраты на техобслуживание и снизить простои;
- повысить устойчивость двигателя к тепловым нагрузкам и к нарушениям условий эксплуатации;
- снизить нагрузку на обслуживающий персонал из-за практически бесшумной работы.

В представленной работе были произведены расчеты трех вариантов изменения обмоточных данных и длины магнитопроводов: 1 вариант. Без изменения числа витков обмотки фазы статора  $w_1=100\%$ , с увеличением длины сердечников статора и ротора до 40% по сравнению с базовой машиной; 2 вариант. При  $w_1=90\%$ , с увеличением длины сердечников статора и ротора до 40% по сравнению с базовой машиной; 3 вариант. При  $w_1=80\%$ , с увеличением длины сердечников статора и ротора до 40% по сравнению с базовой машиной.

Результаты моделирования приведены в таблице 1, в таблице используются следующие условные обозначения:  $L_1$  – относительное значение длины магнитопроводов статора и ротора,  $l_\delta$  – длина магнитопроводов статора и ротора,  $P_{\Sigma 1}$  – электрические потери в обмотке статора,  $P_{\Sigma 2}$  – электрические потери в обмотке ротора,  $P_{cm}$  – магнитные потери,  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности,  $\eta$  – КПД спроектированного двигателя.

На основании данных были построены диаграммы рис. 1-4. На рис. 1 приведена гистограмма изменения КПД с ростом длины сердечников статора и ротора, при этом представлены все три варианта расчета, изменение КПД происходит за счет изменения суммарных потерь на рис. 2, 3, 4 приведены данные изменения электрических потерь в обмотке статора, электрических потерь в обмотке ротора, магнитных потерь при изменении длины сердечников и обмоточных данных машины.

**Таблица 1. Данные расчета**

$L_1, \%$	<b>100</b>	<b>105</b>	<b>110</b>	<b>115</b>	<b>120</b>	<b>125</b>	<b>130</b>	<b>140</b>
$l_\delta, \text{м}$	0,1086	0,114	0,119	0,125	0,13	0,136	0,141	0,152
<b>Вариант 1, <math>w_1=100\%</math></b>								
$P_{\Sigma 1}, \text{Вт}$	656,83	651,55	653,81	665,25	680,28	703,72	728,64	799,14
$P_{\Sigma 2}, \text{Вт}$	235,38	246,62	256,90	269,15	282,04	298,08	314,56	356,66
$P_{cm}, \text{Вт}$	141,22	134,85	129,19	123,47	117,95	113,30	108,73	101,24
$\cos\varphi$	0,818	0,831	0,837	0,839	0,838	0,835	0,831	0,817
$\eta$	0,867	0,867	0,866	0,865	0,862	0,859	0,855	0,845
<b>Вариант 2, <math>w_1=90\%</math></b>								
$P_{\Sigma 1}, \text{Вт}$	656,83	394,79	359,97	344,62	332,45	329,46	331,02	339,53
$P_{\Sigma 2}, \text{Вт}$	235,38	99,17	102,68	105,60	107,26	110,88	115,44	125,30
$P_{cm}, \text{Вт}$	141,22	194,05	185,10	176,97	169,46	162,66	157,35	146,08
$\cos\varphi$	0,818	0,738	0,779	0,801	0,816	0,827	0,836	0,845
$\eta$	0,867	0,88	0,886	0,889	0,891	0,892	0,893	0,892
<b>Вариант 3, <math>w_1=80\%</math></b>								
$P_{\Sigma 1}, \text{Вт}$	656,83	792,98	643,41	564,21	527,43	507,19	502,14	504,50
$P_{\Sigma 2}, \text{Вт}$	235,38	164,97	164,34	166,66	170,64	173,91	179,54	191,41
$P_{cm}, \text{Вт}$	141,22	160,15	152,73	146,95	140,93	134,93	129,66	120,823
$\cos\varphi$	0,818	0,662	0,726	0,774	0,803	0,821	0,832	0,843
$\eta$	0,867	0,852	0,869	0,879	0,884	0,886	0,887	0,887

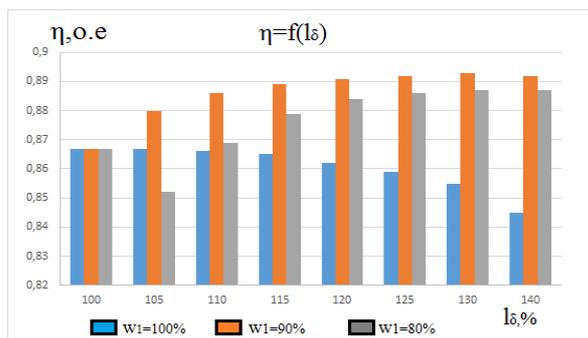


Рис. 1. Зависимость  $\eta=f(l_\delta)$

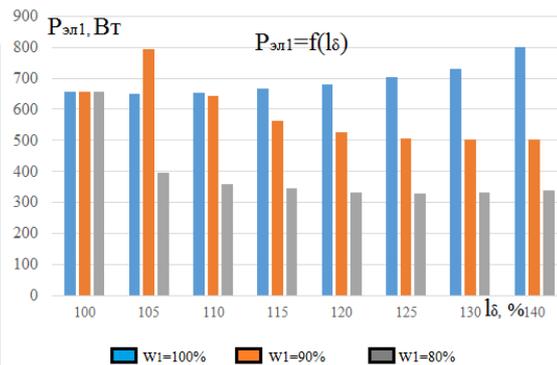


Рис. 2. Зависимость  $P_{эл1}=f(l_\delta)$

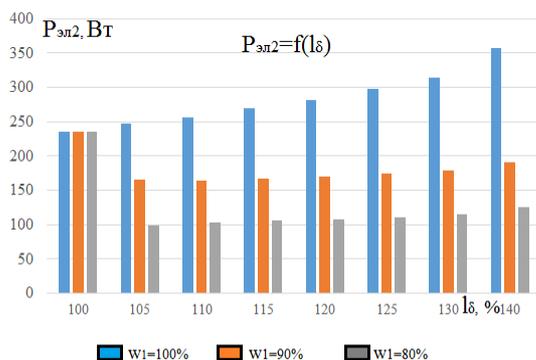


Рис. 3. Зависимость  $P_{эл2}=f(l_\delta)$

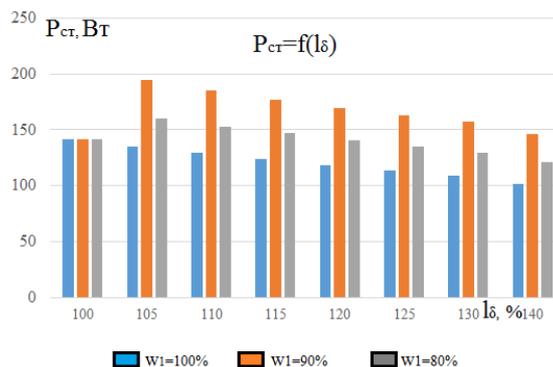


Рис. 4. Зависимость  $P_{ст}=f(l_\delta)$

Увеличение КПД происходит за счет увеличения длины воздушного зазора, так как потери в стали уменьшаются, однако при неизменном количестве витков резко увеличиваются электрические потери, следовательно, для большего повышения КПД следует уменьшать количество витков в обмотке фазы статора. При этом для сохранения коэффициента заполнения паза статора постоянным, принимаем большее сечение витка, следовательно, получаем уменьшение электрических потерь (и в роторе и в статоре). Как показывают результаты расчетов комплексное изменение длины сердечника и обмоточных данных позволяет получить более высокое значение КПД.

Варианта №2 удалось получить повышение КПД на 2,6 % при  $w_1=90\%$  и увеличении длины сердечника на 30 % от базового, при этом происходит уменьшение электрических потерь в статоре на 49,6 %, на 50,95 % электрических потерь в роторе, на 8,18 % стальных потерь.

Варианта №3 удалось получить повышение КПД на 2 % при  $w_1=80\%$  и увеличении длины сердечника на 40 % от базового, при этом происходит уменьшение электрических потерь в статоре на 23,19 %, на 18,68 % электрических потерь в роторе, увеличение на 3,32 % стальных потерь.

Полученные данные КПД соответствует классу энергоэффективности IE2. Таким образом рассмотренный подход к проектированию энергоэффективных двигателей позволяет повысить класс энергоэффективности машины. Данный подход предусматривает несколько больший расход активных материалов на изготовление машины, однако, основным преимуществом является отсутствие необходимости переоборудования основного производства. Небольшое же увеличение себестоимости машины компенсируется меньшими затратами в процессе его дальнейшей эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов/ И.П. Копылов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 2015. – 767 с.
2. Асинхронные двигатели серии» 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. - 504 с
3. Сравнение характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при замене материала обмотки ротора и предложения по их улучшению. Шевченко В.В, Горюшкин Н.И, Лизан И.Я // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2014. - № 12. - С. 27-34.
4. Энергоэффективные асинхронные двигатели для регулируемого электропривода / О. О. Муравлева //Известия Томского политехнического университета \ \ Томский политехнический университет (ТПУ). — 2005.— 135-139 с.
5. Энергоэффективные асинхронные двигатели для насосных агрегатов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : / П.В. Тютёва; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: 2010. — 215 с.
6. Тютёва П. В. Работа модернизированных асинхронных двигателей в составе регулируемого электропривода турбомеханизмов / П. В. Тютёва, Е. В. Бейерлейн // Известия вузов. Проблемы энергетика : научно-технический и производственный журнал / Казанский государственный энергетический университет. — 2015. — № 1-2. — [С. 76-84].
7. Бейерлейн Е.В., Тютёва П.В., Муравлева О.О. Комплексная оценка затрат при проектировании энергоэффективных асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 25–28.

## ПРИМЕНЕНИЕ Fe-Cr-Co В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОГО СЛОЯ РОТОРА СИНХРОННО-ГИСТЕРЕЗИСНОГО ГИРОДВИГАТЕЛЯ

Брянцев А.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Гиродвигатель является как по положению, так и по своему назначению центральным элементом гироскопического прибора. Маховик вместе с двигателем, приводящим его во вращение, называется гиродвигателем (ГД). Особенность гироскопа заключается в том, что он стремится сохранить постоянство направления оси вращения маховика в абсолютном (инерционном) пространстве.

Принципиальной особенностью гистерезисных двигателей, связанной непосредственно с физикой их работы, является единый по своей природе электромагнитный момент в асинхронном и в синхронном режиме. То, что СГД имеет избыточный момент при любой скорости вращения, в том числе и при скорости, близкой к синхронной, позволяет ему входить в синхронизм при любом моменте инерции, что трудно получить от других типов синхронных двигателей [1].

Именно с этим связано в первую очередь применение гистерезисных двигателей в гироскопии. Кроме того, на стороне СГД простота, надежность и принципиальная симметричность конструкции ротора, а также относительно неплохие энергетические показатели, сопоставимые при малых габаритах с характеристиками двигателей иного типа. Для получения наилучших энергетических показателей используется только конструкция СГД с немагнитным материалом маховика.