

УДК 621.3.048

## ПРЕССОВАННЫЕ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Д. У. СУЛТАНГАРЕЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>sultangareev.damir@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)

**Аннотация.** в работе приводятся преимущества технологии изготовления прессованных обмоток электрических машин. Представлены описания технологического процесса и специальной оснастки для реализации данной технологии. Также приводятся результаты исследований допустимого давления на катушку при изготовлении, а также сравнение электрических параметров катушек, изготовленных путем традиционной намотки и прессованных.

**Ключевые слова:** прессованная обмотка, коэффициент заполнения паза, оснастка, технологических процесс.

### ВВЕДЕНИЕ

Обмотка является неотъемлемой частью электрической машины (ЭМ). От ее конструкции, качества изготовления, применяемых технологий изготовления и материалов зависит качество и эффективность работы электрической машины. В настоящее время известны разные технологии изготовления обмоток электрических машин. Выбор той или иной технологии зависит от типа электрической машины, ее мощности, напряжения и ряда других факторов. При этом важной характеристикой обмотки является плотность ее укладки, оцениваемая коэффициентом заполнения паза проводниками.

Чем выше коэффициент заполнения, тем больше проводников можно разместить в пазу, что увеличивает сечение и позволяет увеличить токовую нагрузку, а, следовательно, и мощность ЭМ. Также коэффициент заполнения влияет на индуктивность обмотки, что, в свою очередь, влияет на ЭДС, генерируемую ЭМ. Однако, чем выше коэффициент заполнения, тем больше меди в обмотке, что увеличивает ее активное сопротивление и потери мощности в ней. Также при высоких коэффициентах заполнения необходимо повышать эффективность системы охлаждения ЭМ, чтобы избежать перегрева.

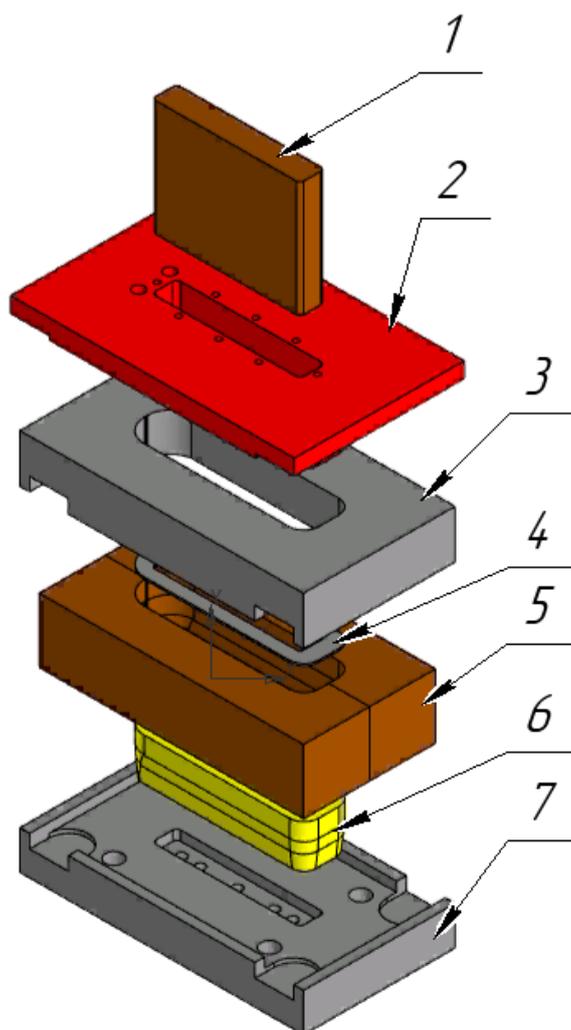
При слишком высоких коэффициентах заполнения могут возникать механические напряжения в обмотке, приводящие к ее деформации и разрушению и повышается сложность изготовления обмотки. Известно, что оптимальное значение коэффициента заполнения находится в диапазоне 0,7–0,85 [1]. Но достичь такого коэффициента крайне трудно и чаще всего коэффициент заполнения находится в диапазоне 0,5–0,6. В связи с этим совершенствование существующих и исследование новых технологий изготовления обмоток ЭМ является актуальной задачей.

В настоящее время весьма перспективной является технология изготовления обмотки прессовкой. При этом обмотки представляют собой систему плотно прилегающих друг к другу проводников, дополнительно пропитанных электроизоляционным составом.

Известно применение прессованных обмоток в электрических машинах [2-3] зарубежными производителями, например компанией Siemens [4]. Данной компанией разработаны ЭМ для перспективных самолетов Magnus eFusion, Sun Flyer2, Flight Design F2e.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕССОВАННЫХ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Технология изготовления прессованных обмоток электрических машин представляет собой достаточно сложный и ответственный процесс. Она основана на использовании специальной оснастки рис.1 для придания катушкам формы и запрессовку, которая позволяет сжимать и закреплять провода обмоток рис. 2 внутри статора и ротора электрической машины. При этом необходимо контролировать усилие сжатия катушки в оснастке для исключения возможности возникновения межвитковых замыканий. Также прессованные обмотки обладают повышенной механической прочностью и устойчивостью к воздействию вибраций.



**Рис. 1.** Оснастка для укладки и запрессовки катушки:

*1 – центральная часть; 2 – крышка; 3 – верхнее основание; 4 – текстолитовая пластина;  
5 – боковины; 6 – катушка; 7 – нижнее основание*

На центральную часть 1 (рис.1.) наматывается подготовленный жгут, после чего устанавливается в нижнее основание 2 и фиксируется винтами. Далее устанавливаются боковины 5, которые придают катушке форму за счет своей конусообразной внутренней части. После этого устанавливается верхнее основание 3, которая поджимает боковины. Затем идет процесс пропитки и после него вставляется текстолитовая пластина 4, служащая для предотвращения повреждения витков и жил катушки при дальнейшей запрессовке. Верхнее основание надевается в самую последнюю очередь, и оно придает катушке необходимую высоту, определяемую высотой зубца статора.

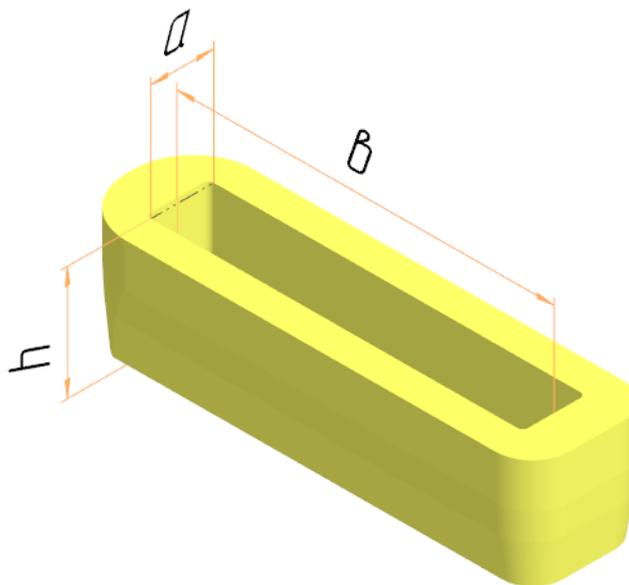


Рис. 2. Конечный вариант катушки

Размеры «а» и «в» повторяют размеры зубца магнитопровода статора с учетом пазовой изоляции и, соответственно, формируют окно катушки. Размер «h» определяется высотой зубца магнитопровода статора и, соответственно, ограничивает высоту прессуемой катушки.

Весь технологический процесс можно разделить на несколько этапов:

- 1 этап – подготовка жгута, включает в себя намотку провода, определенного сечения и количества жил, а также обматывание провода стеклотканевой лентой;
- 2 этап – укладка жгута в оснастку;
- 3 этап – пропитка электроизоляционным составом, прессовка и последующая сушка;
- 4 этап – разбор оснастки, проверка полученной катушки рис.3 на целостность изоляции и укладка на зубец статора, либо ротора.

Прессование катушки позволяет достичь высокой плотности проводов, что повышает эффективность использования машины при соответствующей системе охлаждения. Для оценки влияния прессовки на параметры обмотки были проведены измерения индуктивностей катушек изготовленных традиционной намоткой на зубец и методом прессовки. Для исследования были сделаны 6 катушек с одинаковым количеством витков: 3 катушки, изготовленные по традиционной технологии и 3 катушки, изготовленные прессовкой. Результаты измерений представлены в таблице 1. Анализ полученных результатов показал, что благодаря прессовке, за счет более плотной укладки проводников, повышается индуктивность обмотки.

Таблица 1

Значения параметров катушки

№	Традиционная намотка	Прессовка
	L, мкГн	L, мкГн
1	4,94	5,24
2	5,03	5,34
3	5,24	5,45

Также произведена оценка коэффициента заполнения паза для обеих технологий изготовления, в результате чего было установлено, что прессовка позволяет повысить коэффициент заполнения до 10 %.

Как было сказано выше, при прессовке катушки необходимо контролировать усилие ее сжатия в оснастке для исключения возможности возникновения межвитковых замыканий. В

результате исследований автором установлено, что давление, оказываемое при запрессовке в оснастке, не должно превышать 0,8 тонны. Превышение данного показателя приводит к повреждению изоляционного слоя проводников и возникновению межвитковых замыканий.

Также следует отметить, что для улучшения теплоотвода можно применять различные пропитки, например, электроизоляционный компаунд с добавлением нитрата алюминия, позволяющий повысить теплопроводность обмотки и соответственно снизить ее температуру.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология изготовления обмоток электрических машин прессованием является перспективной. Ее применение позволит повысить эффективность работы электрических машин при соответствующей системе охлаждения.

При прессовке катушки необходимо контролировать усилие ее сжатия в оснастке для исключения возможности возникновения межвитковых замыканий. Давление, оказываемое при запрессовке в оснастке, не должно превышать 0,8 тонны. Превышение данного показателя приводит к повреждению изоляционного слоя проводников и возникновению межвитковых замыканий.

Одной из основных тенденций развития прессованных обмоток является использование новых материалов. Прогресс в области нанотехнологий и разработка новых композитных материалов позволяют создавать обмотки с высокой механической прочностью и теплопроводностью, что способствует улучшению теплоотвода и защите от перегрева.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин.

2 Hybrid-elektrische Antriebssysteme für Luftfahrzeuge und synthetischer Kraftstoff Dr. Frank Anton, Siemens AG eAircraft [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www-docs.b-tu.de/wirtschaft/public/FORUM%20I%20-%203.%20Dr.%20Frank%20Anton%2C%20Siemens.pdf>

3 Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings A.G. Jack, B.C. Mecrow [электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/3170971\\_Permanent-magnet\\_machines\\_with\\_powdered\\_iron\\_cores\\_and\\_prepressed\\_windings](https://www.researchgate.net/publication/3170971_Permanent-magnet_machines_with_powdered_iron_cores_and_prepressed_windings)

4 Pre-compressed and stranded aluminum motor windings for traction motors James Widmer, Richard Martin [электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/304408882\\_Pre-compressed\\_and\\_stranded\\_aluminum\\_motor\\_windings\\_for\\_traction\\_motors](https://www.researchgate.net/publication/304408882_Pre-compressed_and_stranded_aluminum_motor_windings_for_traction_motors)

### ОБ АВТОРАХ

**СУЛТАНГАРЕЕВ Дамир Уралович**, студент ПИШ «Моторы будущего» Уфимский университет науки и технологий.

### METADATA

**Title:** Pressed windings of electric machines.

**Authors:** <sup>1</sup> D. U. Sultangareev

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa University of science and technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>sultangareev.damir@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (31), pp. 120-123, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The paper presents the advantages of the technology for manufacturing pressed windings of electrical machines. Descriptions of the technological process and special equipment for implementing this technology are presented. The results of studies of the permissible pressure on the coil during manufacturing are also presented, as well as a comparison of the electrical parameters of coils manufactured by traditional winding and pressed ones.

**Key words:** pressed winding, slot fill factor, tooling, technological process.

**About authors:**

**SULTANGAREEV Damir Uralovich**, student of the AES "Motors of the Future" Ufa University of Science and Technology