
DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-103-107
УДК 621.315.616.97+621.313.04
EDN: ITGFNJ

М.В. Потапов, П.В. Боровиков
ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», Москва, Россия

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ. ВЫБОР ИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В данной работе описан опыт РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина в области разработки погружных электроприводов для подводных аппаратов. Приведены результаты разработки электропривода для погружных аппаратов. В частности, дано краткое описание вакуумно-нагнетательной технологии нанесения изолирующих покрытий, которая используется в РФЯЦ-ВНИИТФ. Обоснован выбор и исследованы характеристики компаунда АДВ69/50 для гидроизоляции узлов статора и ротора погружного электропривода. Актуальным является создание научно-производственного задела по разработке, производству и поставке погружных электроприводов для подводных аппаратов с самыми различными функциями и назначением с применением современных отечественных электроизоляционных материалов, а их выбор является одним из важнейших этапов проектирования электрической машины, так как по существу определяет эксплуатационную надежность электрооборудования.

Процесс исследования электрических свойств и водопоглощения компаунда АДВ69/50 был произведен путем испытания образцов в морской воде.

В результате исследования свойств компаунда АДВ69/50 были получены графики изменения водопоглощения и объемного электрического сопротивления. Также представлен образец пропитанной обмотки статора, полученной с применением вакуумно-нагнетательной технологии.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод об эффективности вакуумно-нагнетательной технологии пропитки обмоток статора и применимости компаунда АДВ69/50 для гидроизоляции узлов ротора и статора погружных электроприводов.

Ключевые слова: погружной электропривод, эластомер, гидроизоляция, водопоглощение, синхронный электродвигатель на постоянных магнитах, компаунд АДВ69/50.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-103-107
UDC 621.315.616.97+621.313.04
EDN: ITGFNJ

M.V Potapov, P.V. Borovikov
Zababakhin RFNC VNIITF, Moscow, Russia

EXPERIENCE IN DEVELOPMENT OF SUBMERSIBLE ELECTRIC DRIVES. SELECTION OF INSULATING MATERIALS FOR ELECTRIC DRIVE

This paper describes the experience of RFNC VNIITF in development of submersible electric drives for underwater vehicles. Results of electric drive development for submersible are presented. Specifically, a brief description of vacuum-pressure impregnated insulation used by RFNC VNIITF is described. Characteristics of the ADV69/50 compound are investigated, and the choice of this compound for sealing stator and rotor units of submersible electric drives are validated. It is essential to set up an R&D and production basis for supply of submersible electric drives for submersibles of various functions and purposes with application of advanced Russian electric insulation materials, and selection of these materials is the most important phase of electric machine design, which governs operational reliability of electric equipment.

Для цитирования: Потапов М.В., Боровиков П.В. Опыт разработки погружных электроприводов. Выбор изолирующих материалов для электропривода. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 103–107.

For citations: Potapov M.V., Borovikov P.V. Experience in development of submersible electric drives. Selection of insulating materials for electric drive. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; Special Issue 1: 103–107 (in Russian).

The electric properties and water absorption characteristics of the ADV69/50 compound were tested on samples in seawater. In the investigations the graphs of water absorption ability and volume electrical resistance were obtained for the ADV69/50 compound. A prototype of impregnated stator winding obtained by the technology of vacuum-pressure impregnated insulation is presented. The results of investigations confirm that the vacuum-pressure impregnated insulation of stator winding provides efficient sealing, and the ADV69/50 compound is applicable for sealing rotor and stator units of submersible electric drives.

Keywords: submersible electric drive, elastomeric material, sealing, water absorption, permanent-magnet synchronous, ADV69/50 compound

The authors declare no conflicts of interest.

В настоящее время в российской судостроительной отрасли активно развивается сегмент подводного судостроения. Создаются выполняющие самые разные задачи подводные аппараты: автономные и неавтономные, с большой глубиной погружения и глубоководные – работающие на глубине до нескольких километров.

С учетом специфики использования к двигателям подводных аппаратов предъявляются гораздо более жесткие требования по сравнению с двигателями надводных кораблей.

В зависимости от требований к эксплуатации в качестве приводов могут применяться электрические двигатели различных принципов работы: асинхронные или синхронные с постоянными магнитами, сухие и маслозаполненные с системой компенсации, традиционной компоновки и кольцевого типа.

В РФЯЦ-ВНИИТФ проведена работа по созданию электропривода погружного аппарата мощностью до 50 кВт. На рис. 1 представлен двигатель погружного аппарата. В рамках работ создан значительный научно-производственный задел по разработке, производству и поставке погружных элек-



Рис. 1. Двигатель погружного аппарата

Fig. 1. Propeller of submersible

троприводов для подводных аппаратов с самыми различными функциями и назначением.

Исходя из конструктивных особенностей подводных аппаратов, а именно из-за ограниченности габаритов аккумуляторных батарей и требований по минимальным весам, на подводных аппаратах крайне важно, чтобы движительный комплекс имел максимальный КПД. Поэтому на этапе проектирования в качестве типа ЭД был выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами, потому что он обладает следующими преимуществами по отношению к другому типу ЭД – асинхронным, которые также применяются в двигателях подводных аппаратов:

- небольшие размеры двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности;
- меньшая чувствительность к колебаниям напряжения, так как их максимальный момент пропорционален напряжению в первой степени;
- строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу;
- более высокий КПД.

К недостаткам синхронных двигателей можно отнести:

- сложность конструкции;
- сравнительная сложность пуска в ход;
- трудности с регулированием частоты вращения, которое возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

На рис. 2 представлена конструкция электропривода. Электропривод состоит из узла статора, узла ротора, который является приводом гребного винта, и системы управления, обеспечивающей на статорном узле напряжения и токи заданной величины, и частоты, необходимые для вращения гребного винта. Узел статора размещается в корпусе двигателя. Узел ротора размещается на ободу гребного винта.

Узлы ротора и статора предназначены для создания крутящего момента на рабочем колесе электродвигателя. Взаимодействие магнитного полюса ротора с токовым слоем, образованным токами, протекающими по обмотке статора, обеспечивает создание электромагнитного момента, величина

которого зависит от взаимного положения «токового слоя» и полюса ротора.

Статор содержит магнитопровод, в пазах которого уложена трехфазная обмотка, равномерно распределенная по окружности, и ротор магнитной многополюсной системы, состоящей из магнитного основания (роторного цилиндра), на котором размещены полюса в виде блоков с постоянными магнитами, намагниченных в радиальном направлении.

Узлы статора и ротора двигателя в зоне рабочего зазора защищены от воды неметаллическими оболочками. Для защиты рабочего зазора между статором и ротором от ферромагнитных частиц, которые могут находиться в морской воде во взвешенном состоянии, используются магнитные фильтры.

Одним из важнейших этапов проектирования электрической машины является выбор электроизоляции обмоток, так как по существу данный этап определяет эксплуатационную надежность электрооборудования. В связи с этим в РФЯЦ-ВНИИТФ уделяется большое внимание разработкам новых технологий применения современных электроизоляционных материалов.

Предприятием РФЯЦ-ВНИИТФ была освоена и отработана технология вакуумно-нагнетательной пропитки изоляции. Данная технология обладает рядом достоинств:

- глубокая пропитка изоляции обеспечивает отсутствие в ней воздушных и газовых включений, что приводит к увеличению электрической прочности и значительно повышает напряжение ионизации изоляции;
- обладает высокой жесткостью и небольшими значениями тангенса угла диэлектрических потерь;
- устойчива к действию повышенных температур.
- Процесс вакуумно-нагнетательной пропитки изоляции обмоток электрических машин включает в себя следующие этапы:
- сушка до пропитки;
- пропитка обмоток под вакуумом с последующей выдержкой под повышенным давлением;
- запечка и сушка после пропитки.

Сушка до и после пропитки необходима для удаления влаги из обмоток, а также для снятия внутренних напряжений в эмалевой изоляции проводов, которые возникают при эмалировании провода и катушки.

Пропитка – это процесс заполнения обмотки и ее изолировки специальными лаками или составами с последующей запечкой. В процессе пропитки воздушные включения и пустоты в обмотках

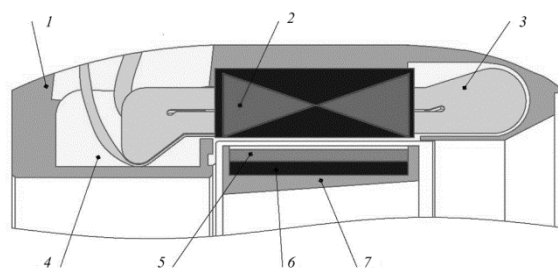


Рис. 2. Конструкция погружного электропривода :
 1 – корпус; 2 – магнитопровод статора; 3 – обмотка статора пропитанная; 4 – компаунд АДВ69/50; 5 – магнит ротора; 6 – пакет ротора; 7 – гребной винт

Fig. 2. Submersible electric drive: 1 – body; 2 – stator magnetic conductor; 3 – impregnated stator winding; 4 – ADV69/50 compound; 5 – rotor magnet; 6 – rotor pack; 7 – propeller

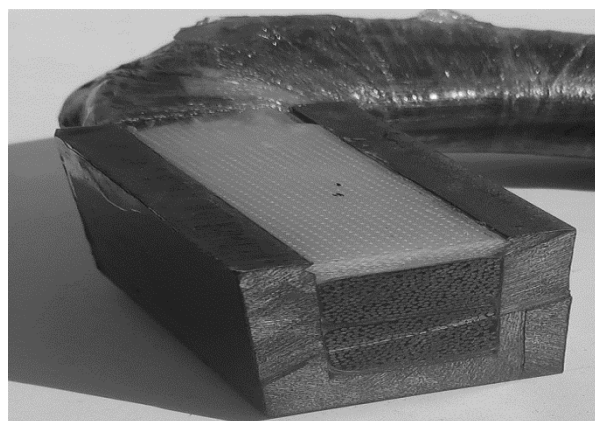


Рис. 3. Образец обмотки, пропитанной по технологии вакуумно-нагнетательной пропитки изоляции

Fig. 3. Sample of winding with vacuum-pressure impregnated insulation

и изоляции заполняются компаундом, что приближает ее конструкцию к монолиту. Пропитка цементирует витки обмоток, снижает механический износ изоляции, замедляет процессы теплового старения и увлажнения электроизоляционных материалов, так как она уменьшает площадь их соприкосновения с окружающей средой. При этом повышается электрическая прочность изоляции вследствие заполнения пор и капилляров обмотки лаками, имеющими более высокую электрическую прочность, чем воздух. Пропитка снижает превышение температуры обмоток, так как теплопроводность лаков намного выше теплопроводности воздуха.

На рис. 3 представлен образец обмотки, пропитанной по технологии вакуумно-нагнетательной пропитки изоляции. В качестве пропиточного мате-

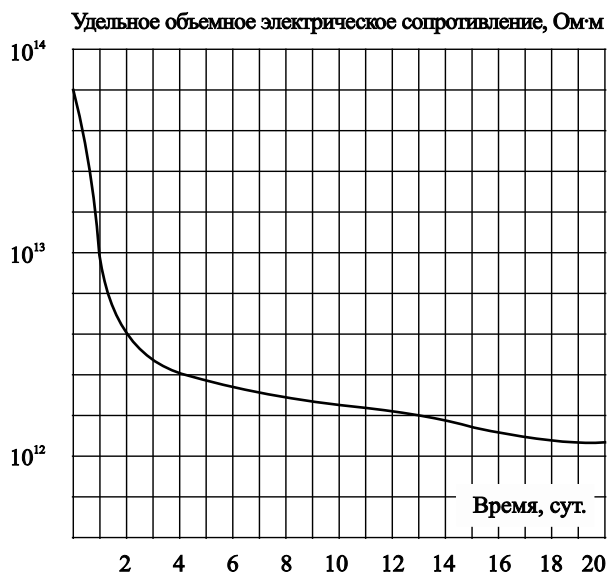


Рис. 4. Изменение удельного объемного электрического сопротивления компаунда АДВ-69/50 в процессе выдержки в морской воде

Fig. 4. Variation of ADV69/50 volume electric resistance at seawater exposure

риала был применен отечественный электроизоляционный компаунд ДИЭЛ-ПК-25.

Для предотвращения контакта обмоток статора с корпусом двигателя, а также защиты обмоток статора и ротора от морской воды и ударных нагрузок и вибраций полости между статором и двигателем и полости между ротором и гребным винтом заполняют эластомером.

В качестве эластомера был выбран компаунд АДВ-69/50, так как он обладает следующими достоинствами:

- гидрофобный: на стадии отверждения и при эксплуатации;
- устойчивый к гидролизу;
- самозатухающий;
- устойчивый к термоударам и термоциклам;
- экзотермичный при отверждении;
- эксплуатируется при температуре от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- механическая стойкость к ударным и вибрационным механическим воздействиям.

Данный эластомер поставляется отечественная научно-производственная фирма «Адгезив». Все компоненты эластомера отечественные, что очень важно, учитывая современные реалии.

Для определения возможности применения эластомера АДВ-69/50 в разрабатываемом электроприводе были проведены следующие исследования:

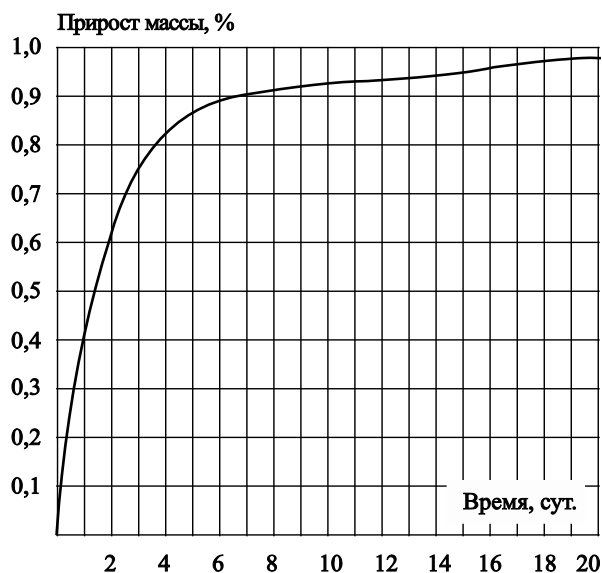


Рис. 5. Изменение прироста массы компаунда АДВ-69/50 в процессе выдержки в морской воде

Fig. 5. Variation of ADV69/50 mass increase at seawater exposure

определено водопоглощение и объемное электрическое сопротивление компаунда в процессе выдержки в морской воде при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Удельное объемное электрическое сопротивление определяли при постоянном напряжении по ГОСТ 6433.2-71 с использованием тераомметра Е6-13А. Испытаниям подвергали отвержденные компаунды. Образцы – диски диаметром 100 мм, толщиной 1 мм. Применяли электроды из отожженной алюминиевой фольги толщиной 10 мкм.

Исходя из полученных данных, представленных в виде графика на рис. 4, удельное объемное электрическое сопротивление стабилизируется на уровне 10^{12} Ом·м, что более чем достаточно для нормальной работы электродвигателя.

Выдержку образцов в морской воде проводили в соответствии с ГОСТ 10315-75 при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вес образцов определяли на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. В результате был получен график, представленный на рис. 5.

Оценка водопоглощения испытанных образцов компаунда АДВ 69/50 показала, что максимальное значение составляет около 1%, причем основной прирост массы наблюдается за первые 3–4 суток, а затем практически стабилизируется.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод об эффективности вакуумно-нагнетательной технологии пропитки обмоток ста-

тора и применимости компаунда АДВ69/50 для гидроизоляции узлов ротора и статора погружных электроприводов.

Список использованной литературы

1. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины : учебник для вузов : в 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1: Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах и их устройство. Основные вопросы теории и конструкции трансформаторов и асинхронных машин. Москва : Изд-во МЭИ, 2004. 652 с.
2. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин : В 2 книгах. Кн. 2 / В.Г. Огоньков, С.В. Серебрянников, В.Г. Сяков, С.А. Яценко. Москва : Издательский дом МЭИ, 2012. 304 с.
3. *Трубачев С.Г.* Разработка и исследование изоляции типа монолит для статорных обмоток гидрогенераторов : дис. ... канд. техн. наук / С.Г. Трубачев, ВЭИ. Москва, 1974.

References

1. *Ivanov-Smolenskiy A.V.* Electric machines: handbook for universities: in 2 volumes, revised and complemented 2nd edition. V. 1: Electromechanical conversion of energy and design of electric machines. Main issues of theory and design of transformers and asynchronous machines. Moscow: Izd-vo MEI, 2004. 652 p. (in Russian).

2. Electric insulation materials and insulation systems for electric machines: in 2 books. Book 2/ V.G. Ogonkov, S.V. Serebryannikov, V.G. Syakov, S.A. Yashchenko. Moscow: Izd-vo MEI, 2012. 304 p. (in Russian).
3. *Trubachev S.G.* Development and investigation of monolithic type insulation for hydro-generator stator winding: Candidate of Technical Sciences Dissertation / Trubachev S.G., VEI, Moscow, 1974 (in Russian)

Сведения об авторах

Потапов Михаил Витальевич, ведущий инженер-конструктор ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина». Адрес: 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 12. E-mail: mikhail.potapov109@yandex.ru.

Боровиков Павел Валентинович, к.т.н., заместитель начальника отделения ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина». Адрес: 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 12. E-mail: pvborovikov@vei.ru.

About the authors

Mikhail V. Potapov, leading designer, Engineer, Zababakhin RFNC VNIITF. Address: Krasnoznamenaya st., 12, Moscow, Russia, post code 111250. E-mail: mikhail.potapov109@yandex.ru.

Pavel V. Borovikov, Cand. Sci. (Eng.), deputy head division, Zababakhin RFNC VNIITF. Address: Krasnoznamenaya st., 12, Moscow, Russia, post code 111250. E-mail: pvborovikov@vei.ru.

Поступила / Received: 13.07.23
Принята в печать / Accepted: 27.07.23
© Потапов М.В., Боровиков П.В., 2023