

## ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА ИЗОЛЯЦИИ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ ДЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

*Розглянуто доцільність застосування високовольтної системи ізоляції з підвищеною теплопровідністю для турбогенераторів, наведено її основні характеристики, показано, що використання даної ізоляції дозволяє за рахунок підвищення ефективності охолодження домогтися збільшення вихідної потужності на 20 % для турбогенераторів непрямого повітряного і водневого охолодження.*

**Вступление.** Концепции, основанной на использовании слюды для изоляции обмоток высоковольтных электрических машин, уже более 50 лет. Разработки и оптимизация в этой области достигли такого уровня, что добиться дальнейшего улучшения параметров становится все сложнее. И так, в состав современной изоляции входят: слюдяная бумага (около 65 %), компаунд (25 %), стеклоткани и другие вспомогательные материалы (10 %) [2]. К сожалению, все эти материалы хоть и имеют отличные электроизоляционные свойства, однако одновременно обладают сравнительно низкой теплопроводностью.

В турбогенераторах с непосредственной системой охлаждения, где полые проводники охлаждаются водородом или дистиллятом, тепло, создающееся проводником с током, передается непосредственно хладагенту, а значит, теплопроводность главной изоляции паза не имеет значительного влияния на эффективность системы охлаждения.

Иная ситуация в турбогенераторах с косвенным охлаждением, где сердечник статора охлаждается водородом или воздухом. Электрические потери, выделяющиеся в обмотке, создают тепло, которое проходит к хладагенту через главную пазовую изоляцию. Все чаще используется косвенное охлаждение турбогенераторов, так как нет необходимости в использовании дополнительного оборудования, применяющегося в непосредственном охлаждении. Это позволяет, в свою очередь, упростить конструкцию, а следовательно, повысить надежность работы машины. Тем не менее слюдяная изоляция действует как тепловой барьер, ограничивающий эффективность системы охлаждения и тем самым ограничивает выходную мощность и КПД генератора. Диапазон теплопроводности слюдяной изоляции составляет от 0,25 до 0,30 Вт/мК, в то время как значения для меди или стали в 1500 или 300 раз выше (рис. 1) [6].

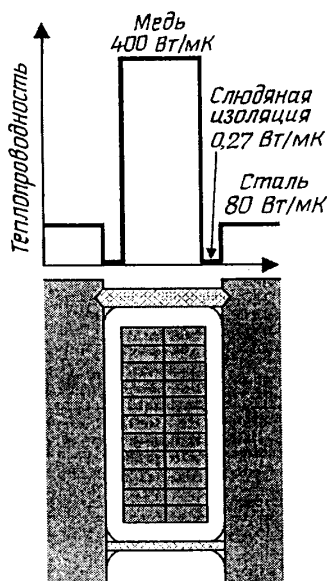


Рис. 1

Таким образом, необходимо повысить тепловую проводимость изоляции, что позволит в свою очередь понизить тепловой перепад и улучшить тепловое состояние генератора в целом.

Для решения поставленной задачи определим возможные пути передачи тепла от проводника к хладагенту:

- уменьшение толщины главной изоляции;
- повышение теплопроводности слюдяной изоляции;
- повышение рабочей температуры с применением изоляции со старшим классом нагревостойкости.

Первое решение применимо при условии достижения высокой диэлектрической прочности предполагаемой изоляции, что в наше время недоступно для турбогенераторов.

Второй подход – применение системы изоляции с высокой теплопроводностью (НТС) – является более целесообразным [4]. Иными словами, показатели турбогенератора могут быть улучшены без изменения формы катушки и толщины главной изоляции; увеличится также и срок безотказной работы электрической машины. На рис. 2 показаны последствия

применения системы *НТС* изоляции с удвоенной теплопроводностью при проектировании турбогенератора с косвенным водородным охлаждением. Применение данной системы позволяет снизить температуру катушки статора на  $\geq 10^\circ\text{C}$  или увеличить выходную мощность на 10 % без конструктивных изменений и на 20 % с оптимизацией системы вентиляции. Это позволяет значительно расширить диапазон выходных мощностей турбогенераторов с косвенным охлаждением. *НТС* технология применима не только для новых турбогенераторов, но и для тех, которые находятся в ремонте.

**Проектирование изоляционной системы с высокой теплопроводностью.** Основной концепцией *НТС* изоляции является применение в ее составе вспомогательных наполнителей, имеющих высокую теплопроводность, эффективность которых показана в работе [7]. Однако не так просто выбрать соответствующий материал наполнителя и включить его в общий состав. Основные предъявляемые к нему требования: высокие теплопроводность и сопротивление частичным разрядам; совместимость со связующим и пропиточным компаундом; химическая стабильность и низкая токсичность; высокое качество производства и приемлемая цена.

В табл. 1 приведен перечень твердых неорганических веществ, обладающих изоляционными свойствами и высокой теплопроводностью.

Учитывая перечисленные выше требования, только *BN* (hexagonal) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  пригодны для использования в составе высоковольтной изоляции. Обычная слюдяная изоляция, используемая в большинстве генераторов, состоит из слюдяной бумаги, смолы и стеклоткани (рис. 3: *a* – теплопроводность материалов, применяемых в обычной слюдяной изоляции; *b* – способы размещения наполнителей [3]).

Где разместить наполнитель? Можно добавить его в слюдяную бумагу, однако, как показали тесты, любое включение примесей вызывает ухудшение ее изоляционных свойств, хотя коэффициент теплопроводности немного увеличится. Поскольку компаунд является связующим компонентом с низкой теплопроводностью (по сравнению со слюдой и стеклом), желательно добавить наполнитель между ячейками стеклоткани.

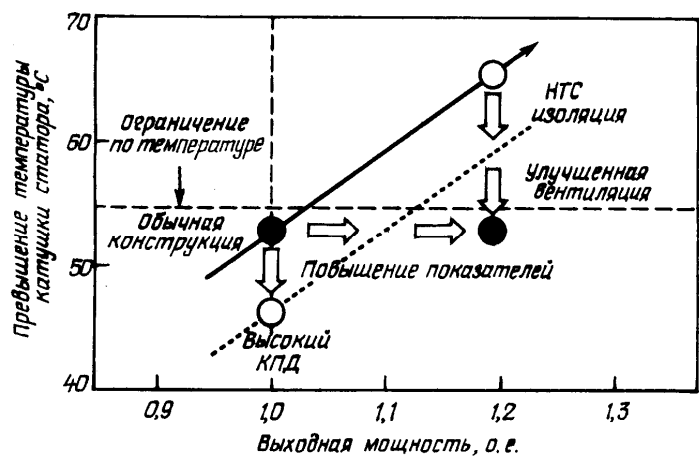


Рис. 2

Таблица 1

Название вспомогательного наполнителя	Значение теплопроводности, Вт/мК
Алмаз	2000
BN (cubic)	1300
BeO	370
AlN	150
BN (hexagonal)	40-120
SiC	25-100
$\text{Si}_3\text{N}_4$	50
MgO	25-50
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25-40

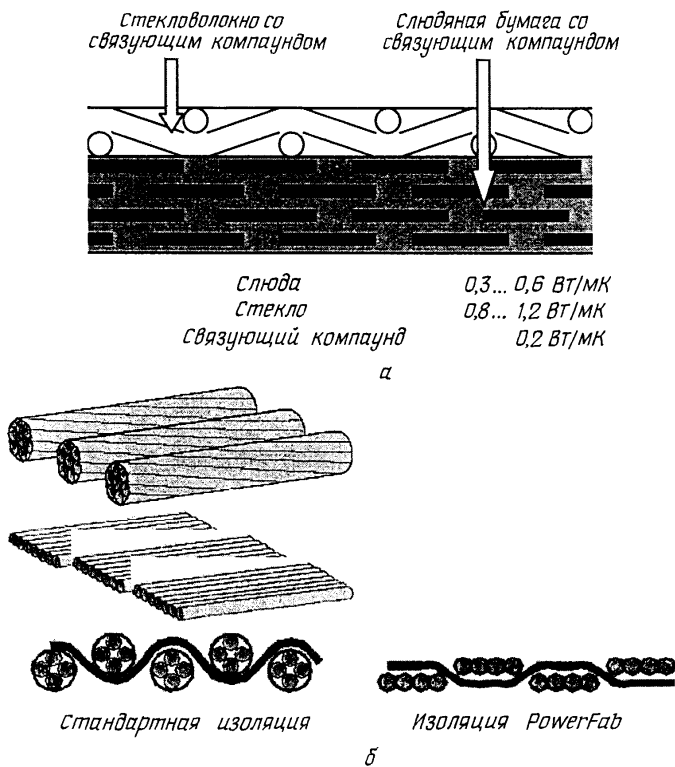


Рис. 3

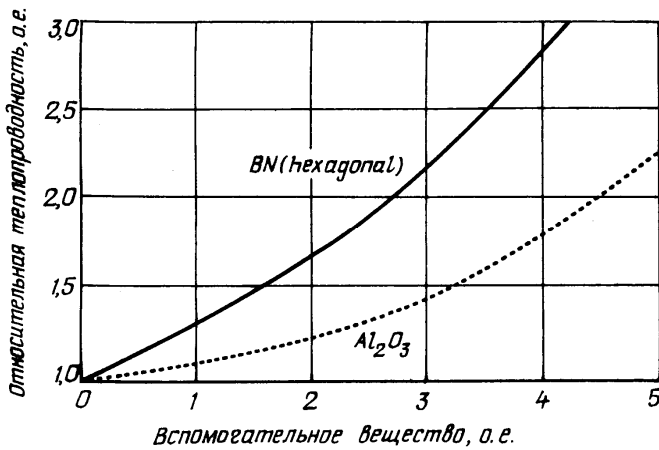


Рис. 4

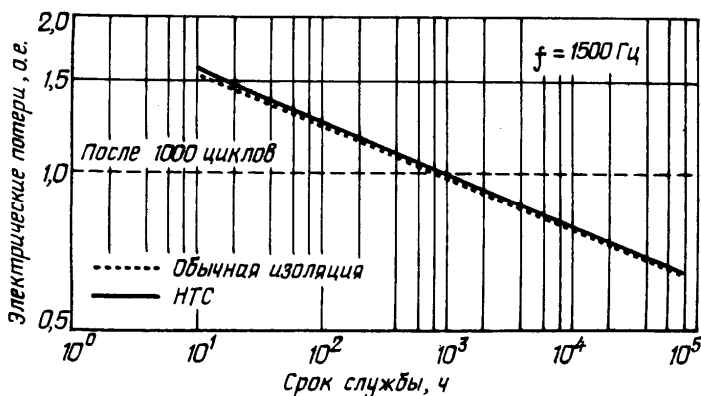


Рис. 5

Технология VPI (вакуумно-нагнетательной пропитки) предполагает два основных способа введения наполнителя в слюдяную изоляцию: либо в виде ленты, либо как часть пропиточного компаунда в процессе VPI.

Теплопроводность главной изоляции в зависимости от типа и количества добавленного наполнителя представлена на рис. 4, где показано, что по сравнению с оксидом алюминия для достижения целевого показателя теплопроводности BN требуется меньшее количество, кроме того, он обладает лучшим кристаллическим строением, более абразивным в слюде. Но  $Al_2O_3$  дешевле, однако повысить теплопроводность с помощью этого вещества можно только на 50 %.

Применение пропитки и проведенные испытания высоковольтной изоляции с наполнителем BN показали целесообразность использования этого вспомогательного вещества. Некоторые свойства слюдяной ленты с VPI-технологией приведены в табл. 2.

**Оценка испытаний НТС изоляции.** В системе НТС в связи с добавлением наполнителя уменьшается объемная часть слюды. В результате исследований [6] было доказано, что это не отражается на диэлектрических свойствах изоляции, что подтверждает успешное развитие данной концепции (рис. 5).

Испытания на изгиб и разрыв показали, что деформация НТС изоляции происходит при тех же усилиях, что и обычной, сравниваемые характеристики находятся в близких от исходных пределах. Это еще раз оправдывает использование наполнителей, обеспечивающих высокую теплопроводность высоковольтной изоляции [6].

**Выводы.** Применение наполнителей  $Al_2O_3$  и BN позволило создать систему изоляции с высокой теплопроводностью ( $\lambda=0,48$  и  $0,58$  Вт/мК соответственно изоляция Micadur, фирма АВВ) [5], причем ее толщина и геометрия паза остаются в тех же пределах.

Новая технология обеспечива-

ет значительное сокращение рабочей температуры катушки статора и высокую производительность машины без каких-либо принципиальных ее изменений. Это указывает на надежность в эксплуатации и увеличение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) турбогенератора, что является актуальным на современном энергетическом рынке [1].

Используя систему *НТС* изоляции и тем самым снижая температуру катушки статора за счет повышения эффективности охлаждения, можно добиться увеличения выходной мощности на 20 % для турбогенераторов косвенного воздушного и водородного охлаждения (рис. 6) [6]. Это означает, что верхний предел может вырасти на 400 и 600 МВА соответственно. Другими словами, создается возможность перехода на новую систему охлаждения, что позволяет обеспечить высокую степень надежности в сочетании с низкой стоимостью обслуживания, а также повысить взрыво- и пожаробезопасность эксплуатируемого оборудования.

Таблица 2

Изоляция	Samicarog (обычная)	Samicarog НТС
Толщина, мм	0,15	0,20
Жесткость, Н/м	39	54
Пористость, с/100мл	840	960
Пропитка*, ч	1,0	2,0

\* Время, измеренное до полного проникновения в 6 мм, смола вязкостью 30...50 мПа·с и давление в 4 бара [6].

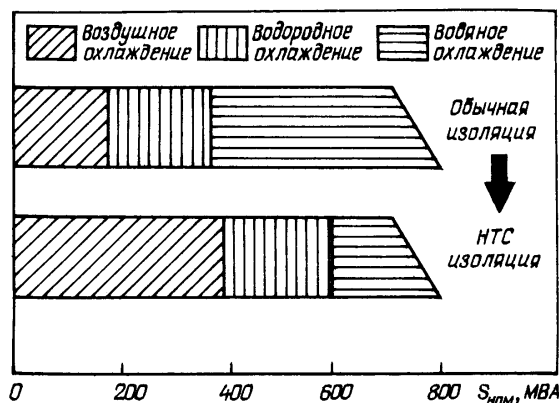


Рис. 6

*Рассмотрена целесообразность применения высоковольтной системы изоляции с повышенной теплопроводностью для турбогенераторов, приведены ее основные характеристики, показано, что использование данной изоляции позволяет за счет повышения эффективности охлаждения добиться увеличения выходной мощности на 20 % для турбогенераторов косвенного воздушного и водородного охлаждения.*

*This article considers the feasibility of high-voltage insulation system with high thermal conductivity for turbo generators. It is shown that the use of this isolation allows to increase power output by 20 % for indirect air and hydrogen cooled turbo generators.*

1. Шидловский А.К., Федоренко Г.М. Инновационно-технологические приоритеты модернизации в электроэнергетике // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 3–6.
2. Allison J., Brutsch R. Selection and Application of Insulating Materials // Their Importance in VPI Insulation for Rotating Machines, Coil Winding, Insulation & Electrical Manufacturing Conference in Berlin, 1998. – P. 137–144.
3. Marek P., Grubelnik W., Koerbler B. High Performance Insulation System For HV Rotating Machines // Isovolta AG, System Development, A-8402 Werndorf, Austria, 10<sup>th</sup> Insucon International Conference Birmingham, 2006.
4. Miller M.L., Emery F.T. Thermal Conductivity of High Voltage Stator Coil Groundwall Insulation // EIC Conference in Chicago, 1997. – P. 619–622.
5. Stephan C.-E., Liptak G., Schuler R. An improved insulation system for the newest generation of stator windings of rotating machines // Cigre, Session-1994, Group 11, 11-101.
6. Tari M., Yoshida K., Sekito S., Allison J., Brutsch R., Lutz A. A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators // Coil Winding, Insulation and Electrical Manufacturing Conference, Berlin, 2001.
7. European Patent Specification 0 266 602 (ASEA AB), Coil for electrical machines and method of manufacturing the coil. Published 1993.