

Расчет температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS

Токовая нагрузка кабеля рассчитывается исходя из температуры, при которой изоляция может работать длительное время. Тепловой поток, идущий от жилы, в соответствии с законом Джоуля равен

$$P = I_{\text{ж}}^2 R_{\text{ж}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{ж}}$ — ток в токопроводящей жиле, $R_{\text{ж}}$ — электрическое сопротивление жилы.

Тепловой поток, проходя через среду окружающую жилу (изоляция, защитные покрытия и т.д.), создает перепад температуры между жилой и окружающей средой в соответствии с тепловым законом Ома:

$$\Delta T = PS, \quad (2)$$

где $\Delta T = T_{\text{ж}} - T_0$ — перепад температуры между жилой и окружающей средой, $T_{\text{ж}}$ — температура жилы, T_0 — температура окружающей среды.

Из уравнений (1) и (2) выводится длительно допустимый ток нагрузки (номинальный ток) [1–4]:

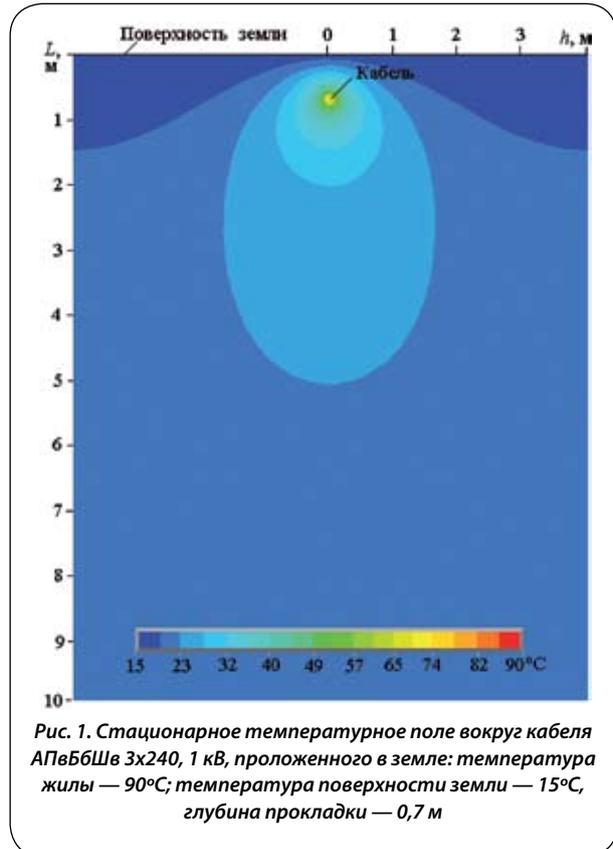
$$I_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{T_{\text{ж}} - T_0}{R_{\text{ж}} S}}, \quad (3)$$

где $S = S_{\text{из}} + S_{\text{з.п.}} + S_0$; $S_{\text{из}}$ — тепловое сопротивление изоляции; $S_{\text{з.п.}}$ — тепловое сопротивление защитных покрытий; S_0 — тепловое сопротивление окружающей среды.

В стандарте МЭК [4] приводятся формулы, номограммы и таблицы для расчета тепловых сопротивлений кабелей различного конструктивного исполнения и всевозможных условий их прокладки.

ANSYS позволяет моделировать температурные поля в кабеле и окружающей среде и по ним определять ток нагрузки в стационарном и нестационарном режимах.

На рис. 1 представлено стационарное температурное поле вокруг кабеля АПвБбШв 3х240, 1 кВ, проложенного в земле: температура жилы — 90°C, глубина прокладки — 0,7 м. Интенсивность объемного тепловыделения, которая задавалась на жиле функцией Preprocessor — Loads — Define Loads — Apply — Thermal — Heat Generat — On Areas, соответствовала температуре 90°C. Граничные условия:



поверхность земли — изотерма (15°C), на других границах — адиабата. Удельное тепловое сопротивление земли 1,2 м °C/Вт.

По методике МЭК [3, 4] вычисления теплового сопротивления кабеля с тремя секторными жилами

$$S_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{из}} G}{2\pi}, \quad G = 3F_2 \ln\left(\frac{d_a}{2r_1}\right), \quad F_2 = 1 + \frac{3t}{2\pi(d_x + t) - t},$$

производятся в следующей последовательности:

где $\sigma_{\text{из}}$ — удельное тепловое сопротивление изоляции, G — геометрический фактор, d_a — наружный диаметр поясной изоляции, r_1 — радиус сектора, d_x — диаметр круглой жилы, имеющий площадь поперечного сечения равной секторной, t — толщина изоляции между жилами.

Тепловое сопротивление защитных покрытий рассчитывается по формуле

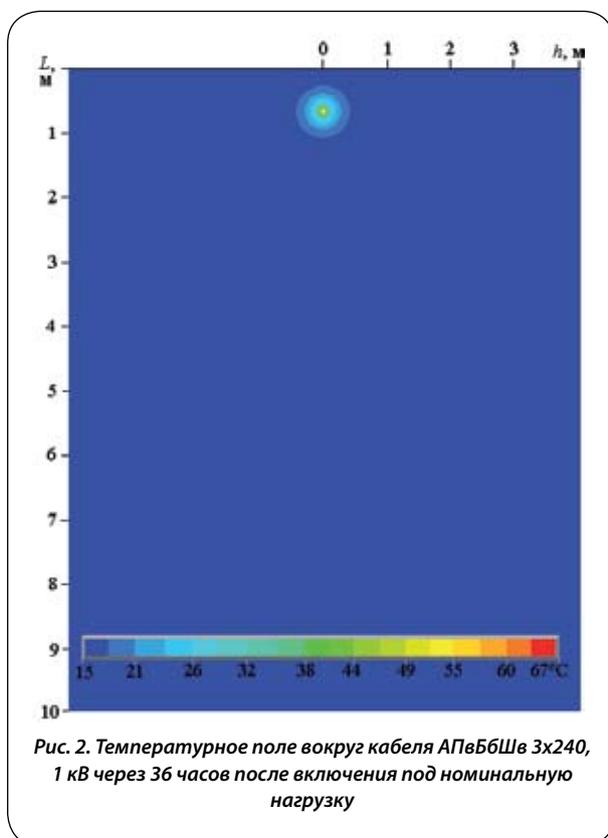
$$S_{з.п.} = \frac{\sigma_{з.п.}}{2\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right),$$

где $\sigma_{з.п.}$ — удельное тепловое сопротивление защитных покровов, ($R_2 - R_1$) — толщина слоя.

Тепловое сопротивление земли рассчитывается по формуле

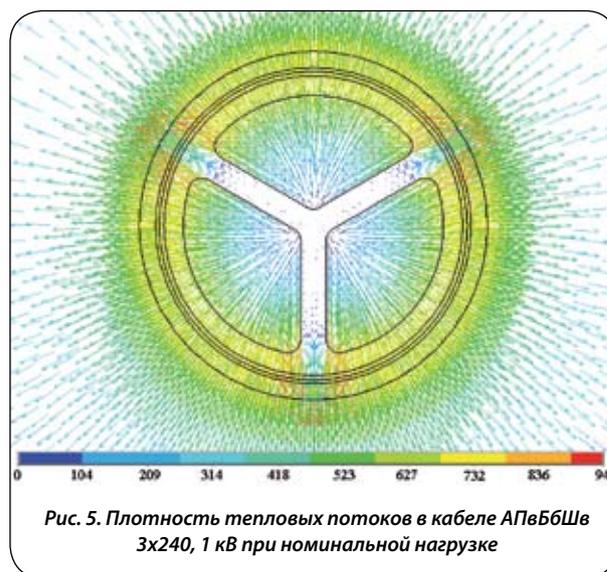
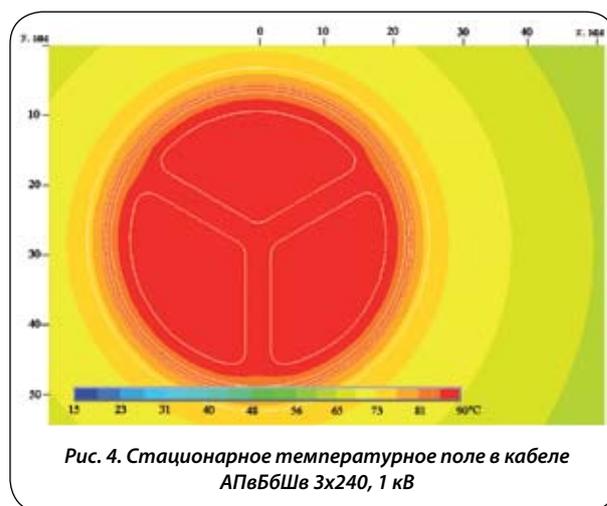
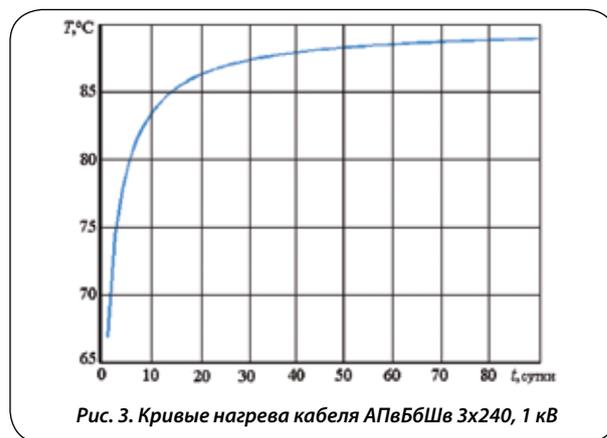
$$S_3 = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln\left(\frac{2L}{D_k}\right),$$

где σ_3 — удельное тепловое сопротивление земли, L — глубина прокладки кабеля, D_k — диаметр кабеля.



На рис. 2 представлено температурное поле вокруг кабеля АПвБбШв 3х240, 1 кВ через 36 часов после включения под номинальную нагрузку. За это время жила кабеля нагрелась только до 67°C. На стационарный режим кабель выйдет более чем через 90 суток (рис. 3).

Распределение температуры в кабеле АПвБбШв 3х240, 1 кВ в стационарном состоянии представлено рис. 4, плотность тепловых потоков на рис. 5. Тепловое сопротивление алюминиевых жил существенно меньше тепловых сопротивлений других



элементов конструкции кабеля, поэтому все жилы имеют температуру 90°C. Номинальный ток нагрузки, вычисленный по температурному полю (рис. 4), равен 383 А (в методике МЭК 390 А).

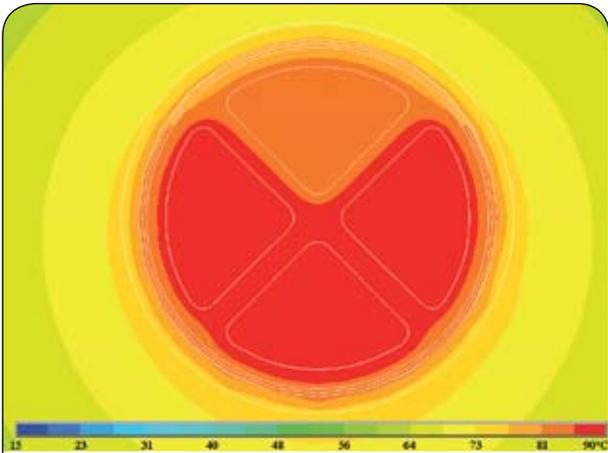


Рис. 6. Стационарное температурное поле в кабеле АПвБШв 4x240, 1 кВ

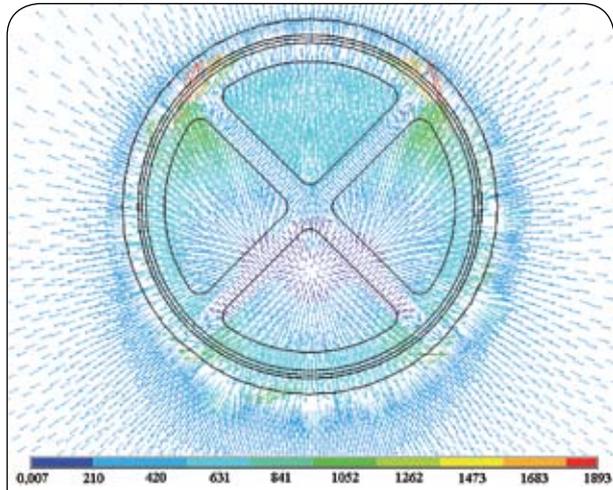


Рис. 7. Плотность тепловых потоков в кабеле АПвБШв 4x240, 1 кВ при номинальной нагрузке

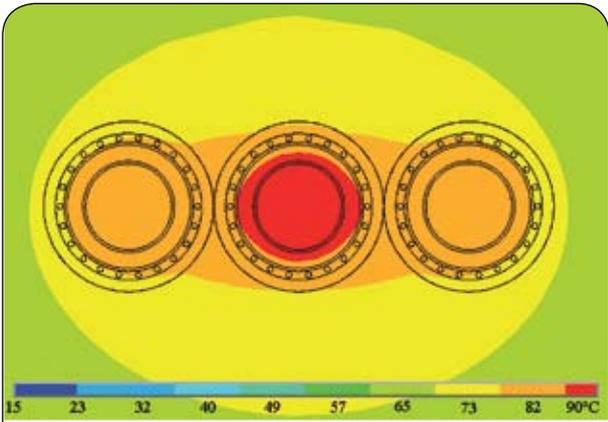


Рис. 8. Стационарное температурное поле в кабеле АПвП 3x240, 10 кВ

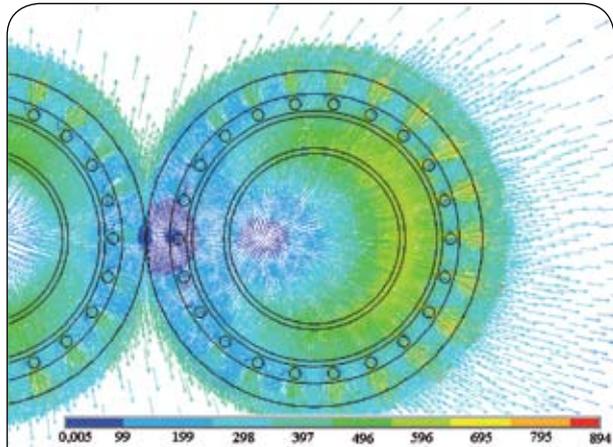


Рис. 9. Плотность тепловых потоков в кабеле АПвП 3x240, 10 кВ при номинальной нагрузке

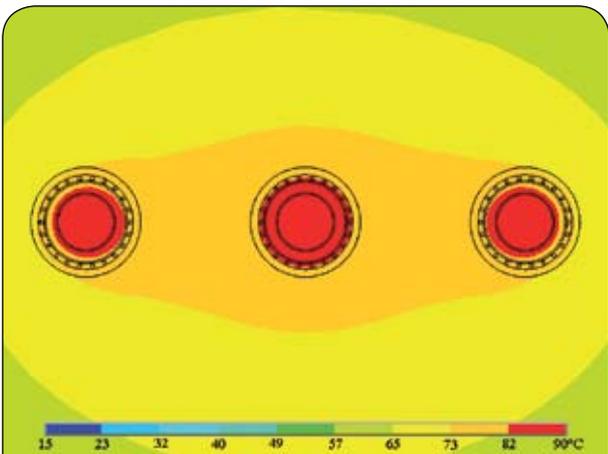


Рис. 10. Стационарное температурное поле в кабеле АПвП 3x240, 10 кВ, расстояние между кабелями равно диаметру

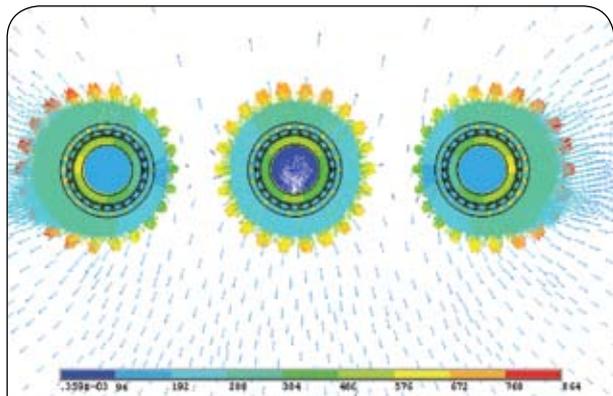


Рис. 11. Плотность тепловых потоков в кабеле АПвП 3x240, 10 кВ при номинальной нагрузке, расстояние между кабелями равно диаметру

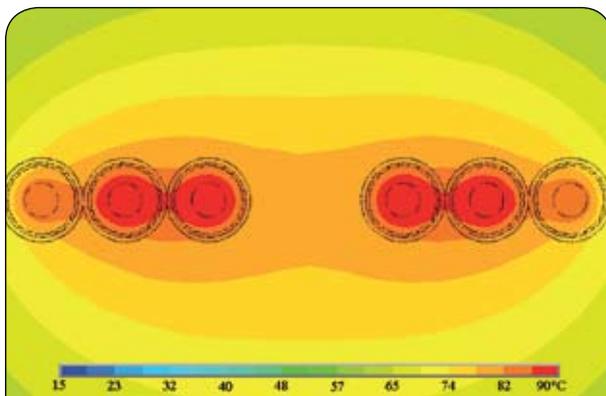


Рис. 12. Стационарное температурное поле двух кабельных линий (ПвП 3х240, 35 кВ)

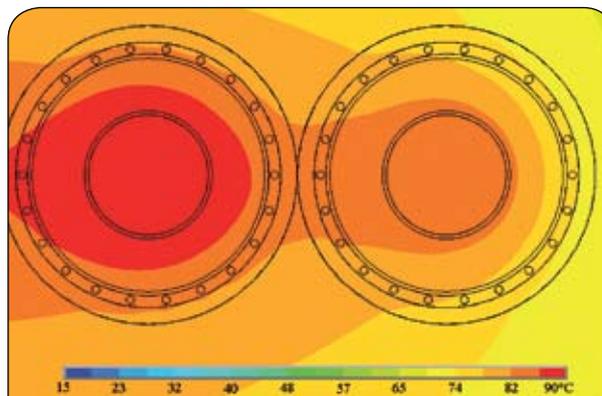


Рис. 13. Увеличенный фрагмент рис. 12

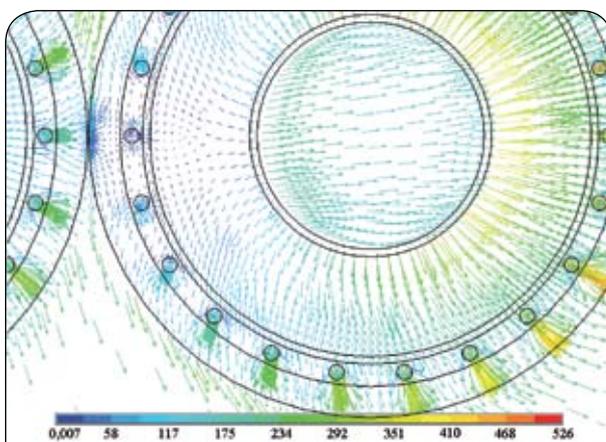


Рис. 14. Плотность тепловых потоков в кабеле ПвП 3х240, 35 кВ (крайний правый рис. 12) при номинальной нагрузке

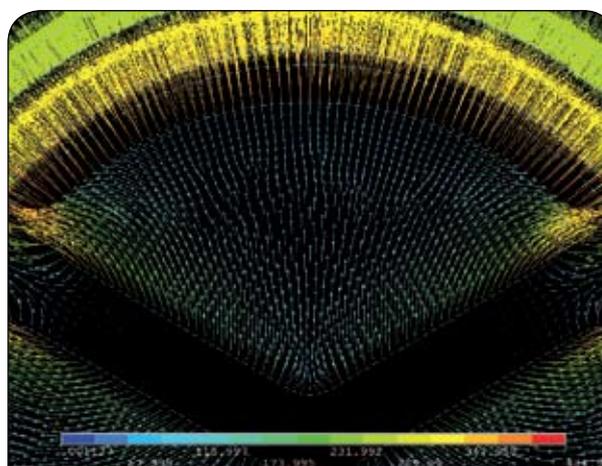


Рис. 15. Плотность тепловых потоков в кабеле ААБ2лШв 3х240, 6 кВ

Распределение температуры в 4-х жильном кабеле не симметрично, так как по нулевой жиле ток не протекает. На рис. 6 представлено температурное поле в кабеле АПвБ6Шв 4х240, 1 кВ, на рис. 7 — плотность тепловых потоков. Номинальный ток нагрузки, вычисленный по температурному полю (рис. 6), равен 390 А (в методике МЭК такой кабель отсутствует).

На рис. 8 представлено стационарное температурное поле в кабеле АПвП 3х240, 10 кВ. Центральная жила имеет температуру 90°C, две другие — 82°C, т.е. кабель нагружен неравномерно. Следовательно, срок службы кабелей будет различным. На рис. 9 видно, что наибольшая интенсивность тепловых потоков на крайних кабелях. Кроме того, от проволок экрана идут тепловые потоки, что снижает токовую нагрузку кабеля. Номинальный ток нагрузки 391 А, (по методике МЭК 437 А).

На рис. 10. Представлено стационарное температурное поле в кабеле АПвП 3х240, 10 кВ, расстояние между кабелями равно диаметру. Номинальный ток нагрузки 405 А, (по методике МЭК — 425 А). Несмотря на то, что увеличение расстояния приводит к увеличению потерь в экране (от 1,77 до 3,63 Вт/м при сечении экрана 25 мм²), ток нагрузки увеличился с 391 до 405 А за счет лучшего теплоотвода.

На рис. 11 Представлена векторная диаграмма плотности тепловых потоков в кабеле АПвП 3х240, 10 кВ при номинальной нагрузке, расстояние между кабелями равно диаметру. Наибольшая плотность тепловых потоков у крайних кабелей.

На рис. 12. представлено стационарное температурное поле двух кабельных линий (АПвП 3х240, 35 кВ). Расстояние между линиями 60 мм. Крайние кабели имеют температуру 82°C, т.е. кабельные линии нагружены неравномерно. Номинальный ток

нагрузки 401 А, (по методике МЭК для одной кабельной линии — 551 А). Близкое расположение линий существенно снижает ток нагрузки.

На рис. 14 представлена плотность тепловых потоков в кабеле ПвП 3х240, 35 кВ (крайний правый кабель на рис. 12) при номинальной нагрузке. Хорошо видны тепловые потоки, идущие от проволок экрана. В жиле крайнего кабеля тепловой поток идет слева направо.

На рис. 15 представлена плотность тепловых потоков в кабеле ААБ2лШв 3х240, 6 кВ с пропитанной бумажной изоляцией при номинальной нагрузке. В токопроводящей жиле наибольшая плотность теплового потока на ребре сектора, в этом же месте наибольшая напряженность электрического поля.

Ansys позволяет моделировать тепловые поля кабелей и по ним рассчитывать токовую нагрузку. В отличие от аналитических выражений в Ansys можно решать поставленные задачи для кабелей различного конструктивного исполнения и условий прокладки (в трубе, канале, блоке и т.д.).

Литература

1. Привезенцев В.А. и др. Основы кабельной техники. — М.: » Энергия», 1967. — 464с.
2. Основы кабельной техники: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Леонов, [и др.]; под ред. И.Б. Пешкова. — М.: Изд. центр «Академия», 2006. — 432 с.
3. International Standard CEI 287-1-1. Electric cables — Calculation of the current rating. Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses — Section 1: General.
4. International Standard CEI 287-2-1. Electric cables — Calculation of the current rating. Part 2: Thermal resistance — Section 1: Calculation of thermal resistance.

Д-р техн. наук Л.А. Ковригин

*Студенты: Н.А. Белкин, Р.А. Биянов,
А.С. Карсаков, С.Р. Шангараев*

*Пермский государственный
технический университет*

*Кафедра «Конструирования и технологии
электрической изоляции»*

Журнал «КАБЕЛЬ-news» всегда выступал и выступает за поддержку российской науки и образования. На страницах журнала регулярно печатаются позиции и мнения ведущих ученых, специалистов целого ряда направлений электротехнической отрасли. Это позволяет не только держать руку на пульсе самых интересных, передовых научных разработок, но и открывает хорошую возможность для полемики. В спорах, как известно, рождается истина, и из этого посыла мы и собираемся исходить и дальше, вовлекая в дискуссии самые разные научные умы. Примечательно, что впервые на страницах журнала активное участие в подготовке материала принимали студенты — учащиеся Пермского государственного технического университета, представители кафедры «Конструирования и технологии электрической изоляции»:



Н.А. Белкин



Р.А. Биянов



А.С. Карсаков



С.Р. Шангараев