

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Ожанов М.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Актуальность настоящей работы обусловлена важнейшим значением вопроса энергосбережения и энергоэффективности для любого государства. В электротехнике наиболее эффективной мерой повышения энергоэффективности является эксплуатация регулируемых электроприводов и кабельного оборудования в составе электромеханических систем, учитывая, что около 60% вырабатываемой электроэнергии потребляется именно электродвигателями. Оптимизация систем электропитания позволяет уменьшить потребление первичных энергетических ресурсов и повысить продуктивность производства, качество продукции, что в целом повышает энергоэффективность экономики России [1].

Цель работы – оптимизация системы электропитания путем создания математической модели кабельно-проводниковой продукции на основе программного продукта *ELCUT*.

Данная цель обусловила необходимость решения следующих задач:

- системный анализ электропитающего оборудования;
- расчет нагрузки цеха;
- анализ режимов работы приводных электродвигателей;
- математическое моделирование силовых кабелей в среде *ELCUT*;
- сопоставление результатов моделирования с инженерными расчетами допустимых токовых нагрузок;
- разработка рекомендаций по оптимизации системы питания.

В данной работе использованы данные при проектировании цеха по производству кабельной продукции до 10 кВ ООО «Томсккабель». Анализ оборудования показал превалирование асинхронных двигателей с частотным приводом, причем большее количество электрического оборудования работают в продолжительном режиме S1 (71%), кратковременном режиме S2 (17%) и повторно-кратковременном режиме S3 (12%) (рис.1). Это говорит о том, что силовые кабели, запитывающие оборудование цеха, подвержены нагреву разных степеней, что может негативно влиять на эксплуатационные характеристики оборудования [2].

С целью оптимизации режимов работы электротехнического оборудования и, соответственно, кабельной продукции, проводится математическое моделирование системы электропитания с использованием программного продукта *ELCUT*. В качестве объекта модернизации выбран кабель марки ТОФЛЕКС РПнг(А) FRHF 1x50мк-1, наиболее подходящий для нагрузок, характерных для ООО «Томсккабель».

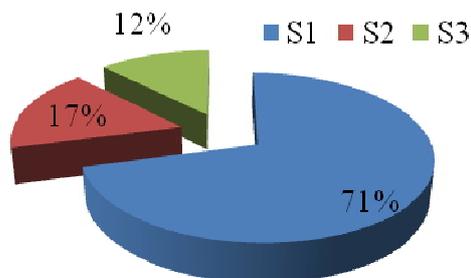


Рис. 1. Диаграмма распределения оборудования по режимам работы

ТОФЛЕКС РПнг(А) FRHF – кабель с медными жилами, с термическим барьером по токопроводящим жилам, с изоляцией из этиленпропиленовой резины, в оболочке из полимерных композиций не содержащих галогенов (рис. 2) [6].

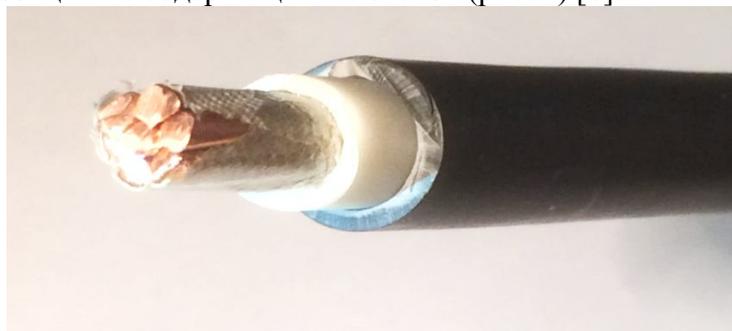


Рис. 2. ТОФЛЕКС РПнг(А) FRHF 1x50мк-1

Создание математической модели на программе ELCUT начинается с проектирования геометрических параметров, представленных на рис. 3, и ввода данных по конкретной кабельной продукции. Ниже представлено продольное сечение кабеля в месте разделки наружной оболочки. Линия синего цвета представляет собой след плоскости разделки. Она прерывает наружную оболочку кабеля и экран, нанесенный поверх изоляции токопроводящей жилы. Жила представлена красным цветом [3].

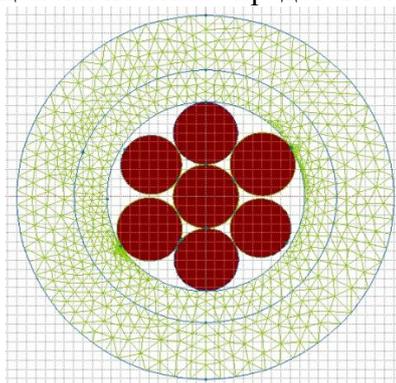


Рис. 3. Конструкция исследуемого кабеля

Картина электрического поля при потенциале внешнего проводника  $U = 1$  кВ частоты 50 Гц представлена на рис. 4, причем цветной заливкой показано распределение электрического потенциала.

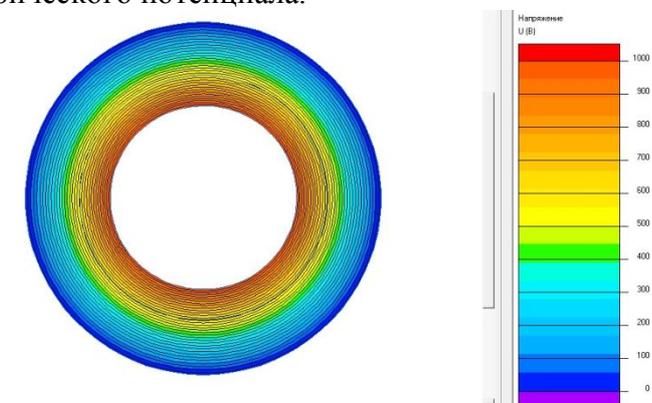


Рис. 4. Картина электрического поля

Далее рассматривалось тепловое поле, распределение температуры показано на рис.5. Были произведены аналогичные расчеты теплового поля.

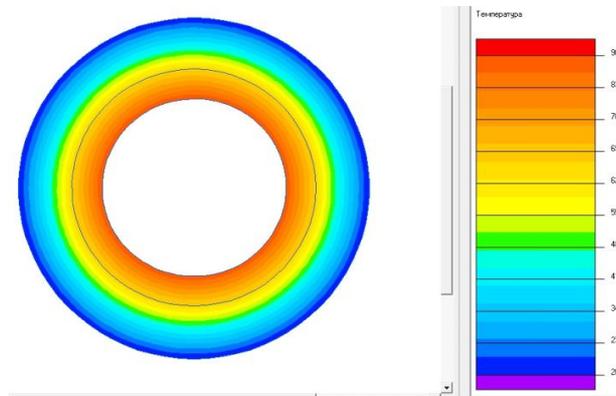


Рис. 5. Распределение температуры

На рис. 5 видно, что запас температуры изоляции составляет приблизительно  $10^{\circ}\text{C}$  для данной конструкции кабельной линии, что говорит о возможности снижения толщины изоляции, приводящей к улучшению технологичности изоляции, улучшению массо-габаритных показателей и уменьшению финансовой компоненты, что является практической ценностью данной работы. Расчеты допустимы при температуре окружающей среды, равной  $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  [4,5].

Созданная математическая модель была проверена инженерным расчетом. Получена хорошая сходимость результатов исследований, проведенных различными методами. Ниже представлены расчеты по токовой нагрузке.

Сопротивление жилы переменному току определяется с учетом коэффициента поверхностного эффекта при максимальной допустимой температуре по формуле:

$$R_t = R_{ж0} \cdot (1 + \alpha(t_{max} - t_{cp})) \cdot K_y$$

Сопротивление постоянному току:

$$R_{ж0} = \rho \cdot \frac{1}{S_n} = 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

Определим средний коэффициент укрутки:

$$K_y = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{3,14^2}{m^2} = 1 + \frac{3,14^2}{2 \cdot 20^2} = 1,012;$$

$m = 20$  – кратность скрутки;

Тогда  $R_t$  при  $t_{max} = 90^{\circ}\text{C}$  будет равно:

$$R_t = 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,0039 \cdot (90 - 20)) \cdot 1,012 = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$R_t$  при  $t_{max} = 80^{\circ}\text{C}$  будет равно:

$$R_t = 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,0039 \cdot (80 - 20)) \cdot 1,012 = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

Тогда для кабеля переменного тока:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{t_{max} - t_{cp} - P_{uz}(0,5 \cdot \sum S)}{R_t}};$$

Так как  $P_{uz} \rightarrow 0$  мы пренебрегаем выражением  $P_{uz}(0,5 \cdot \sum S)$ .

Определим допустимый ток нагрузки при максимальной рабочей температуре жилы  $t_{max} = 90^{\circ}\text{C}$  и температуре воздуха  $t_o = 20^{\circ}\text{C}$

$$I_{1max} = \sqrt{\frac{90 - 20}{0,44 \cdot 10^{-3}}} = 398,8 \text{ А}$$

Определим допустимый ток нагрузки при рабочей температуре жилы  $t_{max} = 80^{\circ}\text{C}$  и температуре воздуха  $t_o = 20^{\circ}\text{C}$

$$I_{2max} = \sqrt{\frac{80 - 20}{0,43 \cdot 10^{-3}}} = 377,9 \text{ A}$$

Разница между допустимыми токами при разных температурах составляет 20,9 А.

По результатам математического моделирования запас температуры в изоляции составил  $10^{\circ}\text{C}$ . Воспользовавшись формулой теплопроводности, была найдена разница между выделением теплоты при разных температурах кабеля. Ниже приведены расчеты.

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t$$

$c$  – удельная теплоёмкость вещества, в данном случае этиленпропиленовой резины ( $1800 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ).

$m$  – масса вещества, 1 кг.

При нагреве изоляции до  $90^{\circ}\text{C}$  выделение теплоты соответствует:

$$Q_1 = 1800 \cdot 1 \cdot 90 = 162 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

При нагреве изоляции до  $80^{\circ}\text{C}$  выделение теплоты соответствует:

$$Q_2 = 1800 \cdot 1 \cdot 80 = 144 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

После нахождения выделенной теплоты, воспользуемся законом Джоуля-Ленца для определения тока при разных температурах:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Так как значения  $R$  и  $t$  постоянны, выделенное количество теплоты прямо пропорционально квадрату тока  $Q \propto I^2$ .

$$Q_1 = 162 \cdot 10^3 \text{ Дж} \Rightarrow I_1 = 402,5 \text{ A}$$

$$Q_2 = 144 \cdot 10^3 \text{ Дж} \Rightarrow I_2 = 379,5 \text{ A}$$

$$I_1 - I_2 = 23 \text{ A}$$

Из вышеуказанных расчетов следует вывод, что изменение в  $10^{\circ}\text{C}$  дает запас в токе примерно 23А, что позволяет увеличить энергетическую эффективность системы электропитания примерно на 10 кВт. С учетом большой протяженности кабельных линий это позволяет получить существенный эффект.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

а) запас температуры изоляции составляет  $10^{\circ}\text{C}$ , что говорит о возможности снижения толщины изоляции, позволяющей улучшить технологичность изоляции, массо-габаритные показатели и уменьшить финансовую компоненту;

б) нагрузочную способность (энергетическую эффективность) оборудования цеха возможно повысить приблизительно на 11 % за счет запаса температуры изоляции кабеля.

в) результаты математического моделирования полностью коррелируют с инженерным расчетом, что доказывает практическую применимость математической модели в реальных условиях для анализа режимов работы двигателя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пешков И.Б. Кабельная промышленность: ситуация и перспективы развития // – М.: Электротехника. 2008. № 1. – С. 9-12.
2. Копылов И. П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
3. <http://www.exponenta.ru/soft/others/elcut/Manual.pdf#8> ELCUT Моделирование двумерных полей методом конечных элементов.

4. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Компьютерная модель процессов тепломассопереноса в кабельном канале при различных режимах работы кабельных линий// Фундаментальные исследования. – 2014.
5. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Численное исследование температурного поля в кабельных линиях для анализа возможности уплотнения кабельного канала// Электротехника. – 2014.
6. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов: Учеб.–справ. пособие – 2-е изд., испр. и доп. –СПб.: Профессия, 2005.

### **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА ПО ПОКАЗАНИЯМ ПОТРЕБЛЯЕМЫХ ТОКОВ**

Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

Асинхронные двигатели (АД) являются приводными машинами большинства механизмов. Одним из факторов обеспечения надежной эксплуатации которых является контроль и диагностика технического состояния. АД используются во многих механизмах: вентиляторы, насосы, компрессоры, затворы и задвижки и т.д.

Вентиляторы занимают значительную долю среди эксплуатируемых турбомеханизмов. Наибольшее применение в системах вентиляции и кондиционирования воздуха гражданских, общественных и промышленных зданий, в химической, добывающей, машиностроительной и других отраслях народного хозяйства получили вентиляторы центробежного типа [1]. Наличие пыли в воздухе рабочих пространств не только вредно влияет на организм обслуживающего персонала, но и усложняет работу механизмов: пыль попадает в подшипники и трущиеся части машин, вызывая их износ [2]. В случае перемещения горячих газов возможны деформация вала вентилятора и перегрев смазки, что может привести к быстрому износу и разрушению подшипников [3].

В целом, существуют несколько основных методов диагностики машин: вибрационные, электромагнитные и тепловые. Менее распространен метод диагностирования машин на основе анализа амплитудно-частотной характеристики (спектральный анализ) потребляемого тока. Преимуществом диагностики на основе анализа амплитудно-частотной характеристики потребляемого тока в отличие от вибродиагностики является возможность выполнения регистрации измеряемых параметров на кабеле без разрыва цепи питания. В ряде случаев эксплуатируемое оборудование может находиться в труднодоступном месте, поэтому применение виброакустических методов для диагностирования становится сложным. В данном случае методика диагностирования на основе спектрального анализа токов статора является альтернативным вариантом.

Гармонический состав реального спектра тока статора АД является результатом условий питания, специфики механической системы электропривода и электромагнитных явлений, происходящих в самой машине. Следует учитывать, что при диагностировании необходимо измерение спектров тока во всех фазах обмотки машины. При этом гармонические составляющие токов, характеризующие дефекты подшипников могут несколько отличаться между фазами в статоре машины. В таком