

$$\begin{cases} \frac{f(t)'' + a_0 f(t)' + \frac{a_3}{a_2} \sqrt{2a_1 a_0} g(t) - a_0 \sqrt{g(t)}}{\sqrt{g(t)}} = 0; \\ g(t) \neq \frac{a_2 \sqrt{2}}{\sqrt{a_0 a_1}} f(t) + t + \frac{\exp(-a_0 t) - 1}{a_0}. \end{cases} \quad (3)$$

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОГРУЖНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

День Конг Кюи

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Увеличение добычи минеральных ресурсов и научно-исследовательских работ на больших глубинах в океанах требует большое количество телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА). Для питания этих аппаратов применяются системы электропитания, обеспечивающиеся судном с использованием мощных погружных трансформаторов (ПТ) [1, 2]. Совершенствование погружного трансформатора повышает передаваемую мощность и эффективность работы системы электропитания ТПА. В связи с этим выбор оптимальных параметров трансформатора является актуальной задачей.

Под задачей оптимизации погружного трансформатора понимается поиск научно обоснованных инженерных решений, которые являются технически осуществимыми и экономически целесообразными. Оптимизация предполагает определение значений варьируемых параметров, необходимых для конструкторско-технологической разработки изделия, выбор которых приводит к экстремальному значению оптимизируемого показателя качества или целевой функции при заданных или принятых ограничениях [3].

Возможны следующие направления совершенствования ПТ:

- выбор оптимального типа и конструкции трансформатора;
- выбор совершенных материалов обмотки, магнитопровода, электрической изоляции и т.д.;
- выбор системы охлаждения трансформатора;
- использование более точных методов и методик расчетов при проектировании.

В классе напряжения до 10 кВ используются все конструкции трансформаторов. По сравнению с другими трансформаторами, тороидальная имеет следующие преимущества:

- большая экономика по объему и массе;
- равномерное распределение всех обмоток по всей окружности сердечника уменьшает длину обмоток, следовательно, уменьшается сопротивление обмоток и повышается КПД трансформатора;
- тороидальный трансформатор (ТТ) обеспечивает снижение уровня магнитных помех в восемь раз относительно СТТ, что обуславливает низкие потери мощности ТТ.

Показано, что в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к электрооборудованию ТПА, ПТ рекомендуется изготавливать тороидальной конструкции с масляным охлаждением, медными обмотками и аморфным магнитопроводом.

С появлением быстродействующих ЭВМ расширяется область применения численных методов. Применение численных методов в задачах проектирования и оптимизации трансформатора позволяет снизить погрешность расчетов и учитывать многие факторы, которые исключались из рассмотрения в аналитических решениях.

При оптимизационном расчете погружного трансформатора необходимо решить следующие задачи:

- выбрать наиболее целесообразное значение плотности тока обмоточных проводов трансформаторов и определить функцию ограничения;
- определить оптимальный вариант размеров обмоточных проводов трансформаторов.

Важнейшим моментом в оптимальном проектировании является определение и обоснование критерия оптимальности. Критерий оптимальности выбирается с учетом эксплуатационных требований к погружному трансформатору. Погружной трансформатор применяется в системе электропитания телеуправляемых подводных аппаратов. Ее мощность определяет мощностью всех подводных аппаратов, влияет на эффективность работы всей системы научного исследования, разработки, поиска и т.д. В большой степени мощность любого трансформатора зависит от его массы и габаритов. Поэтому в качестве критерия оптимальности выступают массогабаритные показатели.

Одним из массогабаритных показателей является удельная масса на единицу мощности. Этот показатель выбирается нами в качестве критерия оптимизации ввиду обеспечения простоты решения оптимизационной задачи при принятом методе моделирования.

При оптимизации погружного трансформатора возможно варьировать такие параметры, как плотность тока обмоток однофазных трансформаторов и магнитную индукцию магнитопровода. Изменение магнитной индукции приводит к изменению напряжения между витками, следовательно, изменению толщины изоляции обмоточных проводов и габаритов погружного трансформатора. Поэтому в нашей работе учитывается только зависимость удельной массы на единицу мощности от плотности тока обмоток трансформаторов.

Оптимизация проводится с учетом следующего ограничения – максимальная температура обмоток трансформаторов ( $T_{\text{MAX}}$ ) не должна превышать допустимую рабочую температуру масла и изоляции. Для проектирования погружного трансформатора было использовано масло «Пента-ТРМС-110» с высокой допустимой рабочей температурой – 200 градусов. Алгоритм оптимизации представлен на рис. 1.

Исходными данными являются номинальная мощность, напряжение первичной и вторичной обмотки, частота, масса и габариты трансформатора.

С помощью комплекса ELCUT построена модель температурного поля погружного трансформатора. Задаются для всех элементов модели такие теплофизические свойства, как теплопроводность, удельная теплоёмкость, плотность, объемную плотность тепловыделения [4]. Проверка адекватности показала, что полученная модель с высокой точностью воспроизводит температурное поле трансформатора – расхождение с экспериментальными данными находится в пределах  $-4,3\% \div 3,09\%$ .

С учетом максимальной погрешностью (4,3%) максимальная температура обмоток погружного трансформатора, определяемая в ELCUT, может достигаться 191,7 градусов. При повышении плотности тока повышаются мощность погружного трансформатора и максимальная температура обмоток погружного трансформатора. Результаты оптимизации представлены в таблице 1.

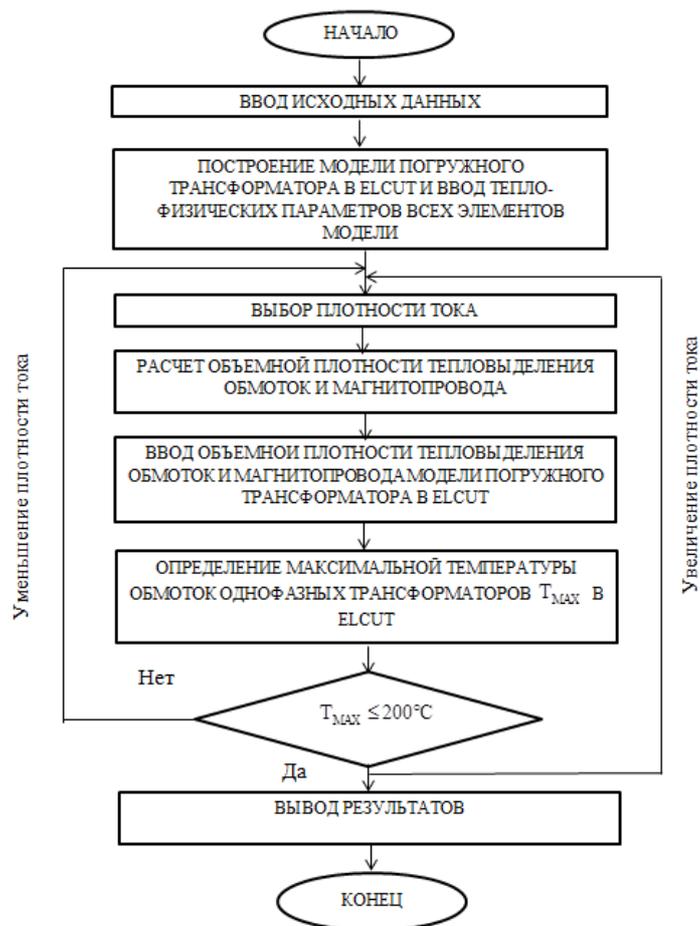
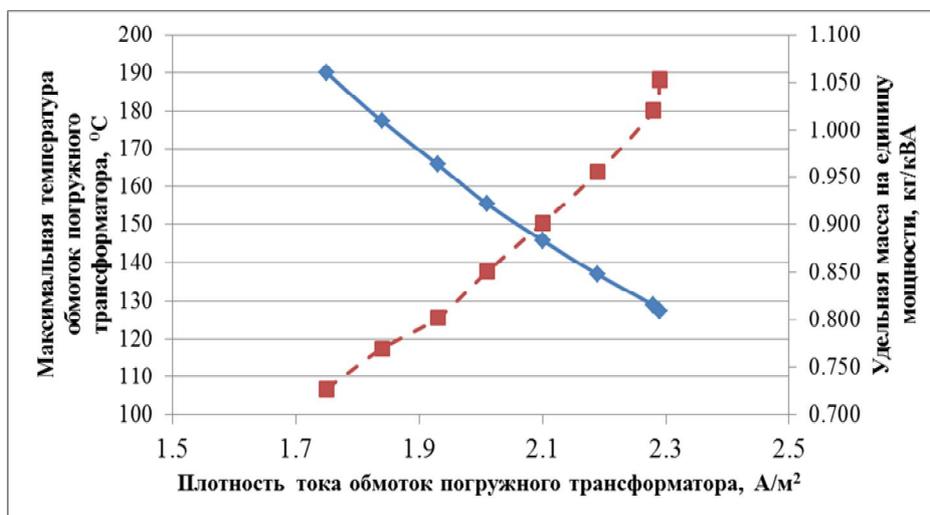


Рис.1. Алгоритм оптимизации погружного трансформатора

Таблица. 1. Результаты оптимизации погружного трансформатора

	Плотность тока обмоток трансформаторов, А/м <sup>2</sup>							
	1.75	1.84	1.93	2.01	2.1	2.19	2.28	2.29
Объемная плотность тепловыделения (Вт/м <sup>3</sup> )	60080	68130	74770	83990	93920	104600	118000	123700
Максимальная температура обмоток погружного трансформатора, град.	106.7	117.4	125.5	137.7	150.3	163.9	180.2	188.2
Мощность погружного трансформатора, кВА	33.4	35.07	36.74	38.41	40.08	41.75	43.42	43.754
Удельная масса на единицу мощности, кг/кВА	1.060	1.009	0.964	0.922	0.883	0.848	0.815	0.809

По данным таблицы построены графики зависимости удельной массы на единицу мощности и максимальной температуры обмоток погружного трансформатора от плотности тока обмоток однофазных трансформаторов (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимости максимальной температуры обмоток погружного трансформатора (штриховая) и удельной массы на единицу мощности (сплошная) от плотности тока

При неизменных габаритах погружного трансформатора, мощность погружного трансформатора может достигать в пределах 43,75 кВА – на 31% больше мощности экспериментального трансформатора.

**Вывод:**

В данной работе был построен алгоритм оптимизации погружного трансформатора, на основе которого проведено усовершенствование массо-габаритных характеристик. Полученные графики позволяют осуществлять выбор плотности тока при известной марке изоляции и предварительно определять показатели по массе погружного трансформатора тороидальной конструкции.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата большой энерговооруженности. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Томск: РГБ, 2006 – 196 с.
2. Noirhomme, B., Cote, J. Evaluation of underground submersible distribution transformers through oil analysis // Electrical Insulation (ISEI) Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on. – 2012. – С. 217-222.
3. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 264 с.
4. <http://elcut.ru/index.htm>