

УДК 621.313.3

А.В. Киселев, А.Г. Гарганеев, О.С. Качин

Анализ теплового состояния первичного источника электрической энергии забойной телеметрической системы

Описана конструкция генератора для питания скважинной аппаратуры забойной телеметрической системы, рассмотрены требования, предъявляемые к данному генератору. Указан способ увеличения выходной мощности рассматриваемого источника энергии. Приведены результаты моделирования магнитного и теплового состояний скважинного генератора забойной телеметрической системы. Представлены рекомендации по выбору марки постоянных магнитов для изготовления индуктора скважинного генератора.

Ключевые слова: забойная телеметрическая система, скважинный генератор, постоянные магниты, моделирование.

Бурение нефтяных и газовых скважин с большим отклонением стволов от вертикали, а также с горизонтальными участками большой протяженности осуществляется с применением телеметрических систем. Применение данных систем необходимо для получения навигационных, геофизических и технологических данных. С их помощью также выполняется передача перечисленных данных на дневную поверхность в режиме реального времени или с использованием запоминающих устройств. В отечественной литературе они получили название забойных телеметрических систем (ЗТС). В зарубежных источниках подобные системы называют MWD-системами (Measurement While Drilling – «Измерение в процессе бурения») [1, 2]. В настоящее время разработкой и производством телеметрических систем занимаются компании из разных стран мира. Среди фирм-производителей часто встречаются такие названия, как НПП «ВНИИГИС», НПП «Самарские горизонты», Schlumberger, Sperry-Sun, Baker Hughes и многие другие.

Для передачи информации с забоя на дневную поверхность в ЗТС применяется канал связи. В нашей стране наибольшее распространение получили ЗТС с электромагнитным каналом связи. Передача сигнала у данного канала связи осуществляется по породе, окружающей колонну буровых труб, что позволяет сократить расходы на закупку, монтаж и эксплуатацию ЗТС, так как требуется минимальное количество дополнительного оборудования и расходных материалов.

Большинство производителей ЗТС с электромагнитным каналом связи в качестве первичного источника питания скважинной аппаратуры применяют скважинный генератор (СГ), который является бесконтактной машиной. Как правило, скважинный генератор построен на базе вентильного генератора постоянного тока, в частности трехфазного магнитоэлектрического генератора с ротором из постоянных высококоэрцитивных магнитов и беспазовым статором, работающего на нагрузку через мостовой выпрямитель и токовый регулятор. Скважинный генератор представляет собой конструкцию цилиндрического исполнения. Ротор генератора имеет индуктор и составной вал. Индуктор набран из постоянных магнитов кольцеобразной формы с отверстием в центре, через которое пропущен вал. По внешней поверхности ротора кольцеобразные магниты имеют бандаж из композиционных материалов, пропитанных синтетическими смолами. Статор генератора имеет беспазовое исполнение и представляет собой шихтованную конструкцию. По краям статора устанавливаются нажимные шайбы, которые вместе со статором провариваются по наружной поверхности. Обмотка статора выполнена в форме катушек из круглого медного провода и монтируется в немагнитную гильзу, изготовленную методом отливки. Гильза в сборе устанавливается в статор и крепится в нескольких точках [3].

Требования к первичному источнику питания телеметрической системы. Стоит отметить, что требования к скважинному генератору складываются из целого списка требований, предъявляемых к конструкции скважины, к типу месторождения, требований безопасности, надежности и технологичности скважинного оборудования. К наиболее значимым требованиям относятся:

- температура эксплуатации СГ может достигать величину 100 °С (при глубине забоя до 3000 м);
- выходная мощность СГ при номинальной нагрузке и частоте вращения ротора должна составлять не менее 100 Вт, значение фазного напряжения не менее 15–16 В (необходимо для устойчивой работы скважинной аппаратуры);

- частота вращения ротора СГ не более 3000 об/мин (ограничивается условиями сохранения герметичности конструкции);
- большой диапазон расходов бурового раствора и его вязкостных характеристик, при которых выходные данные генератора должны мало изменяться;
- жесткое ограничение по габаритам (по диаметру и по длине) при обеспечении необходимой мощности электропитания, связанное с унификацией ЗТС с наружным диаметром корпусных деталей от 240 до 89 мм;
- использование переменного гармонического напряжения, вырабатываемого генератором, для модуляции полезного сигнала электромагнитного канала связи.

В настоящее время к данному списку добавляется требование, связанное с повышением удельной мощности скважинного генератора. Повышение удельной мощности СГ необходимо для организации устойчивой работы ЗТС в тяжелых условиях, на глубинах забоя более 2000 м, а также для расширения функциональных возможностей телеметрической системы, которые требуют дополнительного питания.

Одним из способов повышения удельной мощности скважинного генератора является применение для изготовления ротора постоянных магнитов с увеличенными значениями коэрцитивной силы и остаточной индукцией. Применение постоянных магнитов на основе сплава «неодим-железо-бор» (Nd-Fe-B) позволяет получить в зоне расположения статорных обмоток величину коэрцитивной силы 900 кА/м и выше. Для рассматриваемого в данной работе скважинного генератора за счет увеличения коэрцитивной силы постоянных магнитов было достигнуто повышение значения выходной мощности на 10% по сравнению с серийной конструкцией СГ при соблюдении всех требований и ограничений по его разработке и эксплуатации. Количество полюсов ротора скважинного генератора новой конструкции составляет $2p = 4$, а магниты имеют тангенциальное намагничивание, которое позволяет получить высокие значения индукции в воздушном зазоре. Подробнее этот и другие вопросы увеличения удельной мощности СГ рассмотрены на примере скважинного генератора отечественного производства в работах [3, 4].

Так как одним из основных требований к СГ является нормальная работа генератора при высоких значениях температуры окружающей среды (до 100 °С) и соответственно элементов самого генератора, стоит отметить, что величина коэрцитивной силы и остаточной индукции постоянного магнита зависят от температурного класса высококоэрцитивного сплава. Кроме этого, не все марки постоянных магнитов с высокими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукцией могут быть использованы для изготовления ротора, это объясняется тем, что не все из этих магнитов имеют высокий класс по температуре. Например, согласно ГОСТ Р 52956–2008 наибольшее значение коэрцитивной силы по магнитной индукции и остаточную магнитную индукцию имеют магниты с максимальной рабочей температурой 120 °С. Магниты с максимальной рабочей температурой выше 120 °С имеют более низкие значения коэрцитивной силы и остаточной индукции. В результате чего анализ температурного состояния элементов СГ в рабочем режиме для верного выбора температурного класса его материалов является актуальной задачей. В данной работе остановимся подробнее на моделировании теплового состояния элементов скважинного генератора.

Целью проведенных исследований являлось моделирование теплового состояния скважинного генератора при его работе в номинальном режиме и выработка рекомендаций по выбору температурного класса постоянных магнитов для изготовления ротора.

Объектом исследований являлся трехфазный магнитоэлектрический скважинный генератор с ротором на постоянных высококоэрцитивных магнитах типа «неодим-железо-бор» (Nd-Fe-B) и беспазовым статором, работающий на нагрузку через мостовой выпрямитель в телеметрической системе.

Анализ теплового состояния скважинного генератора. Моделирование теплового состояния элементов скважинного генератора выполнялось с помощью программного продукта ELCUT, использующего метод конечных элементов для решения поставленных задач. На основании исходных данных была решена задача стационарной теплопередачи в линейной постановке. При решении таких задач используется уравнение теплопроводности следующего типа:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ_x , λ_y – компоненты тензора теплопроводности; q – удельная мощность тепловыделения, в случае линейной постановки она константа.

Стоит отметить, что в стационарной задаче последнее слагаемое в правой части уравнений равняется нулю. Также можно отметить, что все параметры уравнений в линейной постановке постоянны в пределах каждого блока модели.

Учитывая среду расположения скважинного генератора, на внешней границе расчетной области было задано граничное условие третьего рода (конвективный теплообмен), которое имеет следующий вид:

$$F_n = \alpha(T - T_0), \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура окружающей среды [5].

Коэффициент теплоотдачи был определен по соотношению из методики [6]. Значения температуры окружающей среды известны из исходных данных.

Так как в данной работе выполнялось моделирование теплового состояния поперечного разреза скважинного генератора, для магнитопровода статора были использованы значения коэффициентов продольной теплопроводности. Продольная теплопроводность применяемой марки электротехнической стали магнитопровода статора была выбрана на основании табличных данных по теплофизическим характеристикам магнитных материалов. Значение эквивалентной поперечной теплопроводности пазовой зоны получено на основании эмпирического соотношения, учитывающего технологический коэффициент заполнения паза медью, технологический коэффициент пропитки, диаметр провода, а также теплопроводность эмали и компаунда [7].

Кроме этого, в качестве исходных данных для решения тепловой модели необходимо знать величину потерь в магнитопроводе статора и потери в статорных обмотках генератора. Данные потери были получены на основании результатов моделирования магнитного состояния скважинного генератора при работе с номинальной нагрузкой в программной среде ANSYS Maxwell 2D. Результаты моделирования магнитного состояния СГ представлены на рис. 1.

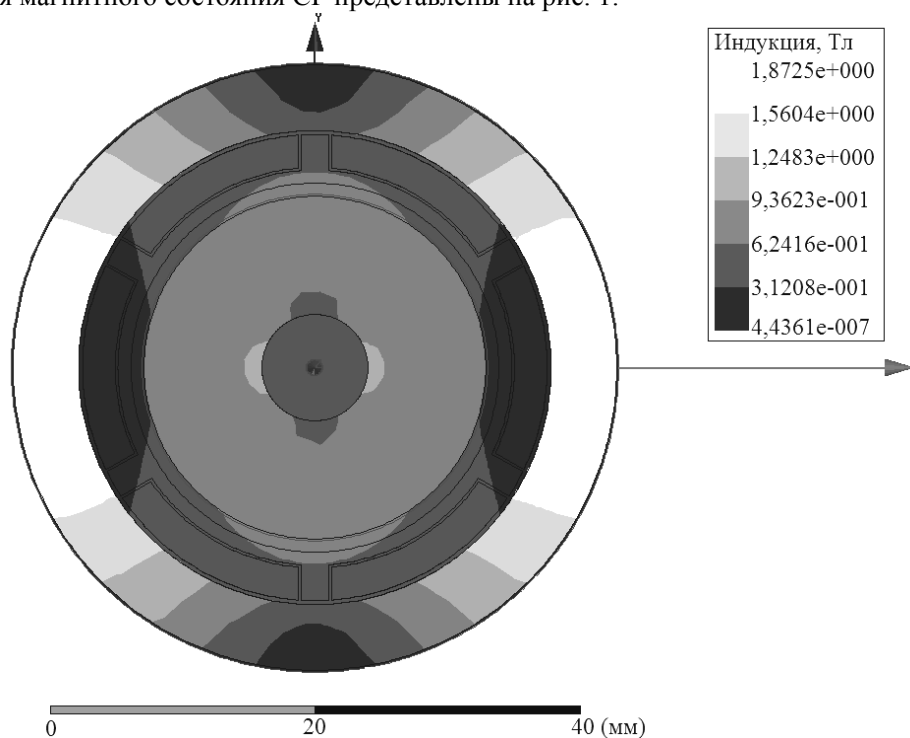


Рис. 1. Распределение магнитного потока в поперечном разрезе скважинного генератора

На основании исходных данных и выполненных предварительных расчетов в программной среде ELCUT была получена модель установившегося теплового состояния скважинного генератора. В модели была имитирована работа скважинного генератора при погружении на максимально разрешенную глубину забоя для рассматриваемой системы ЗТС (температура бурового раствора на этой глубине может достигать 100 °С). Величина коэффициента теплоотдачи на внешней границе расчетной области в этом случае рассчитывалась с учетом значений давления и вязкости бурового раство-

ра на глубине забоя 3000 м. Стоит отметить, что в данной модели теплового состояния рассматривались сложные условия работы скважинного генератора не только по причине максимального значения температуры бурового раствора, но и с учетом низкого коэффициента теплоотдачи на внешней границе расчетной области. При расчете в среде ELCUT была в автоматическом режиме сгенерирована сетка конечных элементов, количество узлов в которой составило 2654.

На рис. 2 представлено распределение температуры в скважинном генераторе по шкале температур Кельвина.

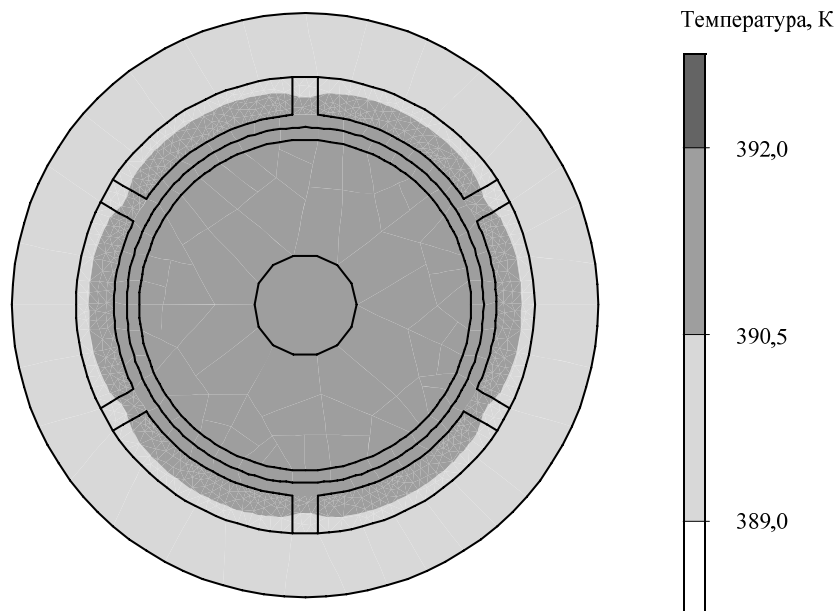


Рис. 2. Распределение температуры в скважинном генераторе

Результаты моделирования теплового состояния скважинного генератора показали, что наиболее нагретой областью является центральная часть пазовой зоны в месте примыкания к немагнитной гильзе. Температура в этой части скважинного генератора может достигать $119\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ротор скважинного генератора имеет равномерный нагрев по всему сечению и его температура не превышает $117\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты моделирования теплового состояния скважинного генератора, работающего на глубинах забоя до 3000 м, позволят рекомендовать для изготовления индуктора скважинного генератора постоянные магниты с рабочей температурой до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так, согласно ГОСТ Р 52956–2008 в указанной температурной группе можно отметить марку магнита НмБ 150/160 с величиной коэрцитивной силы по магнитной индукции $H_{CB} = 920\text{--}980\text{ кА/м}$ и остаточной магнитной индукцией $B_r = 1,33\text{--}1,39\text{ Тл}$. Данная марка магнита имеет наибольшее значение энергетического произведения $(BH)_{\max}$ в указанном температурном классе рассматриваемого ГОСТ Р 52956–2008 [8].

Результаты моделирования теплового состояния СГ были подтверждены данными анализа магнитных свойств постоянных магнитов скважинных генераторов, после эксплуатации в системе ЗТС с помощью измерительного оборудования. Магнитные свойства, рассматриваемых постоянных магнитов (величина коэрцитивной силы и остаточной индукции) ротора СГ находились в допустимых пределах паспортных данных, что свидетельствует об отсутствии превышения максимальной рабочей температуры постоянного магнита при работе генератора в забое.

Заключение. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная модель теплового состояния скважинного генератора для питания телеметрической системы позволяет исследовать температуру индуктора и других его элементов. На основании данных исследований можно осуществлять выбор температурных классов всех применяемых для изготовления скважинного генератора материалов.

2. Полученные рекомендации по выбору марки постоянных магнитов с высокими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукцией для изготовления индуктора скважинного генератора позволят изготовить генератор с более высокими значениями выходной мощности при сохранении габаритных размеров. Также данные рекомендации могут быть использованы для проектирования и

производства СГ с уменьшенными габаритными размерами и требуемыми значениями выходной мощности для питания скважинной аппаратуры телеметрической системы.

Литература

1. Сеница В.В. Оптимизация компоновочных схем телеметрических систем для исследований в процессе бурения / В.В. Сеница // Инженерная практика. – 2012. – № 1. – С. 70–79.
2. Хорьков А.К. Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности: сборник статей / А.К. Хорьков. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. – 350 с.
3. Пат. 123600 РФ, МПК Н 02 К 21/12, Н 02 К 1/27. Синхронная электрическая машина с постоянными магнитами / О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин, А.В. Киселев (РФ). – № 2 012 123 240/07; заявл. 05.06.2012; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36. – 5 с.
4. Применение программного продукта ELCUT 5.1 для выбора рациональной геометрии синхронного магнитоэлектрического генератора / А.В. Киселев, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин, Ю.В. Ким // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 9–12.
5. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.10: руководство пользователя. – СПб.: ООО «Тор», 2012. – 356 с.
6. Бухгольц Ю.Г. Основы аэродинамических и тепловых расчетов в электромеханике: учеб. пособие / Ю.Г. Бухгольц, В.А. Тюков, Т.В. Честюнина. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 196 с.
7. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
8. ГОСТ Р 52956–2008. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Использование и издательское оформление. – Введ. 2008–09–18. – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.

Киселев Александр Викторович

Ассистент каф. электротехнических комплексов и материалов

Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)

Тел.: 8 (382-2) 56-34-53

Эл. почта: kiselev_av@mail2000.ru

Гарганеев Александр Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электротехнических комплексов и материалов НИТПУ

Тел.: 8 (382-2) 70-17-77 (доп. 19-56)

Эл. почта: garganeev@rambler.ru

Качин Олег Сергеевич

Доцент каф. электропривода и электрооборудования НИТПУ

Тел.: 8 (382-2) 56-37-59

Эл. почта: kos@tpu.ru

Kiselev A.V., Garganeev A.G., Kachin O.S.

A thermal condition analysis of primary power source of a bottomhole telemetric system

The design of a power generator for the borehole equipment of bottomhole telemetric system is described. The requirements to this type of generators are considered. The way of the output power increasing is specified. Results of modeling of magnetic and thermal conditions of the generator are described. Recommendations concerning a choice of specification of permanent magnets for the generator are submitted.

Keywords: a bottomhole telemetric system, a generator, a borehole, permanent magnets, modeling.