

УДК 622.248.5:531.7:621.311.6

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ЗАБОЙНОЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕЛЕСИСТЕМЫ

Чернышева Татьяна Александровна¹,
cherta@tpu.ru

Чернышев Игорь Александрович¹,
chia@tpu.ru

Чернышев Александр Юрьевич¹,
ach@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания надежных электромашинных источников питания забойных инклинометрических телесистем.

Цель работы: исследование электромашинных источников питания, учитывающих условия эксплуатации в наклонно-направленных скважинах при их бурении.

Методы исследования основаны на использовании теории автоматического управления и имитационного моделирования в программной среде MatLab-Simulink.

Результаты. Определена конструкция синхронного генератора забойной инклинометрической телесистемы из условия его повышенной надежности. Разработана функциональная схема электронной части источника питания инклинометрической телесистемы, позволяющая разделить канал обработки информации и канал ее передачи в наземные приемные устройства. Проведено моделирование электромашинного источника питания с учетом характера нагрузки канала передачи информации. Полученные теоретические исследования подтверждены экспериментально на лабораторном стенде и при бурении наклонных скважин.

Выводы. Установлено, что для увеличения надежности синхронных генераторов инклинометрических телесистем необходимо выравнять давление бурового раствора и трансформаторного масла, заполняющего полости генератора с помощью резиновых компенсаторов давления. Синхронный генератор инклинометрической телесистемы, нагруженный через единственный выпрямитель, создает внутренние колебания электромагнитного момента, приводящие к увеличению вероятности преждевременного выхода из строя его обмоток. Установлено, что применение в инклинометрической телесистеме инвертора напряжения с гальванической развязкой нескольких нагрузок различной мощности позволяет уменьшить вероятность появления помех при обработке сигналов акселерометров. Прокрутка и предварительный комплекс испытаний совместно с конструктивными решениями при изготовлении синхронных генераторов инклинометрических телесистем позволило увеличить их срок службы при бурении скважин. Установлено, что использование автоматизированных систем контроля синхронных генераторов инклинометрических телесистем позволяет произвести их функциональный контроль, сэкономить рабочее время и увеличить надежность электромашинных источников питания.

Ключевые слова:

Инклинометрическая система, синхронный генератор, постоянные магниты, компенсатор давления, инвертор напряжения.

Введение

Бурению скважин на нефть или газ предшествуют геофизические исследования с графическим построением сейсмических разрезов участков земной коры. В дальнейшем по предполагаемым пластам залегания полезных ископаемых не всегда возможно или необходимо бурение в вертикальном направлении. Часто скважины бурят наклонными, а на некоторых участках – горизонтальными [1–3]. В большинстве случаев информацию наклона участков скважин получают с помощью инклинометрических телесистем. Забойные инклинометрические телесистемы производят измерения направления бурения с помощью трех ортогонально установленных акселерометров [4]. В соответствии с этими измерениями определяют азимутальные и зенитные углы скважины.

В последнее время разрабатываются и успешно выпускаются забойные телесистемы с программой для их функционирования, предназначенные для измерения направления бурения наклонно-на-

правленных скважин и передачи по беспроводному электромагнитному каналу связи в наземные устройства азимута и зенитного угла ствола скважины [1, 2, 5]. Полученная информация позволяет технологам принимать решения по изменению угла наклона бурения скважины в соответствии с намеченными направлениями. Действия оператора в этой технологической цепочке часто играет решающую роль [6].

Генератор забойной инклинометрической телесистемы

В соответствии с технологическим процессом бурения, питание забойной инклинометрической телесистемы осуществляется синхронным генератором (рис. 1) [7–9]. Турбина – 1, закрепленная на валу – 2 синхронного генератора, вращается потоком бурового раствора, и при расходе бурового раствора более 25 л/с синхронный генератор начинает вырабатывать переменное напряжение. Энергия генератора питает всю аппаратуру забойной систе-

мы, а также расходуется для передачи кодированных сигналов в канал связи. Многочисленные экспериментальные исследования в реальных условиях при бурении скважин показали, что самой технологичной и надежной конструкцией генератора забойной инклинометрической телесистемы, имеющей лучшие массогабаритные характеристики и более высокий к.п.д., является бесконтактный синхронный генератор с радиальным магнитным потоком, созданным высококоэрцитивными постоянными магнитами. Диаметр корпуса генератора определяется внутренним диаметром переводника, в который он устанавливается, и в данной его конструкции диаметр корпуса равен 60 мм. Длина корпуса определяется мощностью генератора, которая для передачи кодированного сигнала с глубины 3500–4000 м должна быть не менее 300 Вт.

Гидротурбина – 1 обычно выполняется из карбона фрезерованием. Гидротурбина – 1 синхронного генератора крепится на валу – 2, который надежно фиксируется в корпусе – 3 генератора с помощью двух радиально-упорных роликовых подшипников – 4 и шарикового подшипника – 5.

Корпус – 3 генератора изготавливается из немагнитной нержавеющей стали. Для уменьшения вероятности попадания в полости генератора бурового раствора со стороны вращающегося вала – 2 установлен сальник – 6, рассчитанный для работы при высоком давлении. Возбуждение генератора осуществляет ротор – 7, выполненный из высококоэрцитивных постоянных магнитов с чередующейся полярностью полюсов, закрепленных на валу – 2 генератора немагнитной арматурой.

Статор – 8 набирают из штампованных листов электротехнической стали. Это позволяет уменьшить потери от вихревых токов и в тех же габаритах генератора увеличить его мощность. Листы статора перед сборкой в пакет изолируют слоем ла-

ка. Обмотки – 9 статора генератора выполняются в беспазовом исполнении. Катушки обмоток – 9 статора укладываются по его поверхности и фиксируются немагнитной арматурой. Выводы – 10 обмоток статора подключены к герметичному разъему – 11 с помощью трехжильного кабеля.

Корпус – 3 синхронного генератора устанавливается в переводнике – 12 с внутренним диаметром 120 мм с резьбами на концах переводника, аналогичными резьбе бурильных труб, и включается в компоновку низа бурильной колонны. Между корпусом – 3 синхронного генератора и корпусом переводника – 12 протекает буровой раствор, который приводит во вращение гидротурбину – 1.

Работа синхронного генератора в скважине происходит при постоянных вибрациях, передающихся от бурового инструмента, в тяжелых условиях. Температура бурового раствора на глубине по вертикали 3500–4000 м достигает 100 °С и более. Давление в скважине зависит от плотности бурового раствора, изменяющейся в диапазоне от $\rho_{б,р}=1000$ кг/м³ (дистиллированная вода) до максимального значения $\rho_{б,рм}=2200$ кг/м³.

Будем считать, что буровой раствор – упругая жидкость. В этом случае давление бурового раствора на глубине l определяется выражением

$$P_{бр} = \rho_{б,р} l, \quad (1)$$

где $\rho_{б,р}$ – плотность бурового раствора, кг/м³; l – глубина скважины по вертикали, м.

Таким образом, из (1) следует, что на глубине 4000 м при максимальной плотности бурового раствора $\rho_{б,рм}=2200$ кг/м³ давление в скважине может достигать 880 атм. или 89 МПа.

Для предотвращения разрушения корпуса синхронного генератора из-за сильных перепадов давления между внутренней полостью генератора и давлением бурового раствора в скважине, а также уменьшения вероятности попадания бурового ра-

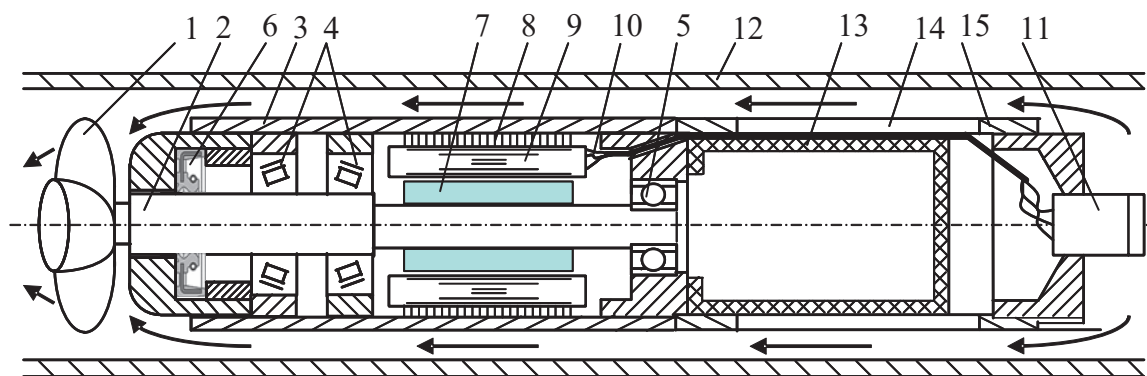


Рис. 1. Синхронный генератор забойной инклинометрической телесистемы: 1 – гидротурбина; 2 – вал; 3 – корпус генератора; 4 – радиально-упорные роликовые подшипники; 5 – шариковый подшипник; 6 – сальник; 7 – ротор; 8 – пакет статора; 9 – обмотки статора; 10 – выводы обмоток статора; 11 – герметичный разъем; 12 – переводник; 13 – компенсатор давления; 14 – прорези; 15 – металлический охранный корпус

Fig. 1. Synchronous generator of downhole directional survey measure while drilling: 1 is the hydroturbine; 2 is the shaft; 3 is the generator housing; 4 are the combined journal-and-thrust bearings; 5 is the ball-bearing; 6 is the grease-retainer; 7 is the rotor; 8 is the stator pack; 9 are the stator windings; 10 are the stator winding terminals; 11 is the liquid tight connector; 12 is the adapter; 13 is the pressure compensator; 14 are the slots; 15 is the metallic protective housing

створа внутрь генератора через сальник – 6, полости генератора заполняются трансформаторным маслом. Со стороны, противоположной гидротурбине – 1, установлен резиновый компенсатор давления – 13, также заполненный трансформаторным маслом. Буровой раствор имеет доступ к внешним поверхностям компенсатора давления – 13 через прорези – 14 в металлическом охранном корпусе – 15 компенсатора. Резиновый компенсатор давления – 13 сдвигается или растягивается в зависимости от разности давлений масла внутри синхронного генератора и бурового раствора в переводнике колонны. Таким образом, давления бурового раствора в скважине и трансформаторного масла в генераторе выравниваются.

Функциональная схема электромашинного источника питания забойной инклинометрической телесистемы

Наиболее рациональная функциональная схема электромашинного источника питания инклинометрической телесистемы приведена на рис. 2. Схема содержит: синхронный генератор G с возбуждением от постоянных магнитов, выпрямитель B , емкостный фильтр Φ на конденсаторе $C1$, однофазный инвертор напряжения (ИН) [10–12] с блоком управления инвертором (БУИ). Силовая часть инвертора напряжения, приведенная в данной статье, защищена патентом Российской Федерации [13].

При вращении ротора генератора G в его обмотках индуцируется переменная э.д.с. с изменяющейся частотой и поступает на вход трехфазного выпрямителя B . Пульсирующее постоянное напряжение выпрямителя B попадает на конденсатор фильтра $C1$, который заряжается до выходного напряжения выпрямителя B .

Силовая схема ИН выполнена на двух силовых $VT1$ и $VT2$ и двух вспомогательных полевых транзисторах $VT3$ и $VT4$. Силовые транзисторы для протекания обратных токов шунтированы антипараллельными диодами $VD1$ и $VD2$. Все затворы транзисторов подключены к БУИ.

Выходное напряжение ИН снимается с вторичных обмоток трансформатора $TV1$ и подается на блоки питания БП1 и БП2. Число блоков питания определяется особенностями электронной схемы забойной инклинометрической телесистемы. Однако во всех случаях блоки питания для систем измерения и обработки данных забойной инклинометрической телесистемы и систем передачи данных на приемную наземную аппаратуру, имеющие различные мощности, должны быть разделены. Это условие определяет работу системы измерения и обработки данных с меньшей погрешностью.

Несмотря на то, что блоки питания БП1 и БП2 имеют стабилизаторы напряжения, ИН охвачен отрицательной обратной связью по напряжению и также предварительно стабилизирует выходное напряжение с помощью широтно-импульс-

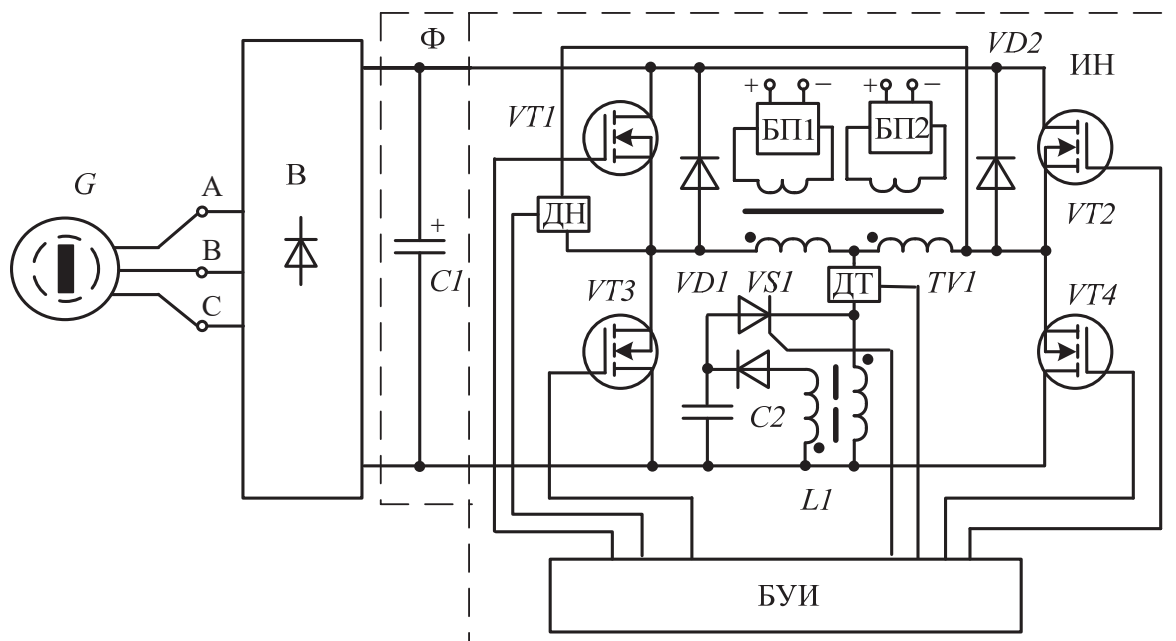


Рис. 2. Функциональная схема источника питания забойной инклинометрической телесистемы: G – синхронный генератор; B – выпрямитель; Φ – фильтр; ИН – инвертор напряжения; БУИ – блок управления инвертором; БП1 – блок питания 1; БП2 – блок питания 2; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения

Fig. 2. Functional diagram of power supply for downhole directional survey measure while drilling: G – synchronous generator; B – rectifier; Φ – filter; ИН – voltage inverter; БУИ – inverter control unit; БП1 – power supply 1; БП2 – power supply 2; ДТ – current sensor; ДН – voltage sensor

ной модуляции при рабочих изменениях скорости синхронного генератора и допустимых нагрузках. Информация о напряжении на первичной обмотке трансформатора $TV1$ формируется датчиком обратной связи по напряжению ДН. Кроме того, инвертор напряжения охвачен отрицательной обратной связью по току и ограничивает ток генератора G на допустимом уровне в случае его нештатной перегрузки. Измерение тока инвертора напряжения производится с помощью ДТ.

Установленные в преобразователе частоты двухобмоточный дроссель $L1$, тиристор $VS1$ и накопительный конденсатор $C2$ позволяют повысить его к.п.д. Накопленная при работе инвертора напряжения энергия в конденсаторе $C2$ и обмотках дросселя $L1$ сбрасывается в конденсатор $C1$ емкостного фильтра, подзаряжая его. Таким образом, повышается к.п.д. инвертора напряжения.

Моделирование работы электромашинного источника питания на нагрузку в инклинометрической телесистеме

При построении математической модели синхронного генератора принимаются следующие допущения:

- отсутствует насыщение магнитной цепи, потери в стали статора, эффект вытеснения тока на поверхности проводников статора;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивности рассеяния не зависят от положения ротора в пространстве.

В таком случае математическое описание синхронного генератора в ортогональной системе координат d, q , когда ось d ориентирована вдоль магнитной оси ротора, можно представить в следующем виде [14–20].

Уравнения электрического равновесия

$$U_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_1 i_q + z_p \omega L_d i_d + z_p \omega \Psi_f ;$$

$$U_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R_1 i_d - z_p \omega L_q i_q , \quad (2)$$

где U_q и U_d – напряжения фаз q, d обмоток статора эквивалентного двухфазного синхронного генератора; i_q и i_d – токи фаз q, d обмоток статора эквивалентного двухфазного синхронного генератора по осям q, d , для частного случая неявнополюсной конструкции ротора принимаем $L_q=L_d=L_1$; R_1 – активное сопротивление каждой из фаз обмотки статора; Ψ_f – потокосцепление, созданное постоянными магнитами ротора; z_p – число пар полюсов синхронного генератора; ω – скорость вращения синхронного генератора.

Токи фаз i_q и i_d синхронного генератора протекают по внешней цепи при подключенной нагрузке и в общем случае определяются уравнениями:

$$i_d = \frac{U_d}{Z_n}; \quad i_q = \frac{U_q}{Z_n}, \quad (3)$$

где Z_n – полное сопротивление нагрузки фазы синхронного генератора.

Электромагнитный момент сопротивления синхронного генератора для случая неявнополюсной конструкции ротора, когда $L_q=L_d=L_1$, равен

$$M_c = \frac{3}{2} z_p \Psi_f i_q, \quad (4)$$

где $3/2$ – коэффициент, учитывающий моделирование трехфазного синхронного генератора в двухфазной системе координат d, q .

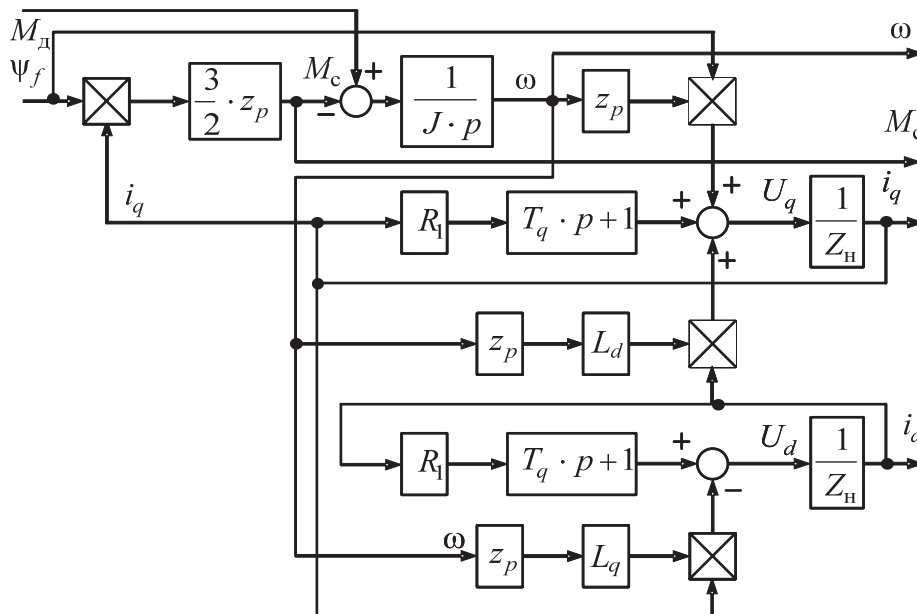


Рис. 3. Структурная схема эквивалентного двухфазного синхронного генератора в ортогональной системе координат d, q

Fig. 3. Block diagram of equivalent two-phase synchronous generator in d, q orthogonal reference frame

Вращение генератора подчинено уравнению движения

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

где M_d – момент движения, развиваемый турбиной генератора при ее вращении потоком бурового раствора; J – момент инерции генератора с турбиной.

Структурная схема синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, составленная на основании уравнений (2)–(5), приведена на рис. 3.

При моделировании на входе и выходе двухфазного синхронного генератора установлены, соответственно, обратный и прямой преобразователи Парка. Такое схемное решение позволяет подавать на вход модели двухфазного генератора трехфазное напряжение и представлять результаты исследований в трехфазной системе координат A, B, C . Входной переменной двухфазного генератора является момент движения M_d и потокосцепление Ψ_f (рис. 3).

Для исследования работы источника питания в инклинометрической телесистеме в программной среде *MatLab-Simulink* составлена программа имитационного моделирования электромашинного источника питания (рис. 4). Разгон и вращение генератора осуществляется асинхронным электроприводом с частотным регулированием скорости с широтно-импульсным регулированием напряжения преобразователя частоты [12, 14, 15]. Модель электропривода на рис. 4 не показана. Генератор, исследуемый в имитационной модели, имеет следующие основные параметры: $R_1=0,27$ Ом;

$L_q=L_d=0,33 \cdot 10^{-3}$ Гн; $\Psi_f=0,073$ Вб. При моделировании переходных процессов момент сопротивления синхронного генератора M_c учтен реактивной нагрузкой для приводного асинхронного двигателя. Момент инерции генератора приведен к валу асинхронного двигателя.

Обмотки статора генератора (рис. 4) подключены к трехфазному мостовому выпрямителю Universal Bridge 1. Выпрямленное пульсирующее напряжение сглаживается емкостным фильтром на конденсаторе $C1$, сопротивления подводящих к конденсатору проводников учитываются резистором $R1$. Нагрузка $R5$ подключена к емкостному фильтру $C1$ через инвертор напряжения Universal Bridge 2.

Основной нагрузкой синхронного генератора является электрический контур, образованный излучателем – диполем, один электрод которого – колонна, другой – буровой инструмент. Ток растекается в породе, окружающей скважину. Колонна и буровой инструмент отделены изолятором и немагнитным удлинителем. Основной ток замыкается по контуру между колонной и буровым инструментом. Часть тока – ток утечки – замыкается между колонной и антенной на поверхности земли. Антенна на поверхности земли по беспроводному электромагнитному каналу связи фиксирует токи утечки в толще породы. В дальнейшем по полученной информации наземные устройства определяют азимут и зенитный угол ствола скважины. Характер протекания тока от скважинного синхронного генератора через диполь по породе в земной коре аналогичен протеканию тока через актив-

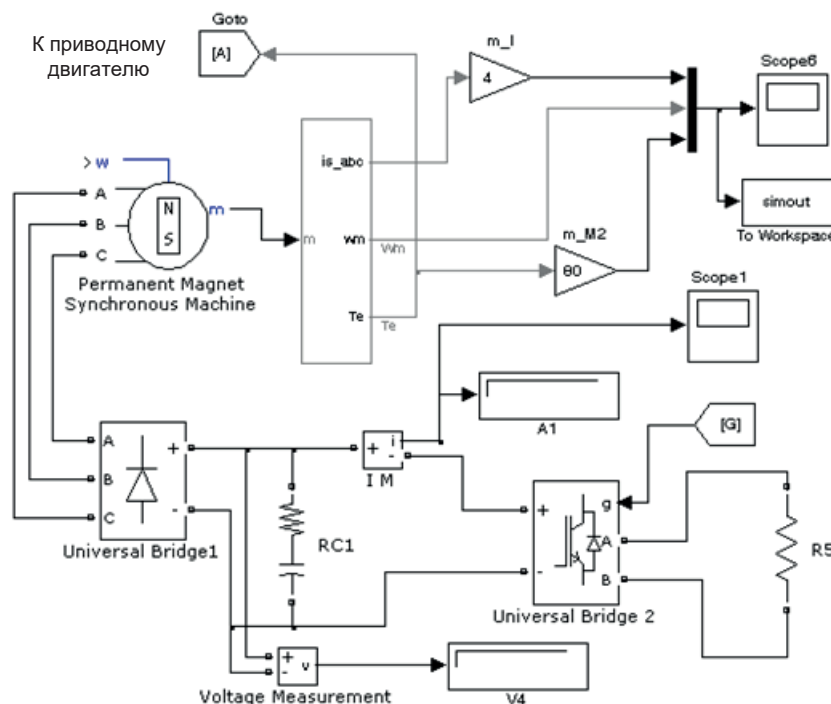


Рис. 4. Функциональная имитационная модель электромашинного источника питания с нагрузкой в инклинометрической телесистеме

Fig. 4. Functional simulation model of electric generator power supply with load in directional surveying system while drilling

ную нагрузку. В модели активная нагрузка учитывается резистором $R5$. Сопротивление резистора $R5=0,5-10$ Ом в зависимости от типа породы и ее влажности.

На рис. 5 приведены графики переходных процессов скорости генератора $\omega(t)$, его электромагнитного момента $M_c(t)$ и токов трех фаз $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ при пуске приводного двигателя генератора и плавного увеличения скорости. Электромагнитный момент электрической машины в генераторном режиме работы имеет тормозной характер и условно-отрицательный знак.

Пуск приводного асинхронного двигателя синхронного генератора осуществляется от преобразователя частоты через задатчик интенсивности, и, как показано на рис. 5, скорость приводного двигателя и синхронного генератора $\omega(t)$ изменяются плавно. При отсутствии колебаний скорости генератора его электромагнитный момент $M_c(t)$ существенно колеблется. Это объясняется, прежде всего, тем, что вся нагрузка синхронного генератора питается через выпрямительный мост (*Universal Bridge1*, рис. 3).

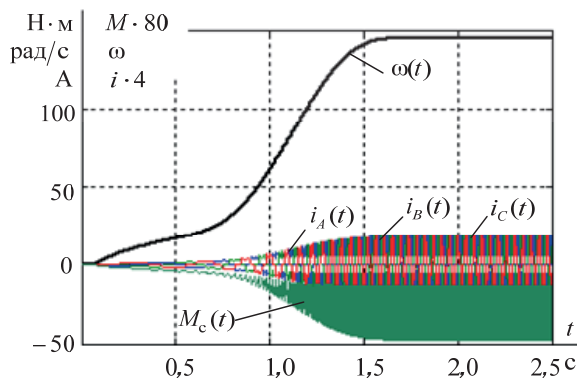


Рис. 5. Графики переходных процессов скорости синхронного генератора $\omega(t)$, его электромагнитного момента $M_c(t)$ и токов фаз $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ при пуске приводного двигателя

Fig. 5. Transients in speed $\omega(t)$, electromagnetic torque $M_c(t)$ of synchronous generator and phase currents $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ for starting a driving motor

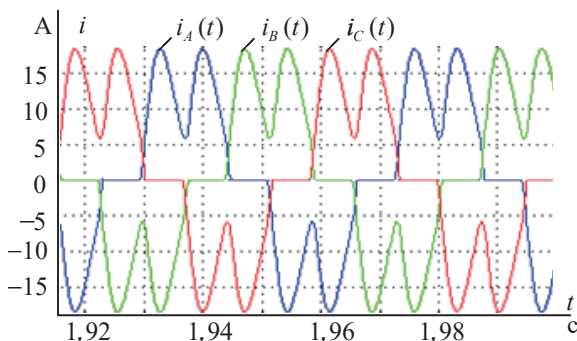


Рис. 6. Развернутая осциллограмма токов фаз статора $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ синхронного генератора в установившемся режиме

Fig. 6. Detailed oscillogram of stator phase currents $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ of synchronous generator in steady-state mode

Через обмотки статора синхронного генератора протекает прерывистый ток выпрямительного моста. Развернутая осциллограмма токов фаз статора синхронного генератора приведена на рис. 6.

Прерывистые токи фаз статора генератора вызывают колебания его электромагнитного момента. Эти дополнительные возмущения также сокращают срок службы скважинного синхронного генератора забойной инклинометрической телесистемы, так как разрушают изоляцию обмоток статора генератора, особенно в лобовых частях.

Экспериментальные исследования электромашиного источника питания забойной инклинометрической телесистемы

При всех внешних и внутренних воздействиях на целостность синхронного генератора забойной инклинометрической телесистемы его работоспособность должна сохраняться до окончания процесса бурения скважины, т. е. в течение 300–400 часов. Несмотря на относительную простоту конструкции и изготовления синхронного генератора, он является самым ненадежным узлом забойной инклинометрической телесистемы.

Окончательная проверка работоспособности электромашиного источника питания забойной инклинометрической телесистемы проводится на лабораторном стенде (рис. 7).

На стенде производятся:

- обкатка подшипников и притирка сальника высокого давления к вращающемуся валу генератора;
- снятие внешней характеристики генератора;
- проверки отсутствия протекания трансформаторного масла из корпуса генератора и компенсатора давления;
- отсутствие короткого замыкания между обмотками генератора и его корпусом;
- отсутствие межвитковых замыканий в обмотках генератора.

Так как срок службы генератора забойной инклинометрической телесистемы вследствие особенностей его конструкции и условий работы ограничен, то его испытания проводят также за короткое время. Отсутствие межвитковых замыканий в обмотках генератора проверяют при вращающемся генераторе частотно-регулируемым электроприводом стенда на двух фиксируемых установившихся скоростях: 98 и 145 рад/с при перегреве генератора на 10°C относительно температуры окружающей среды за 15 мин.

Для генератора, прошедшего лабораторные испытания, отпечатывается сертификат соответствия.

Выводы

1. Анализ выхода из строя синхронных генераторов инклинометрических систем приводит к выводу о необходимости компенсации давления бурового раствора на генератор с помощью резиновых компенсаторов.

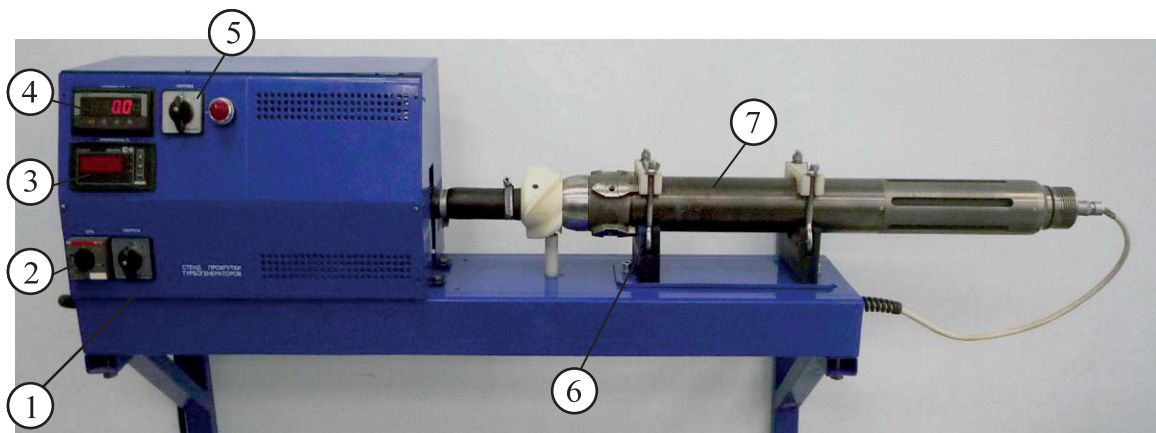


Рис. 7. Внешний вид стенда для испытания синхронного генератора забойной инклинометрической телесистемы: 1 – корпус стенда с асинхронным двигателем и преобразователем частоты; 2 – сетевой автомат включения стенда; 3 – индикатор температуры синхронного генератора; 4 – вольтметр; 5 – переключатель нагрузки генератора; 6 – датчик температуры; 7 – синхронный генератор

Fig. 7. Exterior of stand for testing synchronous generator for downhole directional survey measure while drilling: 1 is the cabinet of stand with induction motor and frequency converter; 2 is the power automatic circuit breaker of the stand; 3 is the temperature indicator of synchronous generator; 4 is the voltmeter; 5 is the switching device of generator load; 6 is the temperature sensor; 7 is the synchronous generator

2. Установлено, что синхронный генератор инклинометрической телесистемы, нагруженный через единственный выпрямитель, создает внутренние колебания электромагнитного момента, приводящие к увеличению вероятности преждевременного выхода из строя его обмоток.
3. Установлено, что применение в инклинометрической системе инвертора напряжения с гальванической развязкой нескольких нагрузок различной мощности позволяет уменьшить вероятность появления помех при обработке сигналов акселерометров.
4. Прокрутка и предварительный комплекс испытаний совместно с конструктивными решения-

ми при изготовлении синхронных генераторов инклинометрических телесистем позволили увеличить их срок службы при бурении скважин до 400 часов.

5. Установлено, что использование автоматизированных систем контроля синхронных генераторов инклинометрических телесистем позволяет произвести их функциональный контроль, сэкономить рабочее время и увеличить надежность электромашинных источников питания.

Исследование проводится в Томском политехническом университете в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ООО НПФ «ГОРИЗОНТ». Стратегия развития геонавигационного оборудования / В.М. Григорьев, М.Г. Аблеев, В.А. Камоцкий, Г.К. Файзрахманов, О.В. Филимонов // НТВ «Каротажник». – 2016. – Вып. 7 (265). – С. 70–86.
2. Чупров В.П., Васильев А.В., Кудряшов А.А. Коррекция влияния намагниченности компоновки низа буровой колонны на измерения азимута при навигации скважин с помощью телесистем // НТВ «Каротажник». – 2016. – Вып. 7 (265). – С. 131–135.
3. Хузина Л.Б., Любимова С.В., Шайхутдинова А.Ф. Техника для снижения сил трения при бурении горизонтальных участков скважин // Нефтепромышленное дело. – 2016. – № 9. – С. 38–42.
4. Система контроля процесса бурения «ГЕОСЕНСОР». Состояние и перспективы / В.М. Григорьев, И.В. Меньшиков, А.С. Галеев, Г.К. Файзрахманов, А.Р. Сулейманов, О.В. Филимонов // НТВ «Каротажник». – 2016. – Вып. 7 (265). – С. 86–95.
5. Чупров В.П., Шайхутдинов Р.А., Бикинеев А.А., Бельков А.В. и др. Опыт эксплуатации наддолжных модулей при бурении скважин // НТВ «Каротажник». – 2011. – Вып. 5 (203). – С. 16–26.
6. Аксельрод С.М., На повестке дня – полная автоматизация бурения (по материалам зарубежной печати) // НТВ «Каротажник». – 2016. – Вып. 4 (262). – С. 94–125.
7. Леонов С.В., Муравлев О.П., Каранкевич А.Г. Опыт разработки герметичных электромашинных источников питания инклинометрических устройств // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 162–165.
8. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
9. Данилевич Я.Б., Кочнев А.В. Синхронный генератор небольшой мощности с постоянными магнитами // Электричество. – 1996. – № 4. – С. 27–29.
10. Rymarski Z. Control Systems of Single-Phase Voltage Source Inverters for a UPS // IFAC Proceedings Volumes. – 2012. – V. 45. – P. 316–321.
11. Rashid M.H. Power Electronics Handbook, 4th ed. – New York: Butterworth-Heinemann, 2017. – 1522 p.
12. Coordinated control of multifunctional inverters for voltage support and harmonic compensation in a grid-connected microgrid /

- S.Yo.M. Mousavi, A. Jalilian, M. Savaghebi, J. M. Guerrero // Electric Power Systems Research. – 2018. – V. 155. – P. 254–264.
13. Транзисторный преобразователь частоты: пат. Рос. Федерации № 2614045; заявл. 06.04.16; опубл. 22.03.17, Бюл. № 9. – 2 с.
14. Удуг Л.С., Чернышев А.Ю., Гусев Н.В. Разработка и моделирование асинхронных электроприводов со скалярным управлением // Изв. вузов. Электромеханика. – 2015. – № 6 (359). – С. 43–49.
15. Fateh M., Abdellatif R. Comparative study of integral and classical backstepping controllers in IFOC of induction motor fed by voltage source inverter // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – P. 17953–17964.
16. Бут Д.А. Анализ и расчет синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов // Электричество. – 1996. – № 6. – С. 25–32
17. An inverter design for a new permanent magnet synchronous generator / G. Naki, I. Erdal, G. Halil, K. Erol // International journal of hydrogen energy. – 2017. – V. 42. – P. 17723–17132.
18. Tripathi S.M., Tiwari A.N., Deependra Singh. Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: a technology review // Renewable and sustainable energy reviews. – 2015. – V. 51. – P. 1288–1305.
19. Lertnuwat Ch., Oonsivilai A. Stability for wind turbine using observer method with permanent magnet synchronous generator (PMSG) // International conference on alternative energy in developing countries and emerging economy 2017 AEDCEE. – Bangkok, Thailand, 25–26 May 2017. – P. 122–127.
20. Application of nonlinear predictive control for changing the battery using wind energy with permanent magnet synchronous generator / R. Aissou, T. Rekioua, D. Rekioua, A. Tounzi // International journal of hydrogen energy. – 2016. – V. 41. – P. 20964–20973.

Поступила 19.03.2018 г.

Информация об авторах

Чернышева Т.А., старший преподаватель школы базовой инженерной подготовки отделения общетехнических дисциплин Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чернышев И.А., кандидат технических наук, доцент инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чернышев А.Ю., кандидат технических наук, доцент инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.248.5:531.7:621.311.6

ELECTRIC GENERATOR POWER SUPPLY SOURCE FOR DOWNHOLE DIRECTIONAL SURVEY MEASURE WHILE DRILLING

Tatyana A. Chernysheva¹,

cherta@tpu.ru

Igor A. Chernyshev¹,

chia@tpu.ru

Aleksandr Yu. Chernyshev¹,

ach@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is associated with the need to develop the reliable electric generator power supply sources for downhole directional survey measure while drilling.

The main aim is to research the electric generator power supplies, which will take into account operational conditions in controlled directional wells while their drilling.

Methods of the research are based on using Automatic Control Theory and imitational simulation under MatLab-Simulink software environment.

Results. The authors have determined the design of synchronous generator of downhole directional survey measure while drilling for increased reliability of the generator and developed the functional diagram of electronic part of the power supply of directional survey measure while drilling that allows dividing the information processing channel and data transmission channel to ground surface receivers. The electric generator power supply was simulated taking into account loading of a data transmission channel. The obtained simulation researches were validated by the experimental researches both on laboratory testbench and in field drilling of the controlled directional wells.

Findings. The authors found out that to increase reliability of synchronous generators of directional survey measure while drilling one need to equalize the pressures of drilling mud fluid and insulating oil, which fills the generator interiors, by means of rubber compensators. Synchronous generators of directional survey measure while drilling that is loaded via sole rectifier generates internal oscillations of electromagnetic torque, which cause the increasing probability of premature failure of its windings. It was established that using voltage source inverter with galvanic coupling of several loads of various power capacity allows decreasing probability of interferences while processing accelerometer signals. Pre-testing, simulation and design improvements of synchronous generators for directional survey measure while drilling allow increasing their service life for drilling wells. We found that using automated control systems of synchronous generators for directional survey measure while drilling allows controlling their function, saving operational time and increasing reliability of electric generator power supplies.

Key words:

Directional Survey MWD (measure while drilling), synchronous generator, permanent magnets, pressure compensator, voltage source inverter.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the grant of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

REFERENCES

1. Grigoriev V.M., Ableev M.G., Kamotssky V.A., Faizrakhmanov G.K., Filimonov O.V. OOO NPF GORIZONT LLC. Geonavigation equipment development strategy. *Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2016, vol. 265, no. 7, pp. 70–86. In Rus.
2. Chuprov V.P., Vasiliev A.V., Kudryashov A.A. Correction for the effect of bottomhole assembly magnetization on azimuth measurements in borehole navigation by telesystems. *Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2016, vol. 265, no. 7, pp. 131–135. In Rus.
3. Khuzina L.B., Lyubimova S.V., Shaikhutdinova A.F. The technique of friction forces reduction when drilling wells horizontal sections. *Neftepromyslovoe delo*, 2016, no. 9, pp. 38–42. In Rus.
4. Grigoriev V.M., Menshikov I.V., Glev A.S., Faizrakhmanov G.K., Suleymanov A.R., Filimonov O.V. Geosensor drilling control system current state and prospects. *Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2016, vol. 265, no. 7, pp. 86–95. In Rus.
5. Chuprov V.P., Shaykhutdinov R.A., Bikineev A.A., Belkov A.V. [Experience of using above-bit modules in borehole drilling. *Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2011, vol. 203, no. 5, pp. 16–26. In Rus.
6. Akselrod S.M. A complete automation of drilling is on the agenda (based on foreign publications). *Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2016, vol. 262, no. 4, pp. 94–125. In Rus.
7. Leonov S.V., Muravlev O.P., Karankevich A.G. Development of pressure tight electric generator power supplies for survey measure while drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 162–165. In Rus.
8. Balagurov V.A., Galteev F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Electric generators with permanent magnets]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 280 p.
9. Danilevich Ya.B., Kochnev A.V. Sinkhronniy generator nebolshoy moshchnosti s postoznnimi magnitami [Investigation of low-power synchronous generator with permanent magnets]. *Elektrichestvo*, 1996, no. 4, pp. 27–29.
10. Rymarski Z. Control Systems of Single-Phase Voltage Source Inverters for a UPS. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, vol. 45, pp. 316–321.

11. Rashid M.H. *Power Electronics Handbook*, 4th ed. New York, Butterworth-Heinemann, 2017. 1522 p.
12. Mousavi S.Yo.M., Jalilian A., Savaghebi M., Guerrero J.M. Coordinated control of multifunctional inverters for voltage support and harmonic compensation in a grid-connected microgrid. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol. 155, pp. 254–264.
13. Zeman S.K., Petrovich V.P., Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. *Tranzistorniy preobrazovatel chastoti* [Transistor frequency converter]. Patent RF, no. 2614045, 2017.
14. Udut L.S., Chernyshev A.Yu., Gusev N.V. Development and simulation of induction motor drives with scalar control. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika. (Russian Electromechanics)*, 2015, no. 3 (539), pp. 43–49. In Rus.
15. Fateh M., Abdellatif R. Comparative study of integral and classical backstepping controllers in IFOC of induction motor fed by voltage source inverter. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, pp. 17953–17964.
16. Bout D.A. Analiz i raschet sinkhronnykh mashin s vozbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov [Analysis and calculation of synchronous machines with permanent magnet excitation]. *Elektrichestvo*, 1996, no. 6, pp. 25–32.
17. Naki G., Erdal I., Halil G., Erol K. An inverter design for a new permanent magnet synchronous generator. *International journal of hydrogen energy*, 2017, vol. 42, pp. 17723–17132.
18. Tripathi S.M., Tiwari A.N., Deependra Singh. Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: a technology review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, vol. 51, pp. 1288–1305.
19. Lertnuwat Ch., Oonsivilai A. Stability for wind turbine using observer method with permanent magnet synchronous generator (PMSG). *International conference on alternative energy in developing countries and emerging economy 2017 AEDCEE*. Bangkok, Thailand, 25–26 May 2017. pp. 122–127.
20. Aissou R., Rekioua T., Rekioua D., Tounzi A. Application of nonlinear predictive control for changing the battery using wind energy with permanent magnet synchronous generator. *International journal of hydrogen energy*, 2016, vol. 41, pp. 20964–20973.

Received: 18 March 2018.

Information about the authors

Tatyana A. Chernysheva, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor A. Chernyshev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr Yu. Chernyshev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.