

УДК 621.313

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

О.П. Муравлев, А.И. Верхотуров, В.В. Големгрейн

Томский политехнический университет
E-mail: Golemgrein@mail2000.ru

Проведено математическое моделирование переходных электромеханических процессов. Оценено влияние параметров двигателя на динамические характеристики. Приведены рекомендации по разработке и созданию синхронных гибридных двигателей, обладающих высокой динамической устойчивостью работы.

Современное состояние и перспективы развития электроприводов с повышенными эксплуатационными требованиями неразрывно связаны с разработкой и созданием синхронных гибридных двигателей (СГД), объединяющих в единой конструкции положительные свойства синхронных реактивных и магнитоэлектрических машин [1, 2].

В СГД основную долю мощности вырабатывает синхронно-реактивная машина, как наиболее дешевая и простая по конструкции, а энергия постоянных магнитов используется для повышения энергетических и улучшения эксплуатационных характеристик.

Гибридные двигатели можно изготавливать на базе серийных асинхронных (конструкция статора) и синхронно-реактивных (конструкция ротора) электродвигателей, что существенно облегчает задачу создания таких машин.

При разработке гибридных двигателей важно знать динамические характеристики и синхронизирующие свойства СГД. Поэтому вопрос о влиянии параметров и угла сдвига полюсов магнитоэлектрической машины относительно полюсов синхронно-реактивной машины на динамическую устойчивость и синхронизирующие свойства гибридного двигателя особенно актуален.

Для решения поставленной задачи при общепринятых допущениях разработана математическая модель для расчёта динамических режимов СГД

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + \rho i_d - \psi_q \omega, \\ U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + \rho i_q + \psi_d \omega, \\ 0 &= \frac{d\psi_D}{dt} + r_D i_D, \\ 0 &= \frac{d\psi_Q}{dt} + r_Q i_Q, \\ M &= H \frac{d\omega}{dt} + M_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где потокосцепления обмоток записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi_d &= i_d x_{ds} + i_d x_s + i_D x_{dD} + \varepsilon \cos \lambda; \\ \psi_q &= i_q x_{qs} + i_q x_s + i_Q x_{qQ} + \varepsilon \sin \lambda; \\ \psi_D &= i_D x_{DD} + i_d x_{dD} + \varepsilon \cos \lambda; \\ \psi_Q &= i_Q x_{QQ} + i_q x_{qQ} + \varepsilon \sin \lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

а электромагнитный момент определяется из выражения

$$M = \psi_d i_q - \psi_q i_d. \quad (3)$$

В ур. (1–3) приняты следующие обозначения: U_d, U_q – напряжения обмотки статора по осям d и q ; i_d, i_q, i_D, i_Q – токи в обмотках статора и эквивалентных роторных обмотках (ЭРО); $\psi_d, \psi_q, \psi_D, \psi_Q$ – потокосцепления обмотки статора и ЭРО; ρ, r_D, r_Q – активные сопротивления обмотки статора и ЭРО; x_{ds}, x_{qs}, x_s – эквивалентные индуктивные сопротивления обмотки статора СГД; x_{dD}, x_{qQ} – сопротивления взаимной индукции между обмотками статора и ротора; x_{DD}, x_{QQ} – полные индуктивные сопротивления ЭРО; ε – степень возбужденности; H – инерционная постоянная вращающихся масс.

После приведения уравнений к виду, удобному для численного интегрирования, уравнения (1–3) можно решить, например, методом Рунге-Кутты второго порядка.

Важным параметром, характеризующим запас гибридного двигателя по динамической устойчивости, рис. 1, 2, является момент выхода из синхронизма $M_{\text{вых}}$ (максимальный момент сопротивления, набрасываемый на вал двигателя, при котором двигатель еще не выходит из синхронизма).

Для определения $M_{\text{вых}}$ использовался метод наброса нагрузки [3]. Для набрасываемого момента сопротивления M_n путем постепенного увеличения амплитуды момента находились два его граничных значения M_{n1} и M_{n2} . Эти моменты должны отличаться друг от друга на заданную величину (не более чем на 1 %) и удовлетворять условию, чтобы СГД работал устойчиво при меньших моментах (M_{n1}) и выпадал из синхронизма при больших моментах (M_{n2}). За момент выхода из синхронизма принимался меньший момент (M_{n1}).

В качестве возмущающего воздействия принималось скачкообразное изменение момента на валу. До момента наброса нагрузки СГД работал в режиме холостого хода.

На практике встречаются возмущения в виде одного или ряда импульсов (кратковременная нагрузка двигателя). При возмущении двигателя посредством прямоугольного импульса нагрузки в нем может варьироваться как время действия, так и величина момента нагрузки.

При импульсном набросе нагрузки величина момента выхода из синхронизма обозначена как $M_{\text{вых им}}$.

Синхронные гибридные двигатели рассчитываются на прямой пуск от полного напряжения сети. СГД работает при пуске как асинхронный и должен развить скорость, близкую к синхронной, и под действием синхронизирующего момента войти в синхронизм.

Условия втягивания в синхронизм характеризуются входным моментом $M_{\text{вх}}$, равным максимальному моменту сопротивления на валу, при котором двигатель достигает синхронной скорости, работая от сети с номинальным напряжением и частотой. Для этого определялись два граничных значения момента нагрузки, отличающиеся друг от друга на фиксированную величину (не более 1 %). При этом двигатель должен втягиваться в синхронизм при меньшем значении $M_{\text{н}}$, либо при большем моменте он продолжает работать в установившемся асинхронном режиме. Исходя из этого, входной момент принимался равным меньшему из указанных $M_{\text{н}}$.

На рис. 1, 2 представлены в относительных единицах зависимости динамических характеристик от параметров СГД. При исследованиях изменялся один из параметров, остальные оставались неизменными и принимали следующие значения:

$$\lambda = -90^\circ; x_d / x_q = 6; x_{q1} / x_{d1} = 2,5; \\ x_{d1} / x_d = 0,1; \rho = 0,03; \varepsilon = 0,3; H = 200.$$

Длительность импульса при набросе нагрузки принималась 40 о.е.

Наличие максимумов в кривых моментов (рис. 1, а) объясняется тем, что при $\lambda = -90^\circ$ отношение эквивалентных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям СГД наибольшее и угловые характеристики синхронно-реактивной и магнитоэлектрической машин согласуются наилучшим образом.

С ростом степени возбужденности ε (рис. 1, б) моменты выхода из синхронизма и синхронизирующий момент растут за счёт роста магнитоэлек-

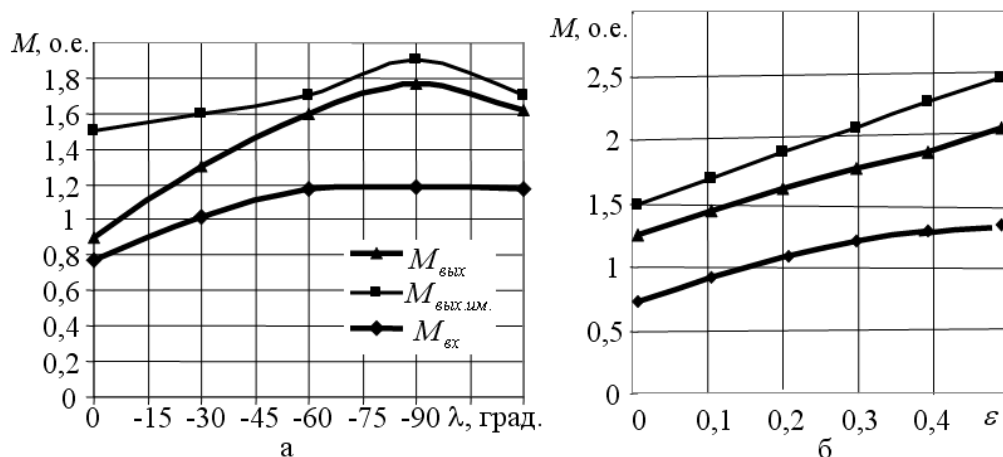


Рис. 1. Зависимость динамических характеристик от: а) угла между осями синхронно-реактивной и магнитоэлектрической частей СГД и б) степени возбужденности

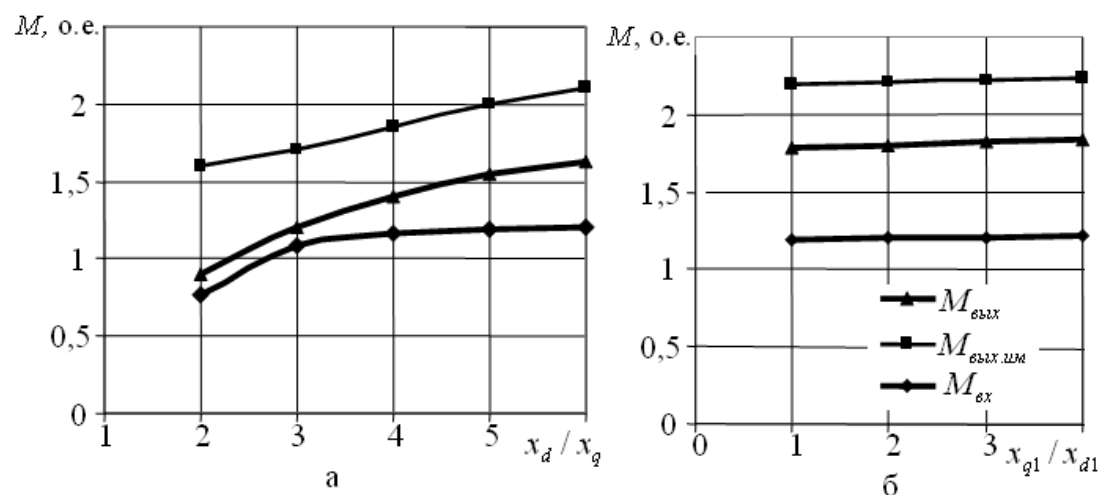


Рис. 2. Зависимость динамических характеристик от отношения индуктивных сопротивлений: а) синхронно-реактивной части, б) магнитоэлектрической части

трических составляющих этих моментов (как в синхронных двигателях с постоянными магнитами).

Рост отношения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям, рис. 2, *a*, увеличивает отношение эквивалентных индуктивных сопротивлений СГД и способствует увеличению динамической устойчивости двигателя.

Выводы

1. Для синхронного гибридного двигателя существует такое взаимное расположение осей полюсов магнитоэлектрической и синхронно-реактивной машинами ($\lambda = -90^\circ$), при котором двигатель обладает наибольшим запасом по динамической устойчивости и наилучшими синхронизирующими свойствами.
2. Степень возбужденности оказывает влияние на динамические характеристики СГД такое же,

как и в синхронных двигателях с постоянными магнитами.

3. Рост отношения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям x_d/x_q способствует увеличению динамической устойчивости и улучшению синхронизирующих свойств.
4. Характер границ динамической устойчивости при импульсной нагрузке в зависимости от параметров гибридного двигателя совпадает с режимом наброса нагрузки бесконечной длительности, а разница заключается лишь в величине момента выхода из синхронизма при различных длительностях импульса нагрузки.
5. Момент выхода из синхронизма при одинаковых параметрах двигателя превышает момент входа в синхронизм вследствие возникновения динамического момента, действующего согласно с моментом двигателя при замедлении ротора, и противоположно при ускорении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безрученко В.А., Галтеев Ф.Ф. Итоги науки и техники. Сер. Электрические машины и трансформаторы. — М.: ВИНТИ, 1982. — Т. 5. — 115 с.
2. А.с. 1663672 СССР. МКИ H02K 21/46. Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами / А.И. Верхотуров, В.Л. Горобец, А.С. Куминов. Оpubл. 1991, Бюл. № 6.
3. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). — М.: Высшая школа, 1987. — 287 с.

УДК 681.5:622.244

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

С.В. Леонов, О.П. Муравлев, А.Г. Каранкевич

Томский политехнический университет
E-mail: siberia99@mail.ru

Приведены сведения по разработке электромашиных источников питания скважинного прибора, применяемого при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин на нефть и газ. Предложено несколько конструкций, позволяющих увеличить время безотказной работы скважинного генератора за счет герметичного исполнения элементов магнитной системы электрической машины.

Для повышения эффективности вскрытия нефтяных пластов ведущие буровые компании широко используют современные технические средства, способствующие построению кустов и разбуриванию стволов старого фонда скважин. Данные технологии успешно внедряют с началом бурения горизонтальных и наклонно-направленных скважин, построение которых затруднительно без использования автоматизированного оборудования, повышающего уровень инженерного сопровождения буровых работ. Одним из наиболее перспективных направлений автоматизации при построении скважин специального профиля является применение забойных инклинометрических телесистем, способных непрерывно отслеживать траекторию движения буровой колонны [1].

В ходе эксплуатации забойных телесистем специалисты отмечают недостаточную продолжительность работы скважинного прибора. Регламентный период работы прибора ограничен низкой надежностью автономного электромашиного синхронного генератора (порядка 80 ч), применяемого в качестве источника электропитания инклинометрической и передающей аппаратуры. Данный недостаток связан с негерметичным исполнением конструкции электрической машины. Присутствие механических вибраций больших амплитуд и высокого давления бурового раствора (до 200 атм), содержащего абразивные частицы, приводит к увеличению технологических зазоров в сальниковых уплотнителях генератора. При попадании буровой жидкости внутрь электрической машины происхо-