

УДК 621.313.282.2

Р. Р. САТТАРОВ, Н. Л. БАБИКОВА, Е. А. ПОЛИХАЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в синхронных генераторах возвратно-поступательного движения (СГВПД). Разработана математическая модель, позволяющая исследовать характеристики и параметры СГВПД. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтверждают достоверность полученной математической модели. Автономные источники энергии; синхронные генераторы возвратно-поступательного движения; постоянные магниты

В последние годы возрос интерес к автономным источникам энергии, что подтверждается появлением значительного количества патентов и опытных образцов во всем мире. С помощью надежных малогабаритных и легких генераторов, дополненных интегральными выпрямителями, накопительными конденсаторами и электронными преобразователями уровня напряжения, в полевых условиях можно подзаряжать аккумуляторные батареи разнообразных маломощных потребителей, таких как сотовый телефон, фотоаппарат, карманные микроЭВМ, детские игрушки, электробритвы и т. д. Особый интерес проявляется к генераторам возвратно-поступательного движения, которые позволяют использовать «бесплатную» механическую энергию вибраций, толчков и т. п. Наиболее целесообразно использовать для этих целей синхронные генераторы с постоянными магнитами, при этом нет потерь энергии на возбуждения магнитного поля. В нефтеперерабатывающей промышленности подобные источники энергии, преобразуя вибрационное возвратно-поступательное движение долота, могут быть использованы для питания инклинометрической аппаратуры при разбуривании и исследовании скважин.

Синхронные генераторы возвратно-поступательного движения (СГВПД) представляют собой хорошо известные индуктивные преобразователи механической энергии в электрическую, вырабатываемую в соответствии с законом электромагнитной индукции при движении обмоток в магнитном поле постоянных магнитов. Однако КПД существующих преобразователей относительно низок,

частота возможных колебаний при ручном приводе составляет не более 5–6 Гц (типичные значения — 2–3 Гц), развиваемые мощности — доли Вт, а стоимость опытных образцов довольно высока. В настоящее время известны различные варианты конструктивного исполнения СГВПД [1], но вопросы их оптимального проектирования и применения проработаны явно недостаточно. Это сдерживает их серийное производство и широкое использование. В связи с этим теоретическое и экспериментальное исследование характеристик новых типов преобразователей является актуальной задачей.

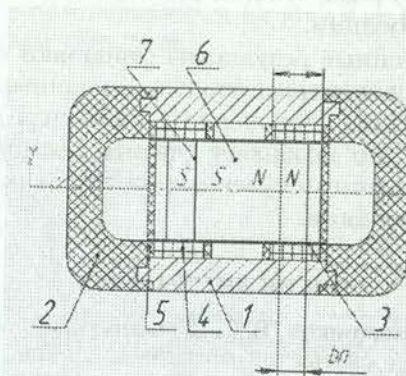


Рис. 1. Конструкция исследуемого СГВПД

Конструкция исследуемого СГВПД [2] показана на рис. 1. Полый цилиндрический корпус 1 выполнен из магнитомягкой стали. Внутри корпуса 1 размещен тонкостенный ферромагнитный каркас 3, также выполненный в виде полого цилиндра. На каркасе 3 расположены цилиндрические обмотки 4, соединенные последовательно и согласно. Сам кар-

кас 3 зафиксирован относительно корпуса 1 диэлектрическими кольцами 5. Внутри каркаса 3 с возможностью перемещения вдоль оси расположен постоянный магнит 6 цилиндрической формы. Постоянный магнит целесообразно выполнять из высококоэрцитивных редкоземельных сплавов, например NdFeB. Применение постоянных магнитов в системе возбуждения генератора позволяет создать надежные преобразователи, обладающие высоким уровнем КПД, малой массой и объемом на единицу полезной мощности.

На торцы магнита 6 паклены полюсные наконечники 7, выполненные из магнитомягкой стали, которые служат для концентрации магнитного потока постоянного магнита и направления его в радиальном направлении для максимального использования. Диэлектрические заглушки 2 герметизируют внутреннюю полость преобразователя и приводят к дополнительному ограничению перемещения магнита 6 с полюсными наконечниками 7 за пределы корпуса 1 из-за сжатия воздуха внутри полостей заглушек 2 («воздушная пружина»).

При придании осевого ускорения постоянный магнит 6 за счет сил инерции смещается по внутренней поверхности каркаса 3 относительно нейтрали магнитной системы в обратную сторону от направления ускорения. При движении магнита 6 его силовые линии пересекают витки цилиндрических обмоток 4, наводя в них ЭДС. При выходе подвижной части преобразователя вдоль оси за пределы магнитной системы возникают электромагнитные силы, возвращающие подвижную часть в нейтральное положение в магнитной системе («магнитная пружина»).

Основные характеристики СГВПД определяются распределением электромагнитного поля. Магнитное поле в исследуемом генераторе трехмерно и может быть рассчитано только численными методами. В настоящее время для этой цели используются современные пакеты математического моделирования полей. Однако результаты таких исследований целесообразно использовать на заключительных этапах проектирования для оптимизации магнитной системы. Так как анализ магнитного поля в рассматриваемых генераторах возможен только численными способами, то для проектирования необходимы методы, позволяющие получить аналитические выражения для распределения магнитных потоков. Для создания достаточно простых и достаточно точных математических моделей в настоящее время используются модели на основе представления о магнитных цепях [1].

Для правильного представления магнитной цепи необходимо определить пути возможного прохождения магнитных потоков. С этой целью распределение магнитного поля было смоделировано в пакете ElCut. Получены картины поля на холостом ходу и при нагрузке генератора. На рис. 2 показано распределение магнитных потоков от постоянных магнитов, образующих магнитную систему генератора в симметричном положении по отношению к оси генератора. Также в пакете ElCut определена величина МДС постоянного магнита.

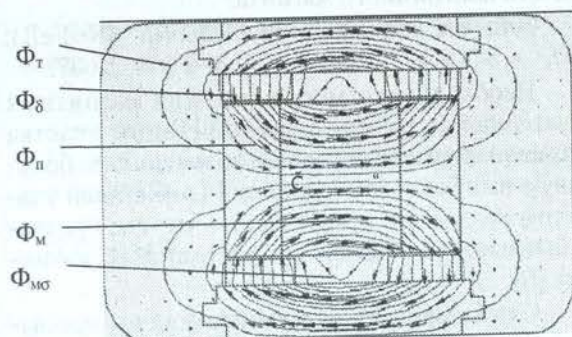


Рис. 2. Картина поля на холостом ходу СГВПД

Анализ полученных распределений электромагнитного поля показывает, что существуют потоки трех видов:

- магнитные потоки Φ_T , проходящие через воздушные промежутки по краям (торцам) корпуса, и замыкающиеся между полюсными наконечниками по магнитопроводу — торцевые потоки;

- потоки рассеяния магнита $\Phi_{M\sigma}$;

- потоки в рабочем воздушном зазоре Φ_δ .

Торцевые магнитные потоки при различных положениях индуктора замыкаются по воздуху вне пределов рабочего воздушного зазора и не сцеплены с обмотками W_1 и W_2 . Потоки рассеяния магнита замыкаются в пределах воздушного зазора, также не сцепляясь с обмотками. Эти потоки не индуцируют ЭДС. Потоки в рабочем воздушном зазоре замыкаются между полюсными наконечниками и сцепляются с обмотками W_1 и W_2 , и наводят в последних ЭДС холостого хода.

Картина распределения магнитного поля позволяет получить схему замещения магнитной цепи. При составлении схемы замещения используются общепринятые допущения [3–5]. Современные высококоэрцитивные материалы постоянных магнитов имеют линейный рабочий участок кривой размагничивания. При этом возможно рассматри-

вать постоянные магниты как источник МДС $F_M = H_C \cdot l_M$ с внутренним магнитным сопротивлением

$$R_M = \frac{l_M}{\mu_M \mu_0 S_M},$$

где H_C — коэрцитивная сила;

l_M — длина постоянного магнита;

$S_M = \pi \frac{D_M^2}{4}$ — площадь поперечного сечения постоянного магнита;

D_M — диаметр магнита;

$\mu_M = \frac{B_r}{\mu_0 H_C}$ — относительная проницаемость постоянного магнита.

Для сплава неодимжелезобор (NdFeB): $H_C = 844$ кА/м, $B_r = 1,1$ Тл и $\mu_M = 1,037$.

Необходимо отметить, что для магнитных материалов, не имеющих линейного участка кривой размагничивания, а имеющих большую выпуклость этой кривой, линейный участок создается искусственно путем предварительной стабилизации постоянного магнита [6].

Схема замещения магнитной цепи эквивалентная картине, изображенной на рис. 2, показана на рис. 3. На этой схеме замещения дополнительно введены обозначения Φ_M — поток магнита; Φ_{II} — поток полюсного наконечника.

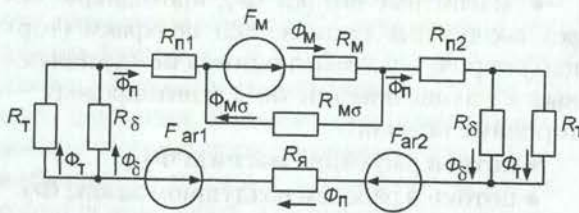


Рис. 3. Схема замещения СГВПД

Магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора под полюсными наконечниками

$$R_\delta = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{S_\delta} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{\pi D_M b_{II}},$$

где δ — величина воздушного зазора;

$S_\delta = \pi D_M b_{II}$;

b_{II} — ширина полюсного наконечника.

Магнитное сопротивление полюсного наконечника определяется как сопротивление соответствующего цилиндра

$$R_{II} = R_{n1} = R_{n2} = \frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{D_M}{2\pi \frac{D_M}{2} b_{II}} = \frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{1}{2\pi b_{II}},$$

где μ — относительная проницаемость стали.

Магнитное сопротивление ярма якоря

$$R_\text{я} = \frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{l_M + 2b_{II}}{S_{CT}},$$

где $S_{CT} = \pi (R_2^2 - R_1^2)$;

R_2 — внешний диаметр якоря;

R_1 — внутренний диаметр якоря.

Магнитное сопротивление торцевой части полюсного наконечника можно определить известным методом определения проводимостей элементарных путей потока [7].

$$R_T = \frac{1}{0,52 \mu_0} \frac{1}{\pi D_M} / 2.$$

Выражение для магнитного сопротивления рассеяния $R_{M\sigma}$ получать нецелесообразно, так как поток рассеяния магнита удобно определять с помощью коэффициента рассеяния σ [3]

$$\frac{\Phi_M}{\Phi_{II}} = \sigma.$$

Обмотки с одинаковым числом витков создают поле реакции якоря. При этом в продольной оси МДС этих обмоток взаимно компенсируется $F_{ar1} = -F_{ar2}$. Поперечная реакция приводит к ослаблению потока под одним краем и усилению под другим обмотки. Так как ширина обмотки превышает ширину полюса b_{II} , то таким влиянием реакции якоря можно пренебречь. Таким образом, магнитная цепь в режиме холостого хода и под нагрузкой описывается одной и той же схемой замещения.

В соответствии с законами Кирхгофа для магнитных цепей (закон равновесия МДС и равенства потоков в узле) по схеме замещения могут быть составлены уравнения и записаны в следующем виде:

$$F_M = \Phi_M R_M + \Phi_{II} R_{n2} + 2\Phi_\delta R_\delta + \Phi_{II} R_\text{я} + \Phi_{II} R_{n1}; \quad (1)$$

$$\Phi_{II} = \Phi_T + \Phi_\delta; \quad (2)$$

$$\Phi_T R_T - \Phi_\delta R_\delta = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) дает $\Phi_T = \Phi_\delta \frac{R_\delta}{R_T}$, далее

$$\Phi_{II} = \Phi_\delta \frac{R_\delta}{R_T} + \Phi_\delta = \Phi_\delta \left(\frac{R_\delta}{R_T} + 1 \right).$$

В общем случае поток в воздушном зазоре будет определяться как

$$\Phi_{\delta} = \frac{F_M}{\left(\frac{R_{\delta}}{R_r} + 1\right) [\sigma R_M + (2R_{\Pi} + R_{Я})] + 2R_{\delta}} \quad (4)$$

Этот поток при движении индуктора вызывает появление ЭДС в обмотках. ЭДС движения, как известно, описывается как

$$e = nvlB_{\delta}, \quad (5)$$

где $n = \frac{N}{\tau_{секц}} b_{\Pi}$ — число эффективных витков обмотки; $B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}} = \frac{\Phi_{\delta}}{b_{\Pi} \pi D_M}$ — индукция в воздушном зазоре; $l = \pi D_M$ — длина витка.

Скорость перемещения постоянных магнитов может быть принята изменяющейся по гармоническому закону

$$v = v_m \cos \omega t, \quad (6)$$

где $v_m = \omega A$ — максимальная скорость движения подвижной части генератора; $A = \frac{\tau_{обм} - b_{\Pi}}{2}$ — амплитуда колебаний при перемещении подвижного индуктора генератора из одного крайнего положения в другое; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота периодического возмущения. Здесь дополнительно принято, что индуктор под действием воздушной, магнитной или механической пружины движется в пределах якоря.

При изменении скорости движения подвижной части по гармоническому закону, с учетом вышеизложенного можно получить следующее значение для мгновенного значения ЭДС

$$e = E_m \cos \omega t, \quad (7)$$

где $E_m = \frac{N}{\tau_{секц}} b_{\Pi} \pi D_M \frac{\Phi_{\delta}}{b_{\Pi} \pi D_M} \omega \frac{\tau_{секц} - b_{\Pi}}{2} = N \pi f \Phi_{\delta} \left(1 - \frac{b_{\Pi}}{\tau_{секц}}\right)$ — амплитудное значение ЭДС.

$$E = U + I(r + jx),$$

где U — напряжение на внешней нагрузке; r — активное сопротивление обмоток, $x = \omega L$ — индуктивное сопротивление обмоток.

Предположительно генератор будет использоваться для подзарядки аккумуляторной батареи, индуктивное сопротивление которой равно нулю.

Рассмотрим эквивалентную электрическую схему генератора при работе на активную нагрузку (рис. 4). Электрическая цепь

состоит из линейных элементов, следовательно, напряжение на зажимах генератора будет изменяться пропорционально току в цепи.

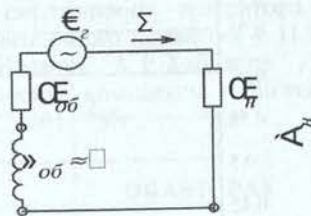


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема генератора при работе на активную нагрузку

Напряжение на внешней нагрузке определяется по формуле

$$U = \frac{E \sqrt{R_{нагр}^2 + (\omega l_{нагр})^2}}{\sqrt{(R_{нагр} + R_{ген})^2 + (\omega l_{нагр} + \omega l_{ген})^2}}$$

Отсюда

$$U \approx E \frac{R_{нагр}}{\sqrt{(R_{нагр} + R_{ген})^2}}$$

По данной математической модели построены частотные нагрузочные характеристики СГВПД (рис. 5). При малых частотах, как видно из рисунка, с ростом частоты пропорционально ей увеличивается амплитуда напряжения и характеристика генератора представлена почти прямой линией. Затем, при возрастании частоты, напряжение увеличивается медленнее и характеристика отклоняется от прямой линии в сторону оси абсцисс. Характеристики определены для разных сопротивлений нагрузки.

Для проверки точности полученной математической модели были проведены экспериментальные исследования магнитного поля и электродвижущей силы. Исследуемый образец ГСВПД при длине рабочей части корпуса 1, равной 27 мм, и диаметре 22 мм имеет следующие основные параметры: индуктивность выходной обмотки (секции 4 соединены последовательно и согласно) $L_{обм} = 22,1 \pm 2\%$ мГн (частота измерения 1 кГц); активное сопротивление выходной обмотки $R_{обм} = 167,4 \pm 0,5\%$ Ом; число витков выходной обмотки (обе секции) равно 472; ширина обмотки $4\tau_{обм} = 10$ мм; значение размера $b_n = 5$ мм; длина постоянного магнита 6 — 17,5 мм; наружный диаметр постоянного магнита 6 — 20 мм; масса постоянного магнита 6 — 24 г; масса всего преобразователя — 245 г [2].

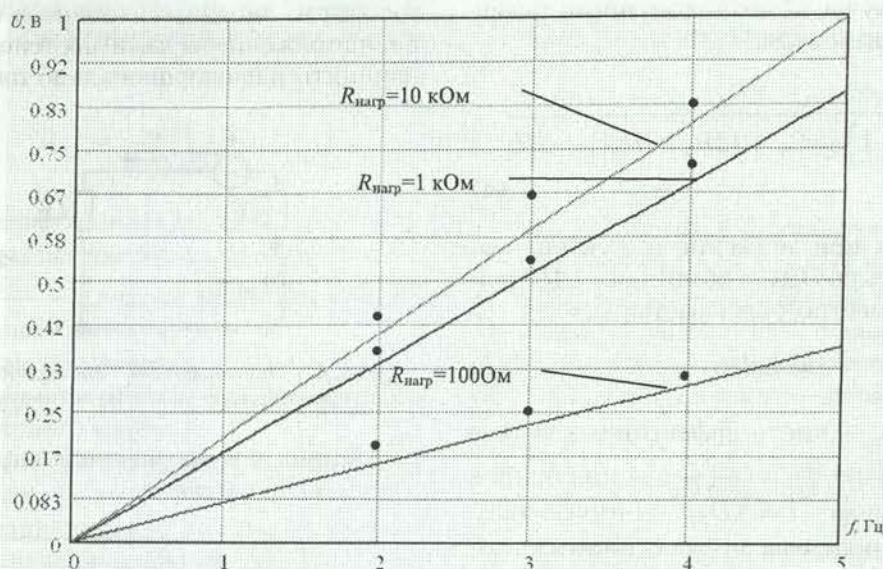


Рис. 5. Частотные нагрузочные характеристики СВВПД: — — теоретические данные; ●●● — экспериментальные

Для определения нагрузочных характеристик СВВПД был разработан специальный испытательный стенд. Внешний вид испытательного стенда приведен на рис. 6.

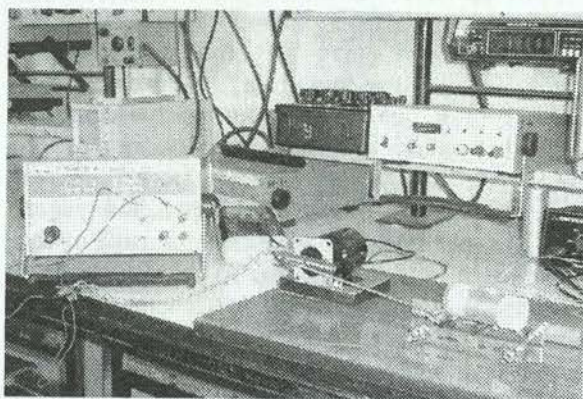


Рис. 6. Внешний вид стенда для испытаний СВВПД

Возвратно-поступательное движение преобразователя обеспечивалось с помощью кривошипно-шатунного механизма, приводимого во вращение двигателем постоянного тока Д25Г. При этом сам СВВПД жестко закреплялся на специальной тележке хомутами, а сама тележка шарнирно соединялась с концом шатуна (тяги). Рабочий ход кривошипно-шатунного механизма был равен 60 мм, что превышало значение возможного смещения подвижной части преобразователя в процессе работы и обеспечивало одинаковость такого смещения при любой частоте циклов. Регулирование частоты циклов работы СВВПД производилось путем изменения выходно-

го напряжения источника питания двигателя Д25Г. Вид импульсов выходного напряжения преобразователя контролировался с помощью осциллографа С1-83. Для оцифровки выходного напряжения и записи в память ПЭВМ использовалась специализированная плата ввода Handy Probe с частотой опроса (преобразования) 5 кГц [8]. При максимальной частоте рабочих циклов СВВПД, равной 5 Гц, это позволяет в соответствии с теоремой В. А. Котельникова получить детальные осциллограммы и использовать их для построения характеристик СВВПД.

С учетом дальнейших преобразований (выпрямление, заряд накопительного конденсатора и преобразование уровня выходного напряжения до требуемого значения) наибольший интерес представляет амплитуда выходного напряжения СВВПД в различных режимах работы с различными нагрузками. Как и ожидалось, наиболее существенно на значение амплитуды выходных импульсов влияет частота рабочих циклов и значение сопротивления нагрузки. При изменении этой частоты с 3 до 5 Гц при $R_{нагр} > 1 \text{ кОм}$ преобразователь позволяет получить выходное напряжение $\approx 1 \text{ В}$. Этого значения вполне достаточно для надежного выпрямления, заряда накопительного конденсатора и использования для питания маломощных нагрузок даже без использования специального преобразователя напряжения.

На рис. 5 также приведены результаты экспериментальных исследований амплитуды выходных импульсов СВВПД (от значения частоты $F_{рц}$ рабочих циклов при по-

стоянном значении сопротивления нагрузки $R_{\text{нагр}}$). Указанные зависимости (на рисунке показаны точками) позволяют определять положение рабочих режимов СГВПД и выполнять проектирование вторичной электроники.

Таким образом, составлена математическая модель СГВПД. В результате анализа модели установлено, что при частоте более 3 Гц и сопротивлении нагрузки более 1 кОм возможно получение значения амплитуды выходных импульсов 0,5–1 В. Проведенные экспериментальные исследования опытного образца подтверждают достоверность математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. СПб.: Корона принт, 2004. 368 с.
2. Патент РФ № 2304342, МПК7. Генератор возвратно-поступательного движения / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, Н. Л. Бабилова, В. В. Макеев, В. А. Чигвинцев, Ю. Г. Порошин. Заявл. 30.03.2006. Н 02 К 35/02.
3. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
4. Choi, Ho-Yong. Performance evaluation of Halbach magnetized linear generator for mobile apparatus / Ho-Yong Choi, Hyun-Kyo Jung, Sang-Yong Jung // Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2004. № 20. P. 141–147.
5. Куракин, К. И. Анализ систем автоматического регулирования на несущей переменного тока / К. И. Куракин, Л. К. Куракин. М.: Машиностроение, 1978. 238 с.
6. Герасимов, В. Г. Электротехнический справочник / под общ. ред. проф. В. Г. Герасимова. 9-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 696 с.

7. Пятин, Ю. М. Постоянные магниты. Справочник / под ред. Ю. М. Пятина. 2-е изд. М.: Энергия, 1980.
8. Бабилова, Н. Л. Исследование характеристик синхронного генератора возвратно-поступательного движения / Н. Л. Бабилова, М. П. Иванов, А. Р. Хайдаров // Электротехнические комплексы и системы. УГАТУ, 2007. С. 201–208.

ОБ АВТОРАХ



Саттаров Роберт Радилович, доц. каф. электромеханики. Дипл. физик-геофизик (БГУ, 1996). Канд. техн. наук по элементам и системам управления (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. электромех. преобр. энергии.



Бабилова Наталья Львовна, асс. той же каф. Дипл. инж.-электромех. (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.



Полихач Евгений Александрович, асп. той же каф. Дипл. магистр в обл. электротехн., электромех., электротехпол. (УГАТУ, 2006). Готовит дис. в обл. электромех. преобраз. энергии.