МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Подлесный С. В.

Униполярные машины обладают уникальными особенностями. Они позволяют сравнительно простыми и экономичными средствами генерировать без пульсаций постоянный ток большой величины, открывая широкие перспективы их практического использования. Целью данной работы является создание комплексной динамической модели униполярного генератора с цилиндрическим ротором на основе электромеханических аналогий Лагранжа-Максвелла. В модели, представляющей систему нелинейных дифференциальных уравнений, взаимоувязаны как механические характеристики (момент инерции, угловая скорость и др.) так и электромагнитные параметры устройства (электродвижущая сила, индуктивность, омическое сопротивление и др.). В общем виде найдено решение этой системы, позволяющее выполнять дальнейший анализ динамики генератора, задавая его конкретные параметры.

Уніполярні машини характеризується унікальними особливостями. Вони дозволяють порівняно простими й економічними засобами генерувати без пульсацій постійний струм великої величини, відкриваючи широкі перспективи їх практичного використання. Метою даної роботи є створення комплексної динамічної моделі униполярного генератора з циліндровим ротором на основі електромеханічних аналогій Лагранжа-Максвелла. У моделі, що представляє систему нелінійних диференціальних рівнянь, взаємопов’язані як механічні характеристики (момент інерції, кутова швидкість та ін.), так і електромагнітні параметри пристрою (електрорушійна сила, індуктивність, омічний опір та ін.). У загальному вигляді знайдено рішення цієї системи, що дозволяє виконувати подальший аналіз динаміки генератора, задаючи його конкретні параметри.

Unipolar machines have unique features. They allow a relatively simple and cost-effective means to generate pulse-free DC high value, opening up broad prospects for their practical use. The aim of this work is to create an integrated dynamic model of unipolar generator with a cylindrical rotor on the basis of electromechanical analogies Lagrange-Maxwell. In the model, representing a system of nonlinear differential equations, as interrelated mechanical properties (moment of inertia, angular velocity, etc.) And electromagnetic parameters of the device (the electromotive force, inductance, ohmic resistance, etc.). In general terms, found a solution to this system, allowing to carry out further analysis of the dynamics of the generator by specifying its specific parameters.

Подлесный С. В. канд. техн. наук, доц. каф. ТМ ДГМА
sergeypodlesnyj@mail.ru

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 624.313

Подлесный С. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА

В Википедии отмечается [1], что бурное развитие ряда отраслей промышленности и новейшей техники за последние 10–15 лет потребовало создания установок на весьма большие постоянные токи, измеряемые сотнями килоампер. В большинстве случаев подобные установки являются низковольтными. В этих условиях для электрических униполярных машин открылись широкие перспективы практического использования, так как именно указанный тип источника позволяет сравнительно простыми и экономичными средствами генерировать без пульсаций постоянный ток большой величины. В связи с этим к униполярным генераторам был снова проявлен повышенный интерес исследователей, благодаря чему оказалась успешно решенной проблема токосъема, который долгое время сдерживал развитие униполярных машин. Использование новых жидкометаллических сплавов, обладающих низкой температурой плавления и вязкостью при высокой электрической проводимости, позволили разработать экономичные, малогабаритные токосъемные устройства, допускающие высокие плотности тока в контакте. Это дало возможность построить весьма мощные униполярные генераторы, которые сочетали лучшие качества, присущие машинам данного типа; простоту и надежность конструкции, малые габариты и высокие технико-экономические показатели, генерирование напряжения и тока без пульсаций, высокую термическую и перегрузочную способность по току, отсутствие изнашивающихся частей в силовой цепи и т. д.

Известны различные схемы и конструкции униполярных генераторов [2–8]. К ним относятся: диск Фарадея, униполярный генератор Тесла, модели Дас Гупта, Форбса, Тюри, Леру, униполярные генераторы с Тобразными и колоколообразными роторами, N-машина Брюса де Палма, униполярные машины Неггерата, Пуарсона, Сомеда, Угримова, Пулэна, Лифшица, Менде и др. Для некоторых типов генераторов разработаны достаточно подробные методики расчета [2]. Однако, рассмотрение, как правило, ограничивается описанием только электромагнитной составляющей без исследования влияния динамических параметров механической части системы.

Целью данной работы является разработка и исследование комплексной динамической модели униполярного генератора на основе электромеханических аналогий Лагранжа-Максвелла.

Рассмотрим модель униполярного генератора с цилиндрическим ротором (рис. 1).

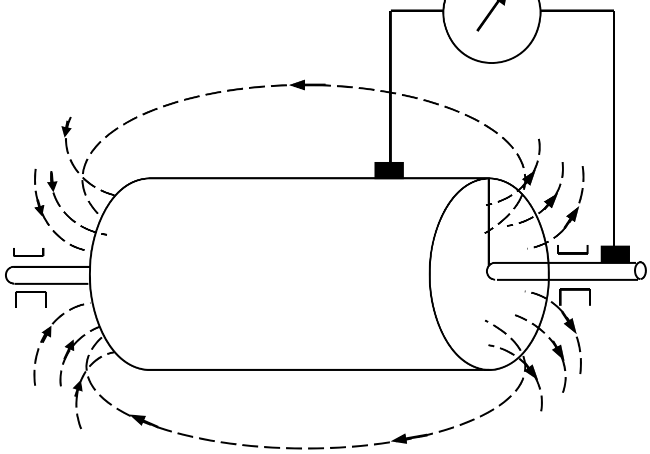

Рис. 1. Схема цилиндрической модели униполярной машины

Возможны варианты, когда магнитное поле вращается вокруг цилиндра или цилиндр вращается в магнитном поле. С боковой поверхности цилиндра и вала напряжение снимается при помощи двух щеток.

Принципиальная схема такого генератора показана на рис. 2 [2].

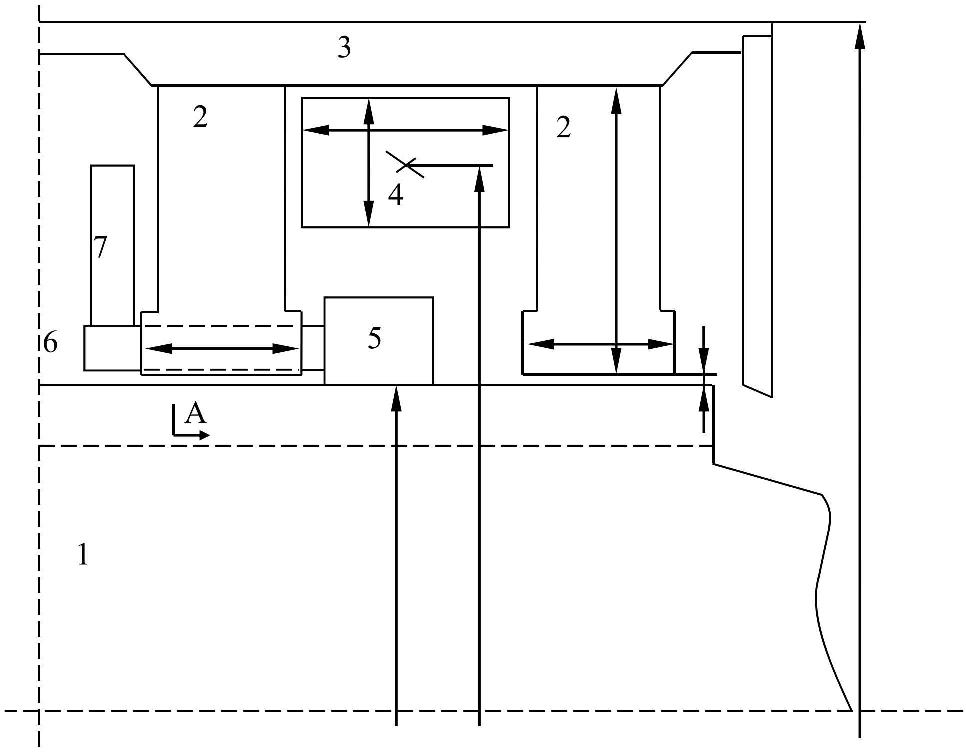

Рис. 2. Конструктивная схема униполярной машины с цилиндрическим ротором:

1 – ротор; 2 – кольцевой полюс; 3 – корпус статора; 4 – обмотка возбуждения; 5 – токосъем; 6 – компенсационные стержни; 7 – шинопровод

Зададимся данными для расчета: угловая скорость вращения ротора ω, электродвижущая сила (ЭДС) ротора E, рабочий ток i, омическое сопротивление генератора R, индуктивность L генератора, диаметр ротора D, длина бочки ротора l, плотность материала ротора γ.

ЭДС можно принять пропорциональной току i и угловой скорости ω: $E = \alpha\, i\, \omega$.

Объем ротора $V = l\,\pi\,D^2/4$. Масса ротора $m = \gamma\, V$. Момент инерции ротора:

$$J = \frac{m}{2}\frac{D^2}{4} = \frac{\pi}{32}\gamma l D^4\ . \tag{1}$$

В основу модели положена электродинамическая аналогия: сила – напряжение. В качестве обобщенных координат принимаем угол поворота вала φ и заряд q. Тогда, уравнения Лагранжа-Максвелла для системы запишутся в виде:

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi\,; \\ &\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial T}{\partial q} = Q_q\,, \end{aligned} \tag{2}$$

где T – кинетическая энергия системы, Q_φ и Q_q – обобщенные силы, отнесенные к соответствующим обобщенным координатам.

Приведеный механический момент M_n на роторе определим исходя из баланса механической и электрической мощностей: $M_n \cdot \omega = E \cdot i$. Или $M_n = \alpha \cdot i^2$.

Для определения обобщенной силы Q_φ дадим системе возможное перемещение по углу поворота $\delta\varphi \neq 0$ и будем считать $\delta q = 0$. Обобщенная сила определяется по формуле:

$$Q_\varphi = \frac{\left(\sum \delta A_k\right)_\varphi}{\delta\varphi}.$$

где сумма работ сил на возможном перемещении системы $\left(\sum \delta A_k\right)_\varphi = M_n \cdot \delta\varphi$. Тогда

$$Q_\varphi = \alpha \cdot i^2 \, Q_{\varphi=} \, \alpha \cdot i^2. \tag{3}$$

Теперь принимаем $\delta\varphi=0$ и $\delta q\neq 0$. Обобщенная сила

$$Q_\varphi = \frac{\left(\sum \delta A_k\right)_q}{\delta q} = \frac{(E - iR)\delta q}{\delta q} = E - iR\,. \tag{4}$$

Кинетическую энергию T найдем как сумму механической энергии T_1 и электрокинетической энергии T_2:

$$T_1 = \frac{1}{2} J\omega^2;\; T_2 = \frac{1}{2} Li^2;$$

$$T = \frac{1}{2} J\omega^2 + \frac{1}{2} Li^2\,.$$

Найдем производные от кинетической энергии, которые входят в уравнение (2), учитывая, что $\dot{\varphi} = \omega$ и $\dot{q} = i$:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = J\omega; \qquad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}\right) = J\frac{d\omega}{dt}; \qquad \frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0\,. \tag{5}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} = Li; \qquad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right) = L\frac{di}{dt}; \qquad \frac{\partial T}{\partial q} = 0\,. \tag{6}$$

Подставив (3)–(6) в (2), получим:

$$\begin{cases} J\dfrac{d\omega}{dt} = \alpha \cdot i^2, \\ L\dfrac{di}{dt} + i \cdot R = \alpha \cdot i \cdot \omega. \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} J \cdot \omega' = \alpha \cdot i^2, \\ L \cdot i' + i \cdot R = \alpha \cdot i \cdot \omega. \end{cases} \tag{7}$$

В (7) из второго уравнения выразим ω и подставим в первое, получим:

$$i'' - \frac{(i')^2}{i} = Bi^3, \tag{8}$$

где $B = \dfrac{\alpha^2}{JL}$.

Для решения уравнения (8) используем подстановку:

$$i' = V(i).$$

Тогда $i'' = V\dfrac{dV}{di}$ и уравнение (8) перепишется в виде

$$V\frac{dV}{di} - \frac{V^2}{i} = Bi^3 \text{ или } \frac{dV}{di} - \frac{V}{i} = \frac{Bi^3}{V}. \quad (9)$$

Уравнение (9) – это уравнение Бернулли. Для его решения используем подстановку

$$V = u \cdot z. \quad (10)$$

$$\frac{dV}{di} = u\frac{dz}{di} + z\frac{du}{di};$$

и

$$\frac{dz}{di} + z\left(\frac{du}{di} - \frac{u}{i}\right) = \frac{Bi^3}{u \cdot z},$$

$$\begin{cases} \dfrac{du}{di} - \dfrac{u}{i} = 0, \\ \dfrac{dz}{di} = \dfrac{Bi^3}{u^2 \cdot z}. \end{cases} \quad (11)$$

Решаем первое уравнение системы(11):

$$\frac{du}{u} = \frac{di}{i} \Rightarrow \ln u = \ln i \Rightarrow u = i. \quad (12)$$

Второе уравнение системы (11) с учетом (12):

$$z\frac{dz}{di} = \frac{Bi^3}{i^2} \Rightarrow zdz = Bidi \Rightarrow \frac{z^2}{2} = B\frac{i^2}{2} + C*.$$

$$z = \pm\sqrt{Bi^2 + C}, \quad (13)$$

где С – постоянная интегрирования.
Подставим (12) и (13) в (10):

$$V = \pm i\sqrt{Bi^2 + C}$$

или

$$\frac{di}{dt} = i\sqrt{Bi^2 + C}, \quad (14)$$

и

$$\frac{di}{dt} = -i\sqrt{Bi^2 + C}. \quad (15)$$

Решения уравнений (14) и (15) имеют вид

$$i = -\frac{2C \cdot e^{C_1\sqrt{C} + \sqrt{C}t}}{BC \cdot e^{2C_1\sqrt{C} + 2\sqrt{C}t} - 1}, \quad (16)$$

и

$$i = -\frac{2C \cdot e^{C_1\sqrt{C}+\sqrt{C}t}}{BC \cdot e^{2C_1\sqrt{C}} - e^{2\sqrt{C}t}}, \tag{17}$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Из (7), с учетом (14)–(17) найдем угловую скорость:

$$\omega = \frac{L}{\alpha}\frac{i'}{i} + \frac{R}{\alpha}. \tag{18}$$

Постоянные интегрирования C и C_1 определяются из начальных условий.

ВЫВОДЫ

Получена динамическая математическая модель цилиндрического униполярного генератора, которую можно использовать при его проектировании и анализе работы.

Высокие массогабаритные показатели униполярных машин, эффективное регулирование, а также технологические достижения в области создания токосъемных устройств определяют перспективность их применения. Поэтому предложенная модель может получить дальнейшее развитие в направлении учета конструктивных особенностей генератора, расчетов электромагнитной цепи, теплового расчета, учета потерь и др.

Рассмотрена модель генератора с цилиндрическим ротором, но предложенный подход может быть реализован и для разработки моделей других типов генераторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Википедия. Униполярный_генератор. [Электронний ресурс] – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/*
2. *Суханов Л. А. Электрические униполярные машины / Л. А. Суханов, Р. Х. Сафиулина, Ю. А. Бобков – М. : ВНИИЭМ, 1964. – 136 с.*
3. *Бертинов А. И. Униполярные электрические машины с жидкометаллическим токосъемом // А. И. Бертинов, Б. Л. Алиевский, С. Р. Троицкий – издательство «Энергия», Москва – Ленинград, 1966.*
4. *Jorge Guala-Valverde and Pedro Mazzoni, "The Unipolar Dynamotor: A Genuine Relational Engine" [Электронный ресурс]APEIRON Vol.8 Nr.4, October 2001. – Режим доступа : http://redshift.vif.com/Apeiron%20Home.htm.*
5. *Малыгин В. М. Пространственная геометрия электрических и магнитных цепей и принцип действия биполярных и униполярных электрических машин постоянного тока / В. М. Малыгин // Электрика. – 2007. – N 9. – С. 28–32.*
6. *Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.*
7. *Менде Ф. Ф. О физических основах униполярной индукции. Новый тип униполярного генератора / Ф. Ф. Менде // Инженерная физика. – 2013. – № 6. – С. 7–13.*
8. *Рассел Джесси. Униполярный генератор / Джесси Рассел – Издатель : VSD, 2013. – 123 с.*
9. *150000 continuous d. c. ampes easy for acyclic generator. –«Power Engineering», 1962–66. – № 1.*

Статья поступила в редакцию 20.12.2014 г.