

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ КОМПРЕССИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Носов Г.В.¹, Косилова Д.Ю.¹

¹ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, Томск, ГСП пр. Ленина, 30), e-mail: nosov@tpu.ru

Рассмотрены конструкции электромашинных генераторов с периодически изменяющейся индуктивностью рабочих обмоток. Показано, что наиболее перспективным является бесконтактный импульсный компрессионный генератор, который может использоваться для питания рельсотрона. Бесконтактный импульсный компрессионный генератор имеет явнополюсный ферромагнитный шихтованный статор с одной рабочей обмоткой и явнополюсный ферромагнитный шихтованный ротор с расположенными в пазах короткозамкнутыми обмотками, охватывающими ротор вдоль его оси, причем число этих короткозамкнутых обмоток равно числу пар полюсов обмотки статора. Ротор изготавливается штамповкой из листов электротехнической стали. Короткозамкнутые обмотки ротора, расположенные в специальных пазах, изготавливаются монолитными из алюминиевого сплава, бронзы или меди. Приведена схема питания этим генератором рельсотрона, причем схема не имеет ограничения по амплитуде генерируемого тока, обусловленного коммутаторами.

Ключевые слова: электромашинный генератор, изменяющаяся индуктивность, импульс, рельсотрон

ELECTROMACHINE PROXIMITY PULSE COMPRESSION GENERATOR

Nosov G.V.¹, Kosilova D.Y.¹

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Prospect, 30), e-mail: nosov@tpu.ru

Were considered the design of electromachine generators with a periodically varying inductance of operating windings. It is shown that the most promising is the proximity pulse compression generator that can be used to power the railgun. Proximity pulse compression generator has ferromagnetic salient-pole a laminated stator with a working coil and a laminated ferromagnetic salient-pole rotor arranged in the slots short-circuited windings, covering the rotor along its axis, the number of these short-circuited windings equals the number of pole pairs of the stator winding. The rotor is manufactured by stamping from sheet electrical steel. Shorted winding rotor, disposed in special grooves, made of molded aluminum, bronze or copper. The power supply circuit this generator railgun was given, the circuit does not limit the amplitude of the generated current due to the switches.

Keywords: electromachine generator, varying inductance, pulse, railgun

Введение

В настоящее время уровень развития и применения импульсной техники требует использования мощных и надежных источников питания, способных работать в частотном режиме, особенно в автономных устройствах. В качестве таких источников рассматриваются электромашинные генераторы с периодически изменяющейся индуктивностью рабочих обмоток. Эти генераторы получили названия *compulsator* (компульсатор) и *ARFC* (*active rotary flux compressor*) в США и компрессионный генератор – в СССР [1–5]. В США и СССР исследования импульсных генераторов с периодически изменяющейся индуктивностью были начаты с конца семидесятых годов двадцатого века. В США изучались вопросы питания лазеров и заряда емкостных накопителей, а в СССР (НИИЭФА и ТПУ) проводились исследования по питанию различных видов нагрузок. Так, в США с 1978 года исследовательский Центр при Техасском университете выполнял программу по развитию электромеханических устройств для импульсного режима работы, которые были бы

способны передать в нагрузку до 10 МДж за время менее 1 мс. В качестве таких устройств были выбраны генераторы с периодически изменяющейся индуктивностью.

Проведенные в США и СССР теоретические и экспериментальные исследования показали, что генераторы с периодически изменяющейся индуктивностью отличаются от других электрических машин наиболее высокими параметрами серий импульсов тока – частота следования импульсов до 100 Гц и более, ток до 1 МА и более, напряжение до 100 кВ, длительность импульса тока на половине его амплитуды 0,1–1 мс, импульсная мощность до 10000 МВт и более, энергия импульса до 10 МДж и более, запасенная энергия вращающегося ротора до 100 МДж и более, относительные импульсные параметры до 100 Дж/кг и 100 кВт/кг и более при массе генератора до 100 Т и более [1, 4, 5]. Такие генераторы без промежуточных накопителей и трансформаторов способны непосредственно питать лампы накачки лазеров, электромагнитные ускорители тел массой 0,001–5 кг до скорости 10 км/с, электрогидравлические установки, импульсные электромагниты ускорителей заряженных частиц и магнитронов. Из-за значительной длительности импульсов тока (0,1–1 мс) и недостаточного уровня напряжений (до 100 кВ) генераторы с периодически изменяющейся индуктивностью в системе питания ускорителей заряженных частиц могут применяться для зарядки промежуточных емкостных и индуктивных накопителей или для зарядки формирующей линии ускорителя через повышающий напряжение трансформатор.

В настоящее время наиболее перспективными направлениями применения этих генераторов являются импульсная зарядка промежуточных индуктивных и емкостных накопителей, а также импульсное питание ламп накачки лазеров и электромагнитных ускорителей (рельсотронов). Поэтому анализ импульсных электромашинных генераторов с периодически изменяющейся индуктивностью представляется актуальной задачей.

Цель данной работы заключается в обосновании перспективности применения электромашинного бесконтактного импульсного компрессионного генератора с периодически изменяющейся индуктивностью рабочей обмотки.

Анализ

Известно ряд конструкций генераторов с периодически изменяющейся индуктивностью рабочих обмоток.

1. Компрессионный генератор [1, 4, 5] имеет две одинаковые рабочие обмотки, размещенные одна на неподвижном явнополюсном шихтованном ферромагнитном статоре и другая на вращающемся явнополюсном шихтованном ферромагнитном роторе, причем эти обмотки соединены между собой скользящим контактом (щетками и контактными кольцами).

При вращении ротора компрессионного генератора суммарная индуктивность рабочих обмоток периодически пульсирует за счет того, что в одном положении ротора, когда оси рабочих обмоток совпадают, эти обмотки оказываются включенными согласно и имеют максимальную суммарную индуктивность L_{\max} , а в другом – встречно и имеют минимальную суммарную индуктивность L_{\min} . Кратность изменения индуктивности этого генератора $N=L_{\max}/L_{\min}$ достигает десятков и сотен единиц и при начальном токе (возбуждения) i_0 и начальной энергии магнитного поля генератора $W_0 = 0,5L_{\max}i_0^2$, когда суммарная индуктивность обмоток максимальна L_{\max} , эта кратность N определяет значительную амплитуду импульса тока $i_m \approx i_0 N$ и существенную генерируемую энергию этого импульса $W \sim W_0 N$.

Недостатком этой конструкции, в значительной степени ограничивающее её применение, является наличие скользящих контактов, через которые необходимо пропустить весь импульс тока амплитудой i_m и всю генерируемую энергию W .

2. Компульсатор и *ARFC* [1, 4] отличаются от компрессионного генератора неявнополюсным выполнением статора и ротора, причем компульсатор имеет дополнительную обмотку возбуждения, размещенную на статоре или роторе и сдвинутую относительно совпадающих осей рабочих обмоток на 90 электрических градусов.

Недостатками этих конструкций являются:

- наличие скользящих контактов, через которые проходит весь генерируемый ток;
- неявнополюсное выполнение статора и ротора, которое снижает кратность изменения суммарной индуктивности рабочих обмоток $N=L_{\max}/L_{\min}$;
- обмотка возбуждения усложняет компульсатор и не обеспечивает заметных преимуществ в амплитуде тока i_m и в энергии W генерируемого импульса.

3. Бесконтактный генератор [1] имеет явнополюсный ферромагнитный шихтованный статор с одной рабочей обмоткой и монолитный явнополюсный ротор из проводящего электрический ток материала с зубцами, число которых равно числу пар полюсов обмотки статора.

При вращении ротора этого генератора индуктивность рабочей обмотки за счет ее экранирования зубцами ротора периодически изменяется, причем в момент минимума индуктивности L_{\min} магнитный поток вытесняется в область обмотки, а в момент максимума индуктивности L_{\max} магнитный поток Φ_0 проходит значительный путь по воздуху между полюсами статора. Для создания магнитного потока Φ_0 требуется большой ток возбуждения i_0 , что обуславливает большую начальную энергию магнитного поля генератора W_0 . За счет

малой величины максимальной индуктивности L_{\max} получается незначительная кратность изменения индуктивности обмотки ($N < 10$). Однако благодаря большому току возбуждения i_0 и большой величине начальной энергии W_0 получается значительная амплитуда тока $i_m \sim i_0 N$ и существенная энергия $W \sim W_0 N$ генерируемого импульса.

Недостатками этого генератора являются большая величина тока возбуждения i_0 и значительная начальная энергия магнитного поля генератора W_0 , которые необходимо получить от внешнего источника возбуждения, например, от заряженной конденсаторной батареи.

4. Бесконтактный компрессионный генератор [2] имеет явнополюсный ферромагнитный шихтованный статор с одной рабочей обмоткой и монолитный явнополюсный ротор из проводящего электрический ток материала с зубцами, между которыми закреплены шихтованные магнитопроводы, число которых равно числу пар полюсов обмотки статора.

Благодаря наличию магнитопроводов значительно уменьшается путь магнитного потока по воздуху в момент максимума индуктивности рабочей обмотки L_{\max} , что приводит к её увеличению, к повышению кратности изменения индуктивности $N=L_{\max}/L_{\min}$, к уменьшению тока возбуждения i_0 и к снижению начальной энергии магнитного поля генератора W_0 .

В результате этот генератор имеет меньший по энергии и мощности источник возбуждения при тех же величинах амплитуды тока $i_m \sim i_0 N$ и энергии $W \sim W_0 N$ генерируемого импульса.

Недостатками этого генератора являются сложность конструкции ротора и ограниченное число его оборотов, обусловленные необходимостью надежного крепления магнитопроводов на роторе.

5. Бесконтактный импульсный компрессионный генератор [3] имеет явнополюсный ферромагнитный шихтованный статор с одной рабочей обмоткой и явнополюсный ферромагнитный шихтованный ротор с расположенными в пазах короткозамкнутыми обмотками, охватывающими ротор вдоль его оси, причем число этих короткозамкнутых обмоток равно числу пар полюсов обмотки статора. Ротор изготавливается штамповкой из листов электротехнической стали. Короткозамкнутые обмотки ротора, расположенные в специальных пазах, изготавливаются монолитными из алюминиевого сплава, бронзы или меди. За счет использования менее сложного и более технологичного в изготовлении ротора упрощается конструкция бесконтактного импульсного компрессионного генератора.

При вращении ротора этого генератора индуктивность рабочей обмотки статора за счет ее экранирования короткозамкнутыми обмотками ротора периодически изменяется, причем в момент минимума её индуктивности L_{\min} магнитный поток вытесняется в область рабочей

обмотки, а в момент максимума её индуктивности L_{\max} магнитный поток Φ_0 проходит в основном по ферромагнитным статору и ротору через незначительный воздушный зазор между ротором и статором. Так же, как в [2], у генератора [3] значительно уменьшается путь магнитного потока Φ_0 по воздуху в момент максимума индуктивности рабочей обмотки L_{\max} . Это приводит по сравнению с бесконтактным генератором [1] к увеличению L_{\max} , к повышению кратности изменения индуктивности $N=L_{\max}/L_{\min}$, к уменьшению тока возбуждения i_0 и к снижению начальной энергии магнитного поля генератора W_0 .

В результате, по сравнению с бесконтактным генератором [1], генератор [3], так же как и [2], имеет меньший по энергии и мощности источник возбуждения при той же амплитуде тока $i_m \sim i_0 N$ и энергии $W \sim W_0 N$ генерируемого импульса. Однако компрессионный импульсный генератор [3], по сравнению с [2], характеризуется большей мощностью генерируемых импульсов за счет большего допустимого числа оборотов ротора, который к тому же менее сложен и является более технологичным в изготовлении.

На рис. 1 схематически изображен бесконтактный импульсный компрессионный генератор [3] при положении ротора, когда индуктивность обмотки статора максимальна, причем число короткозамкнутых обмоток ротора 5 и число пар полюсов обмотки статора 1 равно четырем ($p=4$).

Для возбуждения генератора [3], т. е. для создания тока i_0 и магнитного потока Φ_0 , используется предварительно заряженная конденсаторная батарея. На рис. 2, а и б приведены последовательная и параллельная схемы возбуждения и питания нагрузки, например, с полупроводниковыми коммутаторами K_1 и K_2 .

Коммутатор K_1 (группа тиристоров) предназначен:

- для подключения заряженной конденсаторной батареи к обмотке статора генератора в момент близкий к максимуму её индуктивности L_{\max} ;
- для автоматического отключения разряженной конденсаторной батареи при переходе её тока i_C через нулевое значение.

Коммутатор K_2 (группа диодов) предназначен:

- для шунтирования разряженной конденсаторной батареи в схеме рис. 2, а;
- для автоматического подключения нагрузки к обмотке статора генератора после разрядки конденсаторной батареи в схеме рис. 2, б.

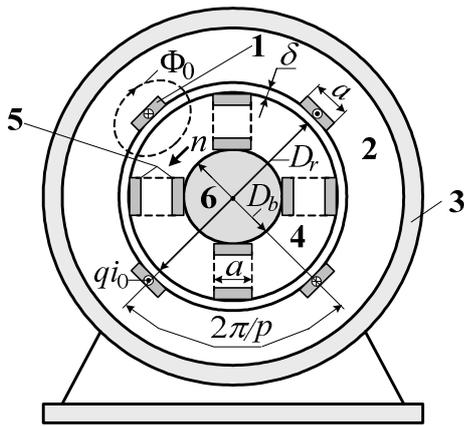


Рис. 1. Бесконтактный импульсный компрессионный генератор:

1 – обмотка статора; 2 – ферромагнитный шихтованный статор; 3 – корпус статора;

4 – ферромагнитный шихтованный ротор; 5 – короткозамкнутые обмотки ротора; 6 – вал;

D_r, D_b – диаметры ротора и вала соответственно; δ – воздушный зазор между ротором и статором; p – число пар полюсов; n – число оборотов ротора в минуту; i_0 – ток в обмотке статора в момент максимума её индуктивности; q – число последовательных проводников с током i_0 в пазу обмотки статора; Φ_0 – магнитный поток пары полюсов обмотки статора в момент максимума её индуктивности; a – ширина пазов обмоток статора и ротора

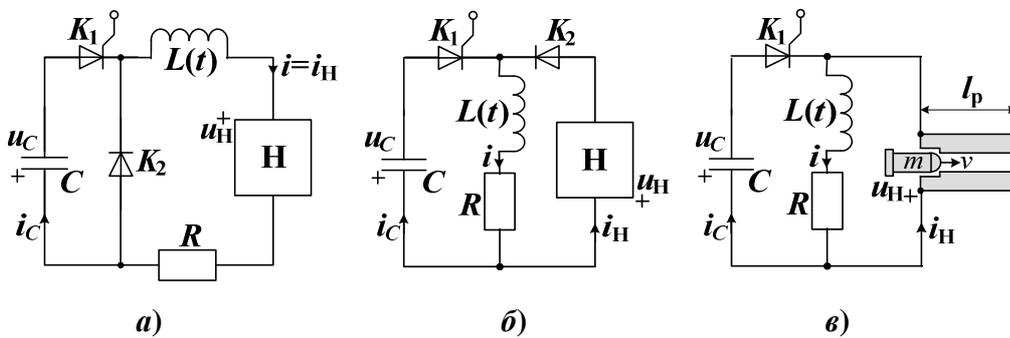


Рис. 2. Схемы возбуждения и питания нагрузки бесконтактного импульсного компрессионного генератора: Н – нагрузка генератора; u_C, u_H – напряжения на зажимах конденсаторной батареи и нагрузки соответственно; C – емкость конденсаторной батареи предварительно заряженной до напряжения $u_C(0) = -U_0$; $L(t)$ – периодически изменяющаяся индуктивность обмотки статора генератора; R – сопротивление обмотки статора;

K_1, K_2 – полупроводниковые коммутаторы; i_C, i, i_H – токи конденсаторов, генератора и нагрузки соответственно; l_p, m, v – длина рельсотрона, масса и скорость тела соответственно.

Последовательная схема (рис. 2, а) обычно применяется для нагрузок, у которых необходим электрический пробой рабочего пространства (ксеноновые лампы накачки лазеров) или быстрый начальный рост тока (взрывающиеся проводники

электрогидравлических установок). Во всех остальных случаях, как правило, используется параллельная схема (рис. 2, б), которая характеризуется меньшей начальной запасаемой энергии конденсаторной батареи.

Поясним работу бесконтактного импульсного компрессионного генератора (рис. 1). Внешним приводным двигателем вал 6 и ротор 4 раскручивается до определенного числа оборотов n . В момент времени, близкий к максимуму L_{\max} нарастающей индуктивности $L(t)$ обмотки 1 статора 2, подается импульс тока на управляющий электрод тиристора K_1 . Предварительно заряженная конденсаторная батарея начинает разряжаться через обмотку 1. Параметры разрядной цепи конденсаторной батареи выбираются такими, чтобы в момент максимума индуктивности обмотки 1 ток в ней достиг требуемой величины i_0 при напряжении конденсаторной батареи $u_C=0$. В генераторе создается магнитный поток Φ_0 и в магнитном поле запасается энергия W_0 . По мере поворота ротора 4 его короткозамкнутые обмотки 5 вытесняют магнитный поток Φ_0 в пазы статора 2, и индуктивность обмотки 1 уменьшается, а токи генератора i и нагрузки i_H увеличиваются. При этом ток i_C конденсаторной батареи быстро уменьшается и при переходе его через нулевое значение тиристор K_1 автоматически запирается, отключая конденсаторную батарею. При уменьшении индуктивности $L(t)$ происходит преобразование механической энергии вращающегося ротора в электромагнитную энергию импульса тока i_H . Очевидно, что коммутатор K_2 на рис. 2, а и б ограничивает в нагрузке амплитуду тока i_H .

На рис. 2, в приведена параллельная схема питания рельсотрона, где роль коммутатора K_2 выполняет ускоряемое тело, которое под действием, например, сжатого воздуха замыкает цепь тока i_H в момент близкий к максимуму индуктивности L_{\max} обмотки статора, когда конденсаторная батарея уже практически полностью разряжена и ток генератора i достигает величины i_0 . При этом ускоряемое тело полностью тормозится своими выступами. Далее при уменьшении индуктивности обмотки генератора $L(t)$ и увеличении тока i_H давление магнитного поля рельсотрона на ускоряемое тело возрастает. При определенном значении тока i_H выступы ускоряемого тела под действием этого давления срезаются, тело приходит в движение и ускоряется изменяющимся током i_H . Таким образом, схема на рис. 2, в не имеет ограничения по амплитуде тока i_H , обусловленного коммутатором K_2 .

Результаты расчета

В таблице приведены результаты расчета питания рельсотрона бесконтактным импульсным компрессионным генератором с числом пар полюсов обмотки статора $p=4$.

Таблица

Параметры генератора и рельсотрона при максимальной скорости тела $v_m=3$ (км/с)

Масса генератора	Т	0,1	1	10	100	1000
n	об/мин	12000	6000	3000	1500	750
N	–	48	54	67	104	113
W_0	кДж	0,426	4,26	42,94	434,7	4304
i_m	МА	0,368	1,088	2,913	8,712	20,950
l_p	м	0,6	1,5	3	6	12
m	кг	0,00097	0,019	0,259	3,505	37,25
$W_m = mv_m^2/2$	МДж	0,00437	0,0855	1,169	15,88	167,7

Заключение

1. Рассмотрены конструкции электромашинных генераторов с периодически изменяющейся индуктивностью рабочих обмоток.
2. Показано, что наиболее перспективным является бесконтактный импульсный компрессионный генератор, который может использоваться для питания рельсотрона.
3. Приведена схема питания этим генератором рельсотрона, причем схема не имеет ограничения по амплитуде генерируемого тока, обусловленного коммутаторами.

Список литературы

1. Глебов И.А. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия / И.А. Глебов, Э.Г. Кашарский, Ф.Г. Рутберг. – Л.: Наука, 1985. – 224 с.
2. Пат. № 2006115046/22 Российская федерация, ПМ 60807. Бесконтактный компрессионный генератор; заявл. 02.05.06; опубл. 27.01.07, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.
3. Пат. № 2010140371/07 Российская федерация, ПМ 103251. Бесконтактный импульсный компрессионный генератор; заявл. 01.10.10; опубл. 27.03.11, Бюл. № 9. – 4 с.: ил.
4. Сипайлов Г.А. Электромашинное генерирование импульсных мощностей в автономных режимах / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос, А.И. Чучалин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.
5. Физика и техника мощных импульсных систем: сб. статей / под ред. акад. Е.П. Велихова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

Рецензенты:

Усов Ю.П., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Канев Ф.Ю., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск.