СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Яворский М.И. Перспективы малой энергетики в Томской области // Ресурсы регионов России. 2002. № 4. С. 25—32.
- Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. — Томск: STT, 2001. — 120 с.
- 3. Пивоваров В.А. Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин. Л.: Машиностроение, 1973. 273 с.
- Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 199 с.
- Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Выбор способа регулирования микрогидроэлектростанций с автобалластной нагрузкой // Гидротехническое строительство. — 1990. — № 7. — С. 33—35.
- Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Способы повышения качества выходного напряжения микрогидроэлектростанции с тиристорным автобалластом // Промышленная энергетика. 2000. № 8. С. 49—52.

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИНДУКТОРНО-КОМПРЕССИОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А.И. Чучалин, И.О. Муравлев, И.А. Сафьянников

Томский политехнический университет E-mail: iom@cam.tpu.ru

В системах питания электрофизических установок (источников накачки лазеров, установок высокого напряжения для питания ускорительной техники и т.д.) в качестве электромашинного источника импульсной мощности широко используют индукторно-компрессионные генераторы дискового типа. Такие генераторы позволяют получить частоту генерируемых импульсов 50...400 Гц при напряжении до 50 кВ и выше. В статье приведен принцип действия генератора, результаты исследования его работы на емкостную и активную нагрузки.

С развитием новых технологий увеличивается число потребителей электроэнергии средней мощности ~10⁴ Вт, которые необходимо питать высоким переменным напряжением ~104 В при частоте 102...103 Гц. Это автономные установки с активноемкостным характером нагрузки, в том числе: мобильные озонаторные устройства для очистки воды и воздуха, установки по обеззараживанию воды, требующие компактных автономных источников электроэнергии, источники накачки лазеров, установки высокого напряжения для питания ускорительной техники и т.д. Для питания таких установок зачастую применяют электромашинные генераторы индукторного типа дисковой конструкции для обеспечения быстрого заряда конденсаторных батарей. Традиционно питание таких потребителей осуществляется за счет преобразования напряжения и частоты первичных источников электроэнергии, таких как промышленная сеть или автономный электромашинный генератор. Установки отвечают специальным требованиям по длительности импульсов и напряжению.

Генератор представляет собой электрическую машину, сочетающую достоинства компрессионных и индукторных генераторов [1–9]. Основные узлы и детали выполнены из электроизоляционных материалов, что дает возможность не ухудшая удельных энергетических характеристик значительно повысить выходное напряжение.

На рис. 1 представлено полюсное деление электромашинного индукторного генератора дискового типа.

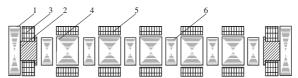


Рис. 1. Полюсное деление генератора

Особенность конструкции состоит в том, что фазы статорной обмотки расположены на неподвижных дисковых модулях, которые зафиксированы в корпусе. Каждый дисковый модуль изолирован. Полюса -4 с обмотками -5 каждого модуля ориентированы по одной оси. По торцам машины находятся обмотки возбуждения – 3, расположенные на полюсах – 2. Магнитный поток машины направлен вдоль вала и замыкается по кольцевому магнитопроводу -1 через соседний полюс. Модули статора и ротора чередуются. Полюса роторных дисков – 6 также ориентированы по одной оси. На рис. 2 изображен диск ротора. Следует отметить, что все вращающиеся части машины пассивные, то есть не имеют обмоток. Магнитопроводы – 2 чередуются с медными экранами – 1. Магнитопровод машины выполнен шихтованным из электротехнической стали.

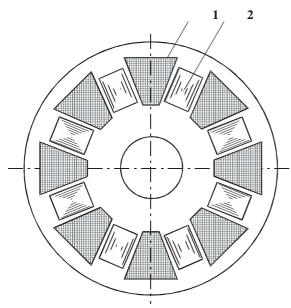


Рис. 2. Диск ротора генератора

Электрическая схема генератора (рис. 3) включает 1—дроссель, 2—обмотку возбуждения, 3—явновыраженные ферромагнитные полюса ротора, 4—токопроводящие вставки (демпферы), 5—рабочую обмотку генератора, 6—коммутирующий аппарат, 7—нагрузку.

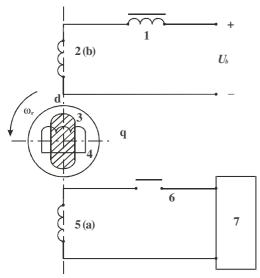


Рис. 3. Электрическая схема генератора

Работа генератора основана на сочетании индукторного принципа создания ЭДС в рабочей обмотке генератора и компрессии магнитного потока при изменении магнитных проводимостей воздушного зазора в аксиальном и радиальном направлениях [9]. Магнитный поток в воздушных зазорах создается обмоткой возбуждения. Переменная ЭДС рабочей обмотки на холостом ходу возникает в результате изменения потокосцепления Ψ_a а за счет изменения взаимной индуктивности M_{ab} с обмоткой возбуждения

$$e_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = -i_b \frac{dM_{ab}}{dt}.$$

Изменение M_{ab} обусловлено значительной разницей проводимостей основному магнитному потоку, созданному магнитодвижущей силой обмотки возбуждения за счет экранирования магнитного потока.

На рис. 4 представлены кривые изменения во времени: Ψ_b — потокосцепления обмотки возбуждения, Ψ_a — потокосцепления рабочей обмотки, i_b — тока обмотки возбуждения, i_n — тока нагрузки, M_{ab} — индуктивности взаимоиндукции обмотки возбуждения и рабочей обмотки, e_a — ЭДС рабочей обмотки.

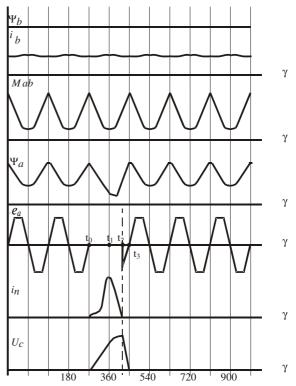


Рис. 4. Кривые изменения Ψ_a , Ψ_b — потокосцепления обмоток статора и возбуждения, i_b , i_n — токи, протекающие по обмотки возбуждения и нагрузки, U_c — напряжение на емкости, M_{ab} — индуктивности взаимоиндукции обмотки возбуждения и рабочей обмотки, e_a — ЭДС рабочей обмотки

В исходном состоянии диски ротора генератора вращаются с угловой частотой ω относительно дисков статора и дисков системы возбуждения, коммутирующий аппарат — 6 разомкнут. Обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного напряжения (U_b) и по ней протекает ток (i_b) , который создает основной магнитный поток возбуждения генератора. В период холостого хода $(t=t_0)$ импульсный генератор работает как индукторный синхронный генератор. Соотношение между частотой ЭДС рабочей обмотки f=1/T, где T — период ЭДС, частотой вращения статора n (об/мин) и числом пар полюсов p имеет вид f=2pn/60, Γ ц.

В момент времени $t=t_0$, когда потокосцепление рабочей обмотки статора — 5 достигает максимального значения (положение ротора показано на рис. 3) на коммутирующий аппарат — 6 подается управляющий сигнал, и рабочая обмотка генератора

подключается к нагрузке (ёмкостной накопитель энергии). При дальнейшем повороте ротора проводимость основному магнитному потоку уменьшается за счет экранирования. В рабочей обмотке и нагрузке протекает однополярный импульс тока i_n , достигая максимума при $t=t_1$. При переходе тока через нулевое значение в момент $t=t_2$ коммутирующий аппарат – 6 отключает генератор от нагрузки. Таким образом, происходит заряд емкостного накопителя энергии (U_c) с последующим его разрядом на нагрузку (рис. 4). В момент времени $t=t_3$ при подаче управляющего импульса на коммутирующий аппарат – 6 работа генератора будет происходить аналогично. Задавая закон управления коммутатором -6, и изменяя частоту вращения ротора, можно обеспечить частоту и скважность импульсов в нагрузке.

Для исследования характеристик индукторнокомпрессионного генератора использована математическая модель, основанная на численном решении дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с электрической схемой замещения:

$$\begin{split} \frac{d\Psi_a}{dt} &= -(r_a + r_n)i_a - U_c \,,\, \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_n}i_a \,, \\ \frac{d\Psi_b}{dt} &= U_b - r_b \,i_b \,, \end{split}$$

где U_b , U_c — напряжения на зажимах обмотки возбуждения и емкостной составляющей нагрузки; Ψ_a , Ψ_b — потокосцепления обмоток статора и возбуждения; i_a , i_b — токи, протекающие по обмоткам; r_a , r_b — активные сопротивления обмоток.

Система алгебраических уравнений электромагнитных связей обмоток имеет вид

$$\Psi_{a} = L_{a} i_{a} + M_{ab} i_{b}
\Psi_{b} = M_{ba} i_{a} + L_{b} i_{b}$$
(1)

Индуктивности в ур. (1) является функциями угла поворота ротора, рис. 5.

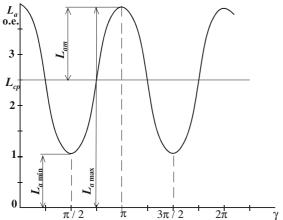


Рис. 5. Зависимость индуктивности рабочей обмотки статора от угла положения ротора

$$L_a = \left(\frac{L_{a\,\mathrm{max}} + L_{a\,\mathrm{min}}}{2}\right) + \left(\frac{L_{a\,\mathrm{max}} - L_{a\,\mathrm{min}}}{2}\right) \cos(2\gamma)\,,$$

$$L_b = \left(\frac{L_{b \max} + L_{b \min}}{2}\right) + \left(\frac{L_{b \max} - L_{b \min}}{2}\right) \cos(2\gamma),$$

$$M_{ab} = \frac{M_{ab \max} + M_{ab \min}}{2} + \left(\frac{M_{ab \max} - M_{ab \min}}{2}\right) \cos(2\gamma),$$

где $M_{ab{
m max}},~M_{ab{
m min}}$ — максимальная и минимальная взаимная индуктивность обмоток.

При расчете электромагнитных процессов в электромашинном индукторно-компрессионном генераторе дискового типа, принимались следующие основные допущения:

- отсутствие переменного насыщения магнитной цепи;
- отсутствие гистерезиса и вытеснения тока в меди обмоток;
- синусоидальное распределение на полюсном делении магнитодвижущих сил и магнитных индукций;
- независимость индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток от положения ротора.

Указанные допущения, идеализируя машину, позволяют изучить в пределах допустимых отклонений картину процессов, протекающих в реальной машине.

На основе математической модели рассчитаны характеристики генератора средней мощности с диаметром активной зоны 0.34 м, числом полюсов 2p = 8 при работе на емкостную нагрузку с постоянной частотой вращения ротора n = 3000 об/мин.

Ограничения при расчете соответствуют плотности тока $J=5...6~{\rm A/mm^2}$ и напряжению на рабочей обмотке $U_\phi=40...50~{\rm kB}$, которые приняты исходя из класса нагревостойкости F и электрической прочности изоляции. В качестве критерия для определения согласованной нагрузки принят максимум средней мощности генератора.

Расчеты показали, что максимальная средняя мощность в нагрузке составляет ≈ 35 кВт при согласованной емкостной нагрузке 60 нФ. Напряжение заряда емкости составляет ≈ 50 кВ. За один импульс в согласованную нагрузку передается около 80 Дж электрической энергии. Максимальный ток заряда конденсатора составляет 2,25 А. КПД при работе генератора на емкостную нагрузку составляет $\approx 0,75$.

Из проведенных вычислительных экспериментов при работе индукторно-компрессионного генератора на активно-емкостную нагрузку (рис. 6) следует, что максимальное значение активной мощности $P_{mmax} \approx 15 \text{ кВт}$ достигается при активном сопротивлении $R_n = 3 \text{ кОм}$ для $\cos \varphi = 0.8$, которому соответствуют КПД $\eta = 0.75$ и напряжению на рабочей обмотке $U_{\phi} = 55 \text{ кВ}$. Анализ энергетических характеристик генератора показал, что при работе на активно-емкостную нагрузку в диапазоне изменения коэффициента мощности $\cos \varphi = 0.2...0.8$ согласованное сопротивление активной нагрузки составляет 2...3 кОм (рис. 6, θ), ток нагрузки 2...2,5 A (рис. 6, ϵ).

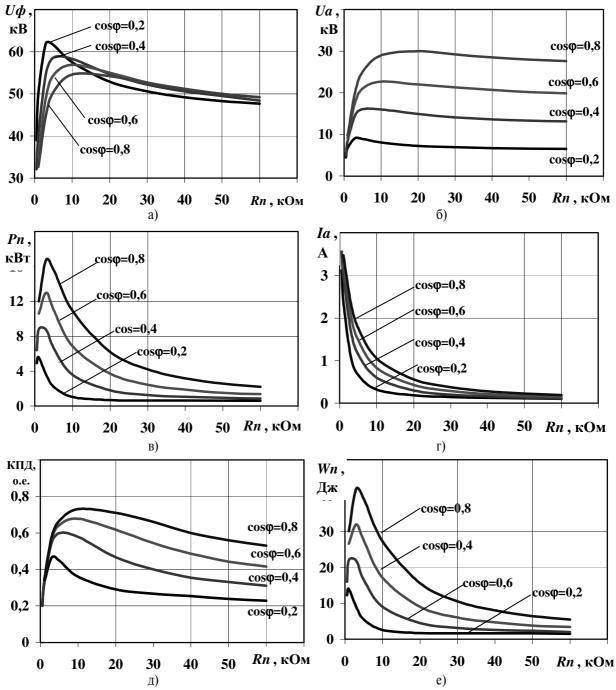


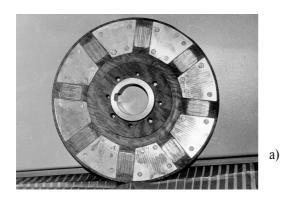
Рис. 6. Зависимости индукторно-компрессионного генератора при работе на активно-емкостную нагрузку

Расчеты показали, что средняя активная мощность генератора лежит в пределах 8...13 кВт (рис. 6, e) при напряжении на активной составляющей 15...20 кВ (рис. 6, e). КПД при этом достигает e0,e0 (рис. e0,e0, а импульсная энергия, выделяющаяся в активной нагрузке e35...e45 Дж (рис. e6,e9) при частоте e100 Гц.

Для проверки результатов теоретических исследований индукторно-компрессионного генератора проведены соответствующие эксперименты. Фраг-

менты статора и ротора экспериментального образца генератора показаны на рис. 7.

Генератор испытывался в частотном режиме. На рис. 8 показан характер изменения индуктивности обмоток генератора в зависимости от углового положения ротора. На рис. 9 представлены осциллограммы напряжения на рабочей обмотке E_{xx} (верхний луч) и тока в обмотке возбуждения I_b (нижний луч) при работе генератора на холостом ходу.



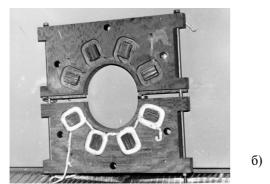


Рис. 7. Активная зона модуля а) ротора и б) статора

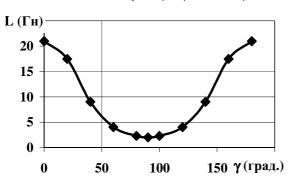


Рис. 8. Экспериментальная кривая изменения индуктивности генератора

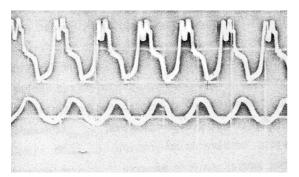
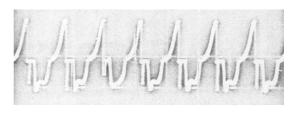


Рис. 9. Осциллограммы ЭДС обмотки статора и тока возбуждения генератора на холостом ходу

На рис. 10 представлены осциллограммы ЭДС рабочей обмотки E_a (верхний луч), напряжения U_c и тока I_c при работе генератора в периодическом режиме с зарядом емкостного накопителя и последующим его разрядом на каждом периоде с частотой 400 Гц.



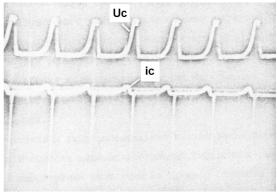


Рис. 10. Осциллограммы переходных процессов

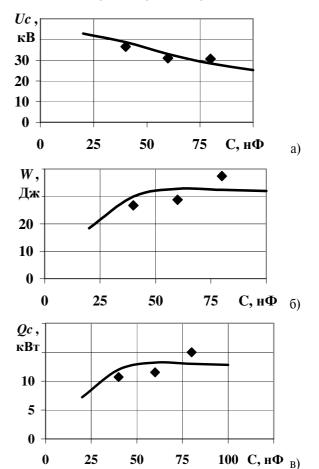


Рис. 11. Энергетические характеристики генератора

На рис. 11 представлены результаты расчета и экспериментальных исследований высоковольтного индукторно-компрессионного генератора при частоте вращения ротора 3000 об/мин и индукции возбуждения $B_{\delta} = 0,5$ Тл. Сплошными линиями по-

казаны результаты, полученные расчетным путем, а точками отмечены экспериментальные данные.

Результаты показывают, что при согласованной нагрузке C=60 нФ, $X_c\approx 2Z_{amin}$, где $X_c=1/\omega C\approx 6,63$ кОм, $Z_{amin}=\sqrt{(\omega L_a^{min})^2+r_a^2}\approx 5$ кОм при $\omega=2\pi f=2512$ c^{-1} , f=400 Гц достигается максимальная энергия, передаваемая в нагрузку за один импульс.

Мощность генератора при работе на активноемкостную нагрузку с $\cos \varphi = 0, 4...0, 6$ составляет

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы в электрофизических установках. Л.: Наука, 1977. 197 с.
- Chuchalin A.I., Muravlev I.O., Safyannikov I.A., Rossamahin I.N. High-Voltage Electrical Machine Disk Generator // Intern. Conference on Electrical Machines (ICEM'98). — September 2—4, 1998, Istambul, Turkey, 1998. —V. 2/3. —P. 814—816.
- 3. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. Л.: Наука, $1985.-224\,\mathrm{c}.$
- Чучалин А.И. Многозазорные электромашинные генераторы дискового типа // Электромашинные машинно-вентильные источники импульсной мощности: Тез. Всес. докл. науч. конф. — Томск, 1987. — С. 91—94.
- Сипайлов Г.А., Лоос А.В., Чучалин А.И. Электромашинное генерирование импульсных мощностей в автономных режимах.
 — М.: Энергоатомиздат, 1990. 169 с.

 P_n ≈10 кВт. Масса генератора 150 кг, удельная мощность ≈67 Вт/кг.

Полученные экспериментальные значения совпадают с расчетными. Это доказывает адекватность математической модели и перспективы использования высоковольтного электромашинного индукторно-компрессионного генератора дискового типа для питания высоковольтных потребителей импульсами электрической энергии при напряжениях 10...50 кВ и частоте 100 Гц.

- Чучалин А.И. Импульсные генераторы на основе электромеханических преобразователей // Известия вузов. Электромеханика. — 1989. — № 12. — С. 23—33.
- Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Генераторы ударной мощности. М.: Энергия, 1979. — 128 с.
- Chuchalin A.I., Muravlev I.O., Safyannikov I.A. Power sources for technological systems // The 5th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS'01). — Tomsk: TPU, 2001. — P. 228—231.
- Chuchalin A.I., Muravlev I.O., Safyannikov I.A., Laas A.R. Highvoltage recurrent pulse generator MTT'2001 // The 7th Intern. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-graduates, and Young Scientists. Modern techniques and technology, February 26 — March 2, 2001, Tomsk, Russia, 2001. — P. 95—97.