

метр имеет коэффициент гармоник, не превышающий 10 % при среднеквадратическом значении входного сигнала менее 2 В.

Технические параметры усилителя с электронной регулировкой усиления по последовательному интерфейсу: диапазон рабочих частот при неравномерности частотной характеристики –1 дБ и выходной мощности 10 мВт 30 Гц...55 кГц; выходная мощность

при $K_f=10$ % на частоте 1000 Гц 1,025 Вт и сопротивлении нагрузки 8 Ом; коэффициент усиления по напряжению при относительном показателе громкости регулятора $N=20$ на частоте 1000 Гц 20,5 дБ; глубина регулирования усиления 53 дБ; максимальное среднеквадратическое значение входного сигнала 2 В; отношение сигнал-шум при максимальной громкости 65 дБ; отношение сигнал-фон 95 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звуковое вещание / А.В. Выходец, П.М. Жмурин, И.Ф. Зорин и др.: Справочник. – М.: Радио и связь, 1993. – 464 с.
2. Андреев О.С., Андрух О.П., Бохонко Б.А. Измерительный усилитель с цифровым программированием коэффициента усиления // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 3. – С. 122–124.
3. Елисеева В.В., Ильинский Г.В., Кузнецов О.Л. и др. Импульсный усилитель с цифровым управлением коэффициентом уси-

- ления // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 2. – С. 122.
4. Семенов Б.Ю. Шина I2C в радиотехнических конструкциях. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 224 с.
5. http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/248207866AD8400_2_3_c.pdf
6. <http://www.angstrom.ru/pdf/kr174yn31.pdf>

УДК 621.313.12

ИМПУЛЬСНОЕ ПИТАНИЕ АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОМАШИНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Г.В. Носов

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@elti.tpu.ru

Показана возможность применения электромашиных генераторов с изменяющейся индуктивностью для импульсного питания активно-индуктивной нагрузки. Приведены формулы для расчета изменяющейся индуктивности с учетом насыщения и несимметрии магнитной цепи явнополюсных генераторов активного типа. Пояснена работа генератора при импульсном параллельном возбуждении и приведены результаты расчета модели генератора.

Современный уровень развития и применения импульсной техники требует использования мощных и надежных источников питания, способных работать в частотном режиме, особенно в автономных устройствах. Во многих электрофизических установках применяется активно-индуктивная нагрузка: индуктивные накопители электромагнитной энергии, обмотки трансформаторов, электромагниты ускорителей, обмотки возбуждения импульсных электромашиных генераторов и т.д. Для импульсного питания такой нагрузки в частотном режиме необходимы мощные генераторы. В качестве генераторов можно использовать электромашиные генераторы с изменяющейся индуктивностью рабочих обмоток. Эти генераторы получили названия *compulsator* (компульсатор) и *ARFC* (*Active rotary flux compressor*) в США и компрессионный генератор – в СССР. Проведенные в США и СССР теоретические и экспериментальные исследования показали, что генераторы с изменяющейся индуктивностью имеют высокие импульсные параметры и способны работать в частотном режиме [1–4].

Энергетические возможности рассматриваемых генераторов определяются следующими параметрами:

Mg – масса генератора; f – частота вращения ротора (об/с); p – число пар полюсов магнитной системы генератора; B_0 – средняя индукция магнитного потока в момент времени $t=t_0$, когда магнитные оси статора и ротора генератора совпадают; ω – угловая частота изменения индуктивности генератора; $T=2\pi/\omega$ – период изменения индуктивности; w – число последовательных проводников обмотки в пазу генератора; $N=L_{\max}/L_{\min}$ – кратность изменения индуктивности генератора (отношение максимального значения индуктивности $L_{\max}$ к минимальному $L_{\min}$); $Q=\omega L_0/R$ – добротность генератора (L_0 – средняя индуктивность, R – сопротивление цепи генератора).

В настоящее время известны конструкции генераторов с изменяющейся индуктивностью цилиндрического и торцевого исполнения с горизонтальным и вертикальным валом, содержащие [1–4]:

- а) две одинаковые рабочие обмотки (одна размещена на неподвижном статоре, а другая – на вращающемся роторе), которые соединены между собой скользящим контактом и изменение результирующей индуктивности этих обмоток обеспечивается при вращении ротора изме-

нением взаимной индуктивности между ними при $\omega=2\pi pf$;

- б) одну рабочую обмотку, размещенную на статоре при явнополюсном ферромагнитном шихтованном роторе, изменение индуктивности этой обмотки достигается при вращении ротора изменением магнитного сопротивления воздушного зазора между ротором и статором при $\omega=4\pi pf$;
- в) одну рабочую обмотку, размещенную на статоре при явнополюсном монолитном проводящем роторе, изменение индуктивности этой обмотки при вращении ротора обуславливается экранирующим действием зубцов ротора и изменением воздушного зазора при $\omega=4\pi pf$.

Возбуждение генераторов с изменяющейся индуктивностью возможно при помощи специальных обмоток, запитанных постоянным или импульсным током от отдельного источника, или при помощи разрядки конденсаторов через рабочие обмотки. Проведенные исследования позволяют утверждать, что наиболее мощными являются явнополюсные генераторы с широкими открытыми пазами, ширина которых равна ширине полюсов, причем наиболее эффективным является импульсное возбуждение разрядкой конденсаторов через рабочие обмотки генератора (генератор активного типа). Можно сформулировать требования к конструкции генераторов, их возбуждению и схеме импульсного питания нагрузки:

- а) необходимо конструктивно обеспечить существенную кратность N изменения индуктивности генератора при высокой добротности Q , значительной индукции B_0 и достаточной электрической прочности изоляции;
- б) конструкция генератора должна иметь высокую механическую прочность, во вращающемся роторе и возможном маховике должна запасаться достаточная кинетическая энергия для генерирования серии импульсов тока;
- в) электрическая схема возбуждения и питания нагрузки должна содержать минимальное число полупроводниковых коммутаторов, и конденсаторы возбуждения при генерировании каждого импульса должны заряжаться самим генератором до своего номинального напряжения U_0 ;
- г) т.к. электрическая прочность изоляции генератора и полупроводниковых коммутаторов ограничена, то все элементы цепи, как и конденсаторы возбуждения, должны выдерживать напряжение U_0 .

Для исследования генерирования импульсов тока $i(t)$ необходимо иметь зависимость изменения индуктивности $L(t)$ генератора с учетом насыщения и несимметрии магнитной системы при вращении ротора. Такую зависимость можно получить для явнополюсных генераторов активного типа, например, после расчета их магнитной цепи:

$$L(t) = \frac{2\mu_0 p w^2 (w_1 + w_2)(b + 0,333d)l}{a + \frac{a + 2b + d}{\mu r}} + \frac{\mu_0 S [w_1 + w_2 \cos \omega(t - t_0)]^2 w^2}{\frac{\delta_B(t)}{S_B(t)} S + \frac{l(t)}{\mu r}}. \quad (1)$$

В формуле (1) обозначены следующие параметры: площадь сечения ферромагнитного участка магнитной цепи $S = pal$; ширина полюса и паза ротора и статора a ; длина полюса и паза l ; толщина изоляции обмоток b ; толщина, занимаемая в пазу проводниками обмоток d ; для генератора с двумя одинаковыми обмотками — $w_1 = 1,5$; $w_2 = 0,5$; для генератора с одной обмоткой — $w_1 = 1$; $w_2 = 0$; магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; относительная магнитная проницаемость ферромагнитного участка магнитной цепи μr ; изменяющаяся длина воздушного участка

$$\delta_B(t) = 0,5(\delta_{\max} + \delta_{\min}) - 0,5(\delta_{\max} - \delta_{\min}) \cos \omega(t - t_0);$$

изменяющаяся площадь сечения воздушного участка

$$S_B(t) = 0,5(S_{\max} + S_{\min}) + 0,5(S_{\max} - S_{\min}) \cos \omega(t - t_0);$$

изменяющаяся длина ферромагнитного участка

$$l(t) = 0,5(l_{\max} + l_{\min}) + 0,5(l_{\max} - l_{\min}) \cos \omega(t - t_0).$$

Среднюю индукцию ферромагнитного участка магнитной цепи генератора можно определить следующим образом

$$B = \frac{L(t) \cdot i(t)}{S[w_1 + w_2 \cos \omega(t - t_0)] \cdot w} \quad (2)$$

и затем использовать для расчета относительной магнитной проницаемости по аппроксимирующей зависимости

$$\mu r = \frac{\mu r n}{1 + \lambda_2 B^2 + \lambda_4 B^4 + \lambda_6 B^6 + \lambda_8 B^8 + \lambda_{10} B^{10} + \lambda_{12} B^{12} + \lambda_{14} B^{14}}. \quad (3)$$

Каждая марка электротехнической стали характеризуется своими коэффициентами $\mu r n$ и $\lambda_2, \lambda_4, \dots, \lambda_{14}$. Так при изменении индукции B от 0 до 3,5 Тл электротехническая сталь марки 2411 имеет коэффициенты:

$$\mu r n = 4753; \lambda_2 = -0,445; \lambda_4 = 0,107; \lambda_6 = 2,054;$$

$$\lambda_8 = -2,382; \lambda_{10} = 1,088; \lambda_{12} = -0,132; \lambda_{14} = 0,00483.$$

Для импульсного питания активно-индуктивной нагрузки может использоваться схема параллельного возбуждения, рис. 1, где C — емкость конденсаторов возбуждения; $L(t)$ — изменяющаяся индуктивность генератора; R — сопротивление цепи генератора; L_n — индуктивность нагрузки; R_n — сопротивление нагрузки; VS1–VS4 — тиристоры; VD — диод; $i(t) = ic(t) + in(t)$ — ток генератора.

Импульсное питание активно-индуктивной нагрузки по схеме рис. 1 осуществляется следующим образом. В момент времени ($t=0$), близкий к совпадению магнитных осей ротора и статора, подачи

управляющего сигнала тиристоры VS1 и VS3 открываются, и заряженные до напряжения $-U_0$ конденсаторы возбуждения (C) начинают разряжаться на обмотки генератора. В момент времени $t=t_0$, когда магнитные оси ротора и статора совпадают, ток генератора $i(t)=ic(t)$ достигает значения i_0 , создавая в генераторе магнитный поток со средней индукцией B_0 , т.е. происходит возбуждение генератора и энергия магнитного поля генератора составляет W_0 . Дальнейшее нарастание тока $i(t)$ обеспечивается остатком энергии в конденсаторах и уменьшением индуктивности генератора $L(t)$. За счет уменьшения индуктивности осуществляется преобразование механической энергии в электромагнитную энергию. Как только напряжение на конденсаторах станет равно нулю, диод VD открывается и начинается импульсное питание нагрузки током $in(t)$. Одновременно происходит импульсная зарядка конденсаторов током $ic(t)$ до напряжения $+U_0$. Как только ток $ic(t)$ перейдет нулевое значение, тиристоры VS1 и VS3 закрываются. Подачей управляющего сигнала тиристоры VS2 и VS4 открываются, и следующий цикл импульсного питания нагрузки повторяется. Таким образом, в каждом цикле конденсаторы возбуждения и индуктивность нагрузки запасают энергию

$$W_c = \frac{C \cdot U_0^2}{2}; \quad W_n = \frac{L_n \cdot I_m^2}{2}$$

при эффективности

$$\eta = \frac{W_c + W_n}{W_c + W_n + \int_0^T [i(t)]^2 \cdot R \cdot dt + \int_0^T [in(t)]^2 \cdot R_n \cdot dt},$$

где I_m – максимальное значение тока $in(t)$.

Токи $i(t)$, $ic(t)$, $in(t)$ и напряжение на конденсаторах $u_c(t)$ находятся численно из решения уравнений равновесия напряжений и токов в цепи, рис. 1:

$$u_c(t) + R \cdot i(t) + \frac{d[L(t) \cdot i(t)]}{dt} = 0;$$

$$R_n \cdot in(t) + L_n \cdot \frac{d[in(t)]}{dt} + R \cdot i(t) + \frac{d[L(t) \cdot i(t)]}{dt} = 0;$$

$$u_c(t) = -U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t ic(t) dt, \quad i(t) = ic(t) + in(t),$$

с использованием формул (1–3) при заданных параметрах цепи и генератора.

Так, на рис. 2 приведены рассчитанные графики относительных значений индуктивности (1 – $L(t)/L_{max}$) и тока генератора (2 – $i(t)/I_m$), тока нагрузки (3 – $in(t)/I_m$), тока (4 – $ic(t)/I_m$) и напряжения конденсаторов (5 – $u_c(t)/U_0$) для расчетной модели с параметрами: $M_g=500$ кг; $f=100$ об/с; $p=2$; $B_0=0,7$ Тл;

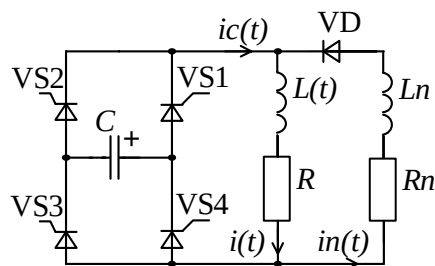


Рис. 1. Электрическая схема возбуждения и питания нагрузки

$t_0=0,042$ Т; $\omega=2513$ 1/с; $T=2,5$ мс; $w=16$ витков; $N=165$; $L_{max}=9,09$ мГн; $L_{min}=55,17$ мкГн; $U_0=5$ кВ; $C=600$ мкФ; $I_m=16,35$ кА; $i_0=72$ А; $Q=159$; $R=0,017$ Ом; $L_n=74,5$ мкГн; $R_n=0,023$ Ом; $\eta=0,622$.

При этом максимальное значение индукции в стали статора марки 2411 достигает 2,66 Тл, а в воздушном зазоре и пазах – 5,24 Тл.

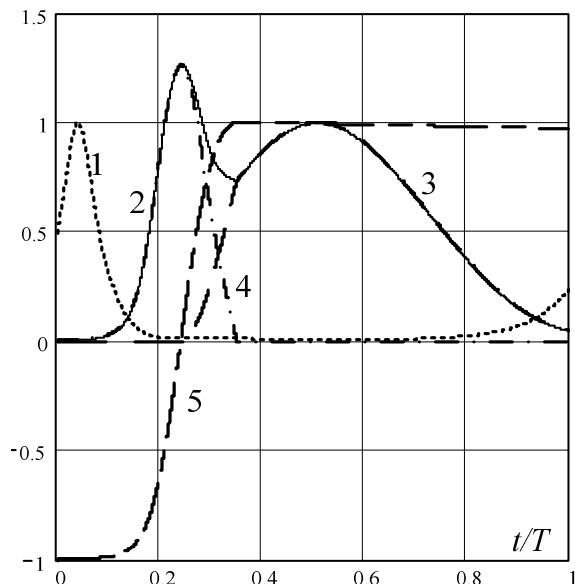


Рис. 2. Относительные зависимости изменения токов в цепи и напряжения на конденсаторах

Таким образом, рассчитанная модель генератора имеет достаточно высокие энергетические параметры ($W_k=360$ кДж – кинетическая энергия вращающегося ротора; $W_0=24$ Дж; $W_c=7,5$ кДж; $W_n=10$ кДж; $W_n/M_g=20$ Дж/кг; $P_m=60$ МВт – максимальная мощность генератора; $P=2$ МВт – средняя мощность генератора за период T ; $P_m/M_g=120$ кВт/кг), что свидетельствует о том, что генераторы с изменяющейся индуктивностью являются перспективными источниками электромагнитной энергии и могут быть использованы для импульсного питания активно-индуктивной нагрузки, особенно в автономных устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. – Л.: Наука, 1985. – 224 с.
- Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. ст. / Под ред. акад. Е.П. Велихова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
- Сипайлов Г.А., Лоос А.В., Чучалин А.И. Электромашинное генерирование импульсных мощностей в автономных режимах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.
- Носов Г.В. Генерирование мощных импульсов тока электромагнитными источниками с изменяющейся индуктивностью // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 68–70.