

Расчет параметров низкооборотного 196-полюсного электрогенератора с ротором диаметром 1 метр на постоянных магнитах

1. Введение

При использовании низкооборотных приводов, ось которых напрямую соединена с осью электрического генератора, возникает проблема получения достаточно высокого выходного напряжения и электрической мощности. Один из способов ее решения - многополюсный электрогенератор с ротором достаточно большого диаметра. Ротор электрогенератора при этом может быть выполнен с использованием постоянных магнитов. Электрогенератор с ротором на постоянных магнитах не имеет коллектора и щеток, что позволяет существенно повысить его надежность и время работы без обслуживания и ремонта. Применение постоянных магнитов с высокими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы позволяет существенно улучшить электрические характеристики генератора или уменьшить его габариты.

2. Варианты конструкции электрогенератора

Электрогенератор с ротором на постоянных магнитах может быть построен по различным схемам, отличающимся друг от друга совместным расположением обмоток и магнитов. Магниты с чередующейся полярностью располагаются на роторе генератора. Обмотки с чередующимся направлением намотки располагаются на статоре генератора. Если ротор и статор представляют из себя соосные диски, то такой тип генератора назовем аксиальным или дисковым (рис. 2.1).

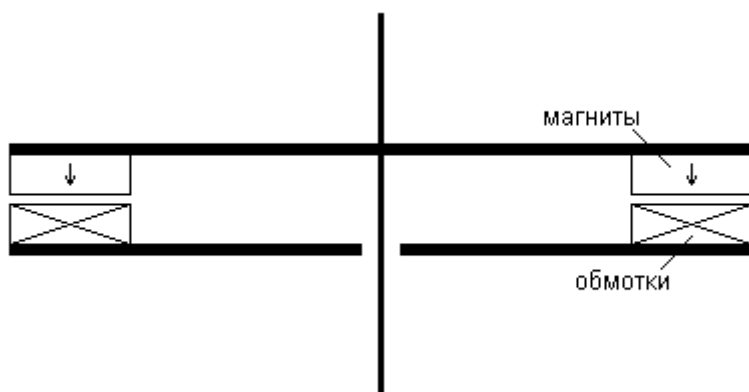


Рис. 2.1. Упрощенная схема электрогенератора с ротором на постоянных магнитах аксиального (дискового) типа.

Если ротор и статор представляют из себя коаксиальные соосные цилиндры, то такой тип генератора назовем радиальным или цилиндрическим (рис. 2.2). В генераторе радиального типа ротор может быть внутренним или внешним по отношению к статору.

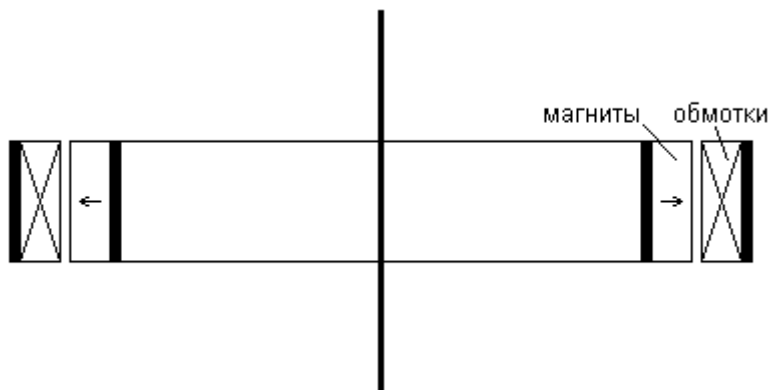


Рис. 2.2. Упрощенная схема электрогенератора с ротором на постоянных магнитах радиального (цилиндрического) типа.

3. Расчет выходного напряжения электрогенератора

Попробуем оценить электрические параметры электрического генератора, конструкция которого определяется следующими данными:

1. Внешний диаметр ротора электрогенератора 1 м.
2. Ширина (или высота) ротора 0.05 м.
3. Постоянные магниты состава неодим-железо-бор (Nd-Fe-B), остаточная индукция примерно 1.2 Тл, коэрцитивная сила примерно 900 кА/м.
4. Число полюсов – 196.
5. Рабочая частота вращения 1 оборот в секунду.

Требуется найти:

1. Выходная мощность.
2. Выходное напряжение при заданном способе намотки.
3. Способы оптимизации генератора.

Принятые обозначения (расчеты ведутся в системе СИ):

B – магнитная индукция в зазоре между магнитным полюсом и полюсным наконечником обмотки, Тл

B_0 – амплитуда магнитной индукции в зазоре, Тл

B_s – усредненное по площади полюса значение магнитной индукции в зазоре, Тл

d – диаметр обмоточного провода, м

E – эдс одной обмотки генератора, В

E_0 – амплитуда эдс одной обмотки генератора, В

E_D – действующее значение эдс одной обмотки генератора, В

E_{GEN} – действующее выходное напряжение генератора (напряжение холостого хода), В

f – частота вращения генератора, Гц

j – плотность тока в проводах обмоток генератора, А/мм²

L – средняя длина витка обмотки, м

p – число полюсов генератора

N – число витков обмотки

P_{MAX} – электрическая мощность генератора в режиме короткого замыкания, Вт

P_V – удельная мощность (мощность на единицу объема), рассеиваемая в обмотках генератора, Вт/м³

R – сопротивление одной обмотки генератора, Ом

R_{GEN} – внутреннее сопротивление генератора (суммарное сопротивление обмоток), Ом

S – площадь полюса магнита (полюсного наконечника обмотки), м²

t – текущее время, с

T – период вращения генератора, с

F – магнитный поток через сердечник обмотки, Вб

F_0 – амплитуда (максимальное значение) магнитного потока через полюсной наконечник обмотки, Вб

l – фактор упаковки обмотки

ρ_E – удельное электрическое сопротивление провода обмотки, Ом · м

ω – круговая частота вращения генератора, рад/с

В соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея [4] напряжение на выходе каждой обмотки генератора может быть рассчитано по формуле:

$$E = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

Можно считать, что магнитный поток через обмотку изменяется по гармоническому закону:

$$\Phi = \Phi_0 \sin \frac{n \omega t}{2}$$

где Φ_0 – максимальное значение магнитного потока, которое может быть найдено по формуле:

$$\Phi_0 = B_s S$$

Тогда для действующего значения напряжения одной обмотки получаем:

$$E_D = \frac{NB_s S n \omega}{2\sqrt{2}}$$

Действующее значение выходного напряжения генератора в режиме холостого хода (n обмоток соединены последовательно):

$$E_{GEN} = \frac{NB_s S n^2 \omega}{2\sqrt{2}} \quad (1)$$

что соответствует ранее произведенным расчетам [7] и подтверждено опытными конструкциями электрогенераторов [1, 5].

4. Расчет допустимой плотности тока в обмотках

Для провода с электрическим током удельная мощность (мощность на единицу объема), рассеиваемая в проводе из-за наличия электрического сопротивления и превращающаяся в тепло, может быть найдена по формуле:

$$P_V = j^2 r_E$$

От плотности тока в обмотке зависит мощность тепловыделения и, соответственно, температура обмотки. Эта температура не должна превышать допустимой для данной марки провода. Расчет температуры внутри обмотки и, соответственно, допустимой плотности тока в обмотках можно произвести методом конечных элементов [2, 3, 6, 8]. Величина допустимой плотности тока в проводах обмоток зависит от конструкции статора и условий охлаждения и для данного расчетного случая может достигать 10 А/мм^2 , если фактор упаковки принять равным 0.6.

5. Расчет магнитной индукции в межполюсном зазоре

Расчет магнитной индукции в зазоре, а также магнитного потока, пронизывающего обмотку, можно произвести разными способами, в частности, методом конечных элементов [2, 3, 6, 8]. Конструкция части магнитной системы (статор с обмотками и ротор с постоянными магнитами) приведена на рис. 5.1. Магнитные цепи аксиального и радиального генераторов практически одинаковы: на стальном статоре сделаны прорезы, в которые уложены обмотки, на стальном роторе крепятся постоянные магниты соответствующего размера. Между магнитами и стальными сердечниками обмоток имеется межполюсной зазор, величина которого определяется допусками при изготовлении деталей генератора и должна быть по возможности минимальной.

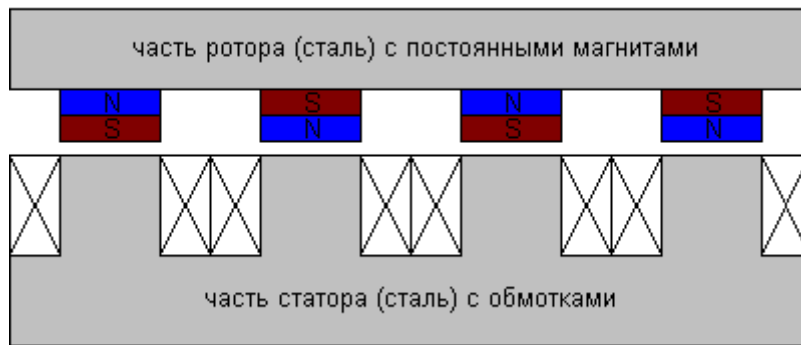


Рис. 5.1. Магнитная система электрогенератора на постоянных магнитах.

Распределение магнитного потока в магнитной системе электрогенератора показано на рис. 5.2.

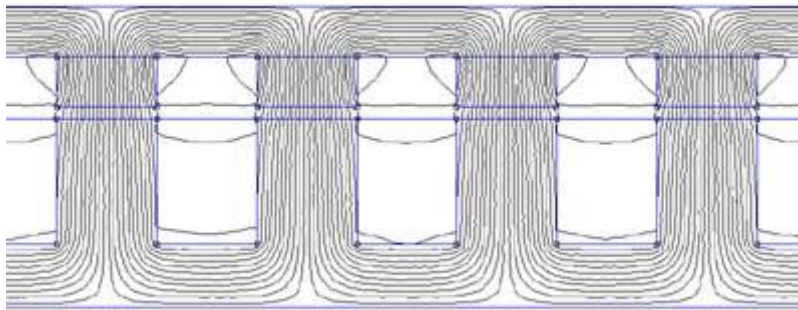


Рис. 5.2. Распределение магнитного потока в магнитной системе электрогенератора на постоянных магнитах. Плотность тока в обмотках – 6 А/мм^2 , в проводах обмоток – 10 А/мм^2 (фактор упаковки 0.6). Ширина полюса 8 мм, ширина промежутка 8 мм, глубина прорези под обмотку 10 мм. Величина зазора между ротором и статором 1 мм.

При использовании магнитов состава неодим-железо-бор с остаточной индукцией примерно 1.2 Тл и коэрцитивной силой примерно 900 кА/м усредненное значение магнитной индукции через сердечник катушки B_s составляет приблизительно 0.75 Тл при плотности тока в обмотках 6 А/мм^2 (в проводах обмоток – 10 А/мм^2 , если фактор упаковки принять равным 0.6).

6. Расчет выходного напряжения и выходной мощности генератора

Для расчета выходного напряжения E_{GEN} по формуле (1) имеем:

$N = (4 \times 10 \times 0.6) / 2 = 12$ витков (провод диаметром 1.6 мм (сечение 2 мм^2) наматывается в окно размером $10 \times 4 \text{ мм}^2$, фактор упаковки равен 0.6)

$$B_s = 0.75 \text{ Тл}$$

$$S = 0.05 \times 0.008 = 0.0004 \text{ м}^2$$

$$n \sim (3.14 \times 1000) / (8 + 8) \sim 196$$

$$\omega = 6.28 \text{ рад/сек}$$

Выходное напряжение генератора E_{GEN} по формуле (1) получаем равным 307 вольт. Для медного провода диаметром 1.6 мм (сечение примерно 2 мм^2) допустимая величина тока может составить 20 А. Тогда выходная мощность генератора при частоте вращения 1 оборот в секунду будет равна примерно 6 кВт. Часть мощности будет передаваться в нагрузку, а часть – рассеиваться на внутреннем сопротивлении

обмоток генератора. Чтобы найти, какая часть мощности будет передаваться в нагрузку, а какая – рассеиваться на внутреннем сопротивлении обмоток генератора, необходимо рассчитать сопротивление обмоток.

Сопротивление одной обмотки может быть найдено по формуле:

$$R = \rho_E \frac{4L}{\pi d^2}$$

В нашем случае:

$$r_E = 1.67 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м (медный обмоточный провод)}$$

$$d = 1.6 \text{ мм}$$

$$L = 2 \cdot (8 + 4 + 50 + 4) \cdot 12 = 1584 \text{ мм} = 1.584 \text{ м}$$

Тогда сопротивление одной обмотки $R \sim 0.0132 \text{ Ом}$, а внутреннее сопротивление генератора при последовательном включении 196 обмоток $R_{\text{GEN}} = 196 \cdot 0.0132 \sim 2.6 \text{ Ом}$

При токе в 20 А на внутреннем сопротивлении генератора будет рассеиваться мощность примерно 1 кВт, а остальная мощность (около 5 кВт) будет передаваться в нагрузку. Сопротивление нагрузки для тока 20 А должно быть равно $(307 / 20) - 2.6 = 12.75 \text{ Ом}$.

7. Замечание

При изготовлении рассчитанного выше электрогенератора необходимо учитывать следующее. Если число обмоток равно числу магнитов, то при нахождении сердечника обмотки напротив магнита за счет сил притяжения возникает большой момент сопротивления, для преодоления которого потребуются значительное усилие на валу. Поэтому можно увеличить или уменьшить число обмоток на единицу по сравнению с числом магнитов (195 или 197 обмоток, 196 магнитов), что позволит существенно уменьшить амплитудные значения момента сопротивления. Подобное решение использовано в конструкции 6-полюсных генераторов [1] (число полюсов магнита $n = 6$, число обмоток $m = 7$) и [5] (число полюсов магнита $n = 6$, число обмоток в каждой из двух групп $m = 5$, дополнительно группы обмоток сдвинуты друг относительно друга на угол в 36 градусов). Можно вообще отказаться от применения стальных сердечников в обмотках, тогда момент сопротивления в режиме холостого хода будет близок к нулю при любом положении ротора. Такие обмотки необходимо делать минимальной высоты, сравнимой с величиной зазора между магнитом и обмоткой, чтобы уменьшение магнитной индукции в зазоре было не слишком существенным. Число обмоток может быть при этом равно числу магнитов (196).

По вопросам расчета конкретных схем электрических генераторов обращайтесь к автору (см. раздел [Контактная информация](#)).

Расчет выходного напряжения многополюсного низкооборотного электрогенератора на основе постоянных магнитов

Введение

Многие двигатели и приводы имеют низкую скорость вращения. Так, например, ветродвигатель с вертикальной осью вращения карусельного типа (лопастной) имеет простую конструкцию и высокую надежность, но его скорость вращения не превышает нескольких оборотов в секунду. Чтобы использовать подобные двигатели для получения электрической энергии, требуется низкооборотный электрический генератор, ось которого напрямую соединена с осью двигателя, так как применение повышающих редукторов существенно уменьшает КПД, усложняет конструкцию и снижает надежность. Для получения достаточно высокого выходного напряжения и повышения электрической мощности необходимо использовать многополюсный электрический генератор, ротор которого для упрощения и удешевления конструкции может быть сделан на постоянных магнитах.

Принятые обозначения:

E – эдс катушки
 E_0 – амплитуда эдс катушки
 E_{gen} – действующее выходное напряжение генератора (в режиме холостого хода)
 P_{max} – электрическая мощность генератора в режиме короткого замыкания
 p – число полюсов магнита
 m – количество катушек
 N – число витков катушки
 S – площадь потокоцепления (площадь полюса)
 B – магнитная индукция в зазоре между магнитом и сердечником катушки
 B_0 – максимальное значение (амплитуда) магнитной индукции в зазоре
 F – магнитный поток через сердечник катушки
 F_0 – амплитуда магнитного потока через сердечник катушки
 ω – круговая частота вращения генератора
 f – частота вращения генератора
 T – период вращения генератора
 t – текущее время

Все расчеты ведутся в системе СИ.

Расчет выходного напряжения электрогенератора на постоянных магнитах в режиме холостого хода

Низкооборотный многополюсный электрический генератор может быть построен по простой схеме [1], показанной на рис. 1.

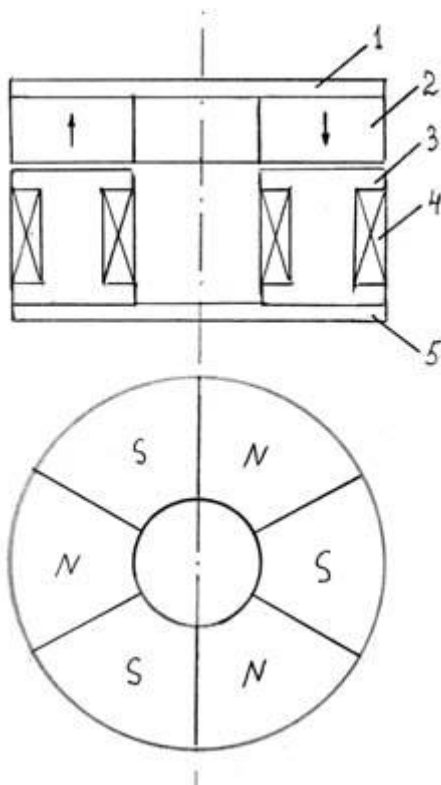


Рис. 1. Схема 6-полюсного низкооборотного электрического генератора: 1 – верхнее основание (низкоуглеродистая сталь); 2 – постоянный магнит (6-полюсное аксиальное намагничивание); 3 – сердечники катушек (низкоуглеродистая сталь); 4 – обмотки катушек (медный провод в эмалевой изоляции); 5 – нижнее основание (низкоуглеродистая сталь).

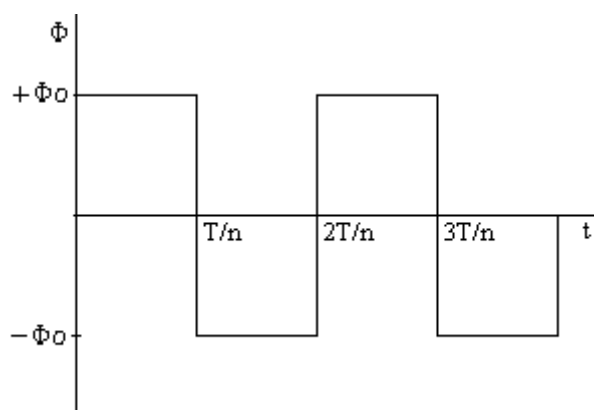
Постоянный кольцевой магнит (2) крепится к стальному верхнему основанию (1), способному вращаться относительно неподвижного нижнего основания (5), также сделанному из стали для уменьшения магнитного сопротивления. На нижнем основании крепятся стальные сердечники (3), на которые надеты катушки (4). Число катушек m в данном случае равно числу полюсов p ($m = p = 6$). Кольцевой магнит может быть сплошным или набранным из отдельных призматических или дисковых магнитов (число магнитов равно числу полюсов p). Направление намагниченности магнита аксиальное (параллельно/антипараллельно

оси генератора). Стальные сердечники катушек имеют полюсные наконечники, форма которых идентична форме магнитных полюсов (сектор, круг или прямоугольник). Постоянный кольцевой магнит (2) с верхним основанием (1) образуют ротор генератора, а нижнее основание (5) с катушками (4) и сердечниками (3) - статор.

Для использования генератора совместно со стабилизаторами напряжения, а также аккумуляторными батареями напряжением 12 или 24 вольта желательно, чтобы его выходное напряжение было достаточно высоким (амплитудное значение не меньше 10 вольт при использовании преобразователя напряжения, а при подключении аккумуляторной батареи через выпрямитель - больше ее выходного напряжения на величину падения напряжения на выпрямителе) при низких скоростях вращения (порядка одного оборота в секунду). Это позволило бы уменьшить потери в преобразователях, применяемых для стабилизации напряжения или зарядки аккумуляторов и упростить их схему.

Требуется сделать упрощенный расчет выходного напряжения генератора с использованием параметров, зависящих от конструкции: n – число полюсов, B_0 – максимальное значение (амплитуда) индукции в зазоре, S – площадь потокоцепления (площадь полюса), m – число катушек, N – число витков одной катушки, f – частота вращения, T – период вращения (время одного оборота), ω – круговая частота вращения (угловая скорость).

Вариант 1



Предположим, что количество катушек равно количеству полюсов магнита ($m = n$), а при вращении магнита относительно катушек индукция в зазоре мгновенно изменяется от $-B_0$ до $+B_0$ и от $+B_0$ до $-B_0$ (то есть ротор вращается не плавно, а скачками). Магнитный поток через сердечник катушки, соответственно, мгновенно изменяется от $-F_0$ до $+F_0$ и от $+F_0$ до $-F_0$, где $F_0 = B_0 S$, в моменты времени $0, T/n, 2T/n$ и т. д. (период изменения $2T/n$). Тогда в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея [2]

$$E = - \frac{d(N\Phi)}{dt}$$

получаем эдс катушки:

$$E = 2N\Phi_0 \delta(t) = 2NSB_0 \delta(t)$$

где $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака. Усредняя эдс по промежутку времени $\Delta t = T/n$, получаем значение амплитуды эдс одной катушки:

$$E_0 = \frac{2NB_0S}{T/n}$$

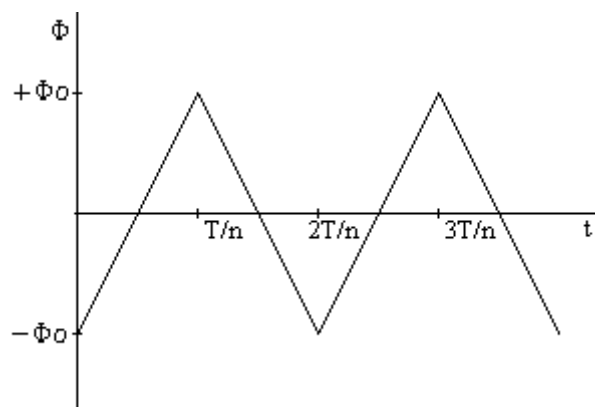
Так как $T = 1/f$, а $f = \omega/(2\pi)$, то

$$E_0 = 2fnNB_0S = \frac{\omega}{\pi} nNB_0S$$

При последовательном соединении катушек для выходного действующего напряжения генератора получаем следующее выражение (считаем форму эдс прямоугольной, при этом $E_{gen} = nE_0$):

$$E_{gen} = 2fn^2NB_0S = \frac{\omega}{\pi} n^2NB_0S \quad (1)$$

Вариант 2



Предположим, что количество катушек равно количеству полюсов магнита ($m = n$), а при вращении магнита относительно катушек магнитный поток через сердечник катушки линейно изменяется от $-F_0$ до $+F_0$ и от $+F_0$ до $-F_0$, где $F_0 = B_0S$ (период изменения $2T/n$). Тогда в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея [2]

$$E = - \frac{d(N\Phi)}{dt}$$

получаем амплитуду эдс одной катушки:

$$E_0 = \frac{2N\Phi_0}{T/n} = \frac{2NB_0S}{T/n}$$

При последовательном соединении катушек для выходного действующего напряжения генератора получаем следующее выражение (форма эдс прямоугольная, при этом $E_{gen} = nE_0$):

$$E_{gen} = 2fn^2NB_0S = \frac{\omega}{\pi} n^2NB_0S \quad (2)$$

Вариант 3

Предположим, что количество катушек равно количеству полюсов магнита ($m = n$), а при вращении магнита относительно катушек магнитный поток через сердечник катушки изменяется по закону $F = F_0 \cos(n\omega t/2)$, где $F_0 = B_{eff}S$. Здесь B_{eff} — эффективное значение магнитной индукции в зазоре, получаемое усреднением по площади полюса. В соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея [2]

$$E = - \frac{d(N\Phi)}{dt}$$

получаем эдс катушки:

$$E = \frac{nN \omega \Phi_0 \sin(n \omega t/2)}{2} = \frac{1}{2} nN \omega B_{\text{eff}} S \sin(n \omega t/2)$$

Так как $f = \omega/(2\pi)$, получаем для амплитуды эдс одной катушки выражение:

$$E_0 = \pi f n N B_{\text{eff}} S = \frac{1}{2} \omega n N B_{\text{eff}} S$$

При последовательном соединении катушек для выходного действующего напряжения генератора получаем выражение (форма эдс синусоидальная, $E_{\text{gen}} = nE_0/2^{1/2}$):

$$E_{\text{gen}} = \frac{\pi f n^2 N B_{\text{eff}} S}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{2\sqrt{2}} n^2 N B_{\text{eff}} S$$

Эффективное значение магнитной индукции B_{eff} может быть получено усреднением магнитной индукции в зазоре по площади полюса. Если распределение магнитной индукции описывается синусоидальным законом, то можно считать $B_{\text{eff}} \sim (2/\pi)B_0$. Тогда выходное действующее напряжение генератора

$$E_{\text{gen}} = \sqrt{2} f n^2 N B_0 S = \frac{\omega}{\pi \sqrt{2}} n^2 N B_0 S \quad (3)$$

С учетом принятых приближений можно считать, что полученные формулы (1), (2) и (3) хорошо соответствуют друг другу. Расчет по этим формулам может применяться и для других конструкций многополюсных генераторов на постоянных магнитах. Испытания сконструированного по схеме рис. 1 низкооборотного генератора [1] показали, что расчет по варианту 3 наиболее точно отражает характеристики генератора: магнитный поток в зазоре и, соответственно, эдс генератора изменяются по синусоидальному закону, выходное действующее напряжение генератора с хорошей точностью согласуется с рассчитанным по формуле (3).

Для расчета выходного напряжения генератора (действующего и амплитудного) по формуле (3) может быть использована программа PM_Generator. Программа предназначена для работы с операционными системами (ОС) Windows 3.1, Windows 95, 98 и XP (с другими ОС семейства Windows не проверялась). Файл [PM_Gen10.rar](#) (~85 Кбайт) следует распаковать в заранее созданную папку. Упаковка производилась с помощью WinRar 2.80. Результат распаковки: PM_Gen10.exe - исполняемый файл программы. После запуска программы можно вводить параметры генератора и производить расчет нажатием соответствующей кнопки. При вводе данных учитывайте принятый в ОС формат разделителя для десятичной дроби: точка или запятая, например, 0.0004 или 0,0004; необходимо установить точку. Скопированные файлы могут быть проверены на отсутствие вирусного кода в режиме on-line [6].

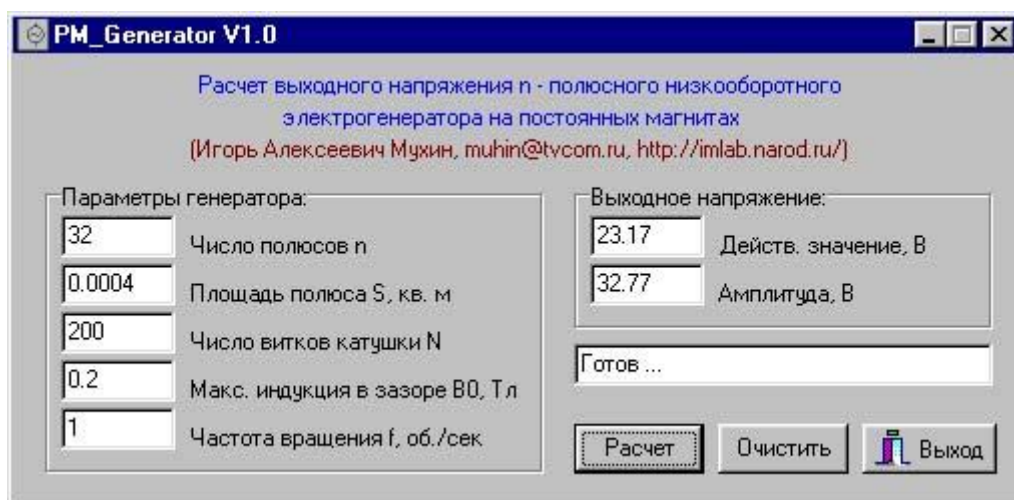


Рис. 2. Внешний вид окна программы PM_Generator (версия 1.0).

Например, производя расчет для постоянного магнита из феррита бария ($B_0 \sim 0.2$ Тл) при числе полюсов $n = 32$, $N = 200$ витков, $S \sim 4 \text{ см}^2 = 0.0004 \text{ м}^2$ и частоте вращения $f = 1$ Гц (один оборот в секунду), получаем действующее напряжение генератора ~ 23 вольт и амплитудное ~ 32 вольт (см. рис. 2). При таком выходном напряжении для зарядки 12-и и даже 24-вольтовой аккумуляторной батареи можно использовать диодный мост и простое реле напряжения для отключения генератора при 100 %заряженном аккумуляторе. Ограничение зарядного тока будет происходить за счет внутреннего сопротивления генератора (суммарное сопротивление обмоток).

Зависимость выходных параметров генератора от числа полюсов

Выходное напряжение генератора может быть найдено по формуле (3):

$$E_{\text{ген}} = \frac{\omega}{\pi \sqrt{2}} n^2 N B_0 S$$

Тогда электрическая мощность генератора в режиме короткого замыкания:

$$P_{\text{max}} = \frac{E_{\text{ген}}^2}{n R} = \frac{\omega^2}{2 \pi^2} \frac{n^3 N^2 B_0^2 S^2}{R}$$

где R – активное сопротивление одной катушки генератора.

Найдем зависимость выходного напряжения генератора и электрической мощности от числа полюсов кольцевого магнита. Будем считать, что каждая катушка генератора представляет из себя цилиндрический соленоид, имеющий геометрические размеры: $R1$ – внутренний радиус, $R2$ – внешний радиус, H – высота, намотанный проводом диаметром d с фактором упаковки l (рис. 3).

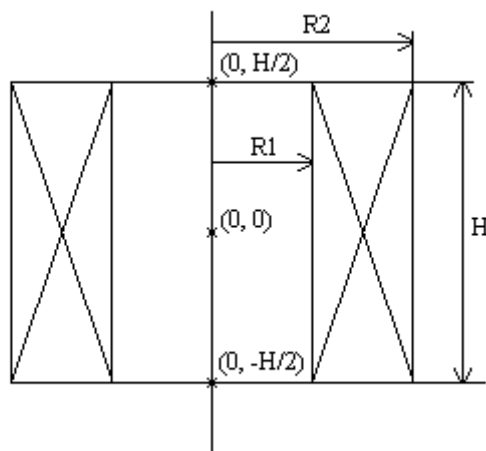


Рис. 3. Геометрические параметры цилиндрического соленоида: $R1$ – внутренний радиус, $R2$ – внешний радиус, H – высота.

Количество витков цилиндрического соленоида может быть найдено по формуле:

$$N = \frac{4 \lambda H (R2 - R1)}{\pi d^2}$$

Активное сопротивление:

$$R = \frac{16 \rho_e \lambda H (R2^2 - R1^2)}{\pi d^4}$$

где r_e – удельное электрическое сопротивление обмоточного провода.

Тогда:

$$P_{\max} = \frac{\omega^2}{2 \pi^3 r_e} \frac{n^3 S^2 \lambda H \left(1 - \frac{R1}{R2}\right)}{1 + \frac{R1}{R2}}$$

В первом приближении:

$$S \sim 2 R2 \Delta$$

$$n \sim \frac{\pi (D - \Delta)}{2 R2}$$

$$S \sim \frac{\pi (D - \Delta) \Delta}{n}$$

где D – внешний диаметр кольцевого магнита, Δ – ширина кольца.

При этих приближениях:

$$P_{\max} = \frac{\omega^2 B_0^2}{2 \pi r_e} \frac{\lambda H \left(1 - \frac{R1}{R2}\right)}{1 + \frac{R1}{R2}} (D - \Delta)^2 \Delta^2 n \quad (4)$$

Например, для генератора [1] с шестиполосным кольцевым магнитом типоразмера К70 х 24 х 12 из феррита бария ($D = 0.07$ м, $\Delta = 0.023$ м, $B_0 = 0.2$ Тл, $n = 6$) с катушками, намотанными медным проводом ($r_e = 1.67 \cdot 10^{-8}$ Ом*м, $R1/R2 = 0.5$, $H = 0.02$ м, $\lambda = 0.6$) электрическая мощность в режиме короткого замыкания в соответствии с формулой (4) составит примерно 100 мВт при частоте вращения 1 оборот в секунду ($\omega = 6.28$ рад/сек). Экспериментальное значение примерно 140 мВт. Соответствие достаточно хорошее, если учесть, что реальная конструкция [1] имеет отличия от использованной в расчетах (рис. 1).

При изменении числа полюсов можно считать, что относительные размеры катушки ($R1/R2$) и ее высота H не изменяются. Тогда электрическая мощность генератора в режиме короткого замыкания растет прямо пропорционально числу полюсов, а также прямо пропорционально квадрату частоты вращения, квадрату индукции в зазоре и квадратам размеров кольцевого магнита (внешний диаметр, ширина кольца).

Действующее значение выходного напряжения генератора в режиме холостого хода:

$$E_{\text{ген}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega B_0 N (D - \Delta) \Delta n$$

Или

$$E_{\text{ген}} = \sqrt{2} \omega B_0 \frac{\lambda H \left(1 - \frac{R1}{R2}\right)}{d^2} (D - \Delta)^2 \Delta \quad (5)$$

Расчетное значение выходного напряжения генератора [1] по формуле (5) 3.4 В при частоте вращения 1 оборот в секунду - выше измеренного (2 В). Расхождение можно объяснить тем, что в реальной конструкции [1] площадь полюсного наконечника сердечника катушки меньше площади полюса магнита почти в 2 раза.

Если увеличивать число полюсов генератора и, соответственно, уменьшать размер R_2 катушки, сохраняя неизменными ее высоту H и отношение R_1/R_2 , то при намотке катушек проводом одного диаметра выходное напряжение генератора будет оставаться приблизительно постоянным.

Выводы

При постоянной угловой скорости вращения выходное напряжение многополюсного генератора на постоянных магнитах растет пропорционально квадрату числа полюсов при условии, что площадь полюса не изменяется, то есть либо используется сплошной кольцевой магнит большего диаметра, либо увеличивается количество магнитов, из которых набирается кольцевой магнит (1 - 3).

Увеличение числа полюсов при использовании кольцевого магнита заданных размеров приводит к уменьшению площади потокоцепления S пропорционально увеличению числа полюсов p . Если число витков катушек N остается неизменным, чего можно добиться, уменьшая диаметр обмоточного провода, то выходное напряжение генератора E_{gen} будет расти пропорционально числу полюсов p . Если катушки наматываются обмоточным проводом заданного диаметра, то при увеличении числа полюсов (и, соответственно, уменьшении размера катушки) число витков одной катушки N уменьшается. Выходное напряжение генератора E_{gen} при этом будет оставаться приблизительно постоянным при увеличении числа полюсов p (5).

Электрическая мощность генератора не зависит от диаметра обмоточного провода и растет прямо пропорционально квадратам размеров кольцевого магнита (внешний диаметр, ширина кольца) и прямо пропорционально числу его полюсов (4).

Таким образом, при конструировании низкооборотного электрического генератора по вышеприведенной схеме необходимо использовать кольцевой магнит с максимально возможной остаточной индукцией, как можно большего внешнего диаметра и ширины кольца с максимально возможным числом полюсов, подбирая за счет изменения диаметра обмоточного провода число витков катушек таким образом, чтобы выходное напряжение генератора находилось в требуемом диапазоне при заданных частотах вращения. Катушки желательно наматывать проводом с наименьшим удельным сопротивлением (медным) с наибольшим возможным коэффициентом заполнения формы (фактором упаковки). Достаточная общность вышеизложенных рассуждений позволяет сказать то же самое и в отношении других конструкций электрогенераторов с ротором на постоянных магнитах.

Число катушек должно соответствовать числу полюсов. Если число катушек равно числу полюсов магнита ($m = p$), то при нахождении сердечника катушки напротив полюса кольцевого магнита за счет сил притяжения возникает большой момент сопротивления, для преодоления которого требуется значительное усилие (большая сила ветра). Поэтому можно увеличить или уменьшить число катушек на единицу ($m = p + 1$, $m = p - 1$), что позволит существенно уменьшить амплитудные значения момента сопротивления. Подобное решение использовано в конструкции 6-полюсного генератора [1], в котором число полюсов магнита $p = 6$, число катушек $m = 7$, 6-полюсного генератора [4], в котором число полюсов магнита $p = 6$, число катушек в каждой из двух групп $m = 5$ (дополнительно группы катушек сдвинуты друг относительно друга на угол в 36 градусов) и 18-полюсного генератора [5] (число полюсов магнита $p = 18$, число катушек $m = 19$). Можно вообще отказаться от применения стальных сердечников в катушках, тогда момент сопротивления в режиме холостого хода будет близок к нулю при любом положении ротора. Такие катушки необходимо делать минимальной высоты, сравнимой с величиной зазора между магнитом и катушкой, чтобы уменьшение магнитной индукции в зазоре было не слишком существенным. Число катушек может быть при этом равно числу полюсов магнита ($m = p$).