

Особенности проектирования синхронного генератора индукторного типа для альтернативного источника электрической энергии

77-48211/631435

09, сентябрь 2013

Баранов Е. Н., Степанов А. В.

УДК 621.31.63

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

enin@bmstu.ru

stepanov.bmstu@gmail.com

Работа проведена по заказу ООО “ЭМИ” (“Российское общество развития инноваций и технологий”). Целью являлось создание электрического генератора, совместимого с ранее разработанным ветродвигателем с вертикальной осью вращения. Генератор должен использоваться в качестве источника питания для подзарядки аккумуляторной батареи с подсоединенным к ней инвертором, на выходе которого генерируется переменный ток стандартной частоты при стандартном значении выходного напряжения. Технические условия предполагали, что генератор будет иметь однофазное исполнение при возможности формирования двухфазного или трехфазного источника в виде блока однофазных устройств. Номинальные данные проектируемого генератора: выходное напряжения $U_{\text{ном}} = 60$ В, номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 20$ кВт, номинальная скорость $n_{\text{ном}} = 250$ об/мин, возможный перепад скоростей = 30 – 450 об/мин, максимальные габариты - диаметр 700 мм, осевая длина не более 600 мм.

Дополнительные требования предполагали возможность изготовления генератора на предприятиях машиностроительного профиля без необходимости подключения специализированных электромашиностроительных производств. Это требование исключало необходимость изготовления специальных штампов для сложных по профилю элементов магнитопровода и наличие сложных распределенных обмоток ротора или статора.

Практически уже это исключало заказ на разработку стандартного синхронного генератора (хотя бы по соображениям стоимости такой разработки и себестоимости серийной продукции). Однако на пути применения такой конструкции имеется и более

принципиальное препятствие. Действительно, номинальная скорость вращения ротора генератора составляет приблизительно 4 об/сек. Именно при такой весьма малой скорости должны быть обеспечены номинальные напряжение и мощность генератора. Применения редуктора для связи вала ветродвигателя с валом генератора категорически запрещено техническим заданием. Для решения подобной задачи стандартный синхронный генератор должен бы иметь большое число пар полюсов и соответствующее число обмоток статора. При его довольно небольших заданных габаритах возникают ограничения из-за минимально возможной величины полюсного деления и непреодолимой трудности размещения большого числа обмоток с достаточным числом витков в каждой из них.

Следовательно, необходим генератор особой конструкции, а именно генератор индукторного типа, основанный на действии зубцовых пульсаций магнитного потока. Роторы всех типов индукторных генераторов имеют вид зубчатых колес и не имеют обмоток, что повышает надежность их работы, а обмотки возбуждения постоянного тока и выходные обмотки переменного тока располагаются на статоре и имеют предельно простую конструкцию. Но если здесь удастся упростить технологию изготовления обмоток, то технология изготовления магнитопроводов остается сложной. Изготовление пакетов шихтованных магнитопроводов с применением штамповки листов исключено, а другие способы (например, лазерная резка) малопроизводительны и также не являются дешевыми. Из-за повышенной частоты пульсаций магнитного потока требуется, с целью снижения вихревых токов в магнитопроводе, применение тонких листов электротехнической стали с повышенным удельным электрическим сопротивлением. А применение такой стали также нежелательно по экономическим соображениям. Ведь задача состоит в создании не только работоспособной, но прежде всего конкурентоспособной конструкции.

Все перечисленные проблемы довольно хорошо решаются применением ферритовых магнитопроводов. Была найдена возможность приобретения выпускаемых серийно ферритовых сердечников нужной формы и размеров, и конструкция рассчитывалась и создавалась с ориентацией на эти готовые элементы.

Основные элементы конструкции принятого к разработке генератора схематически представлены на рис. 1, 2. На рис. 1 показан осевой разрез генератора, на рис. 2 - его поперечное сечение. Генератор представлен в однофазном исполнении и состоит из двух не отличающихся по конструкции половин, статоры которых собраны в общем корпусе 1, а роторы – на общем валу 2. Обе половины статора и ротора разделены неферромагнитными (а желательно и непроводящими) прокладками 3 и 4. Ротор каждой половины состоит из опорной втулки 5, к которой крепятся диски 6 и 7 с пазами для

закрепления в них ферритовых магнитопроводов 8 с двумя тороидальными обмотками 9 (обмотка возбуждения) и 10 (выходная обмотка). В пазах втулки статора 11 помещены ферритовые пластины 12, число которых равно числу магнитопроводов 8 ротора.

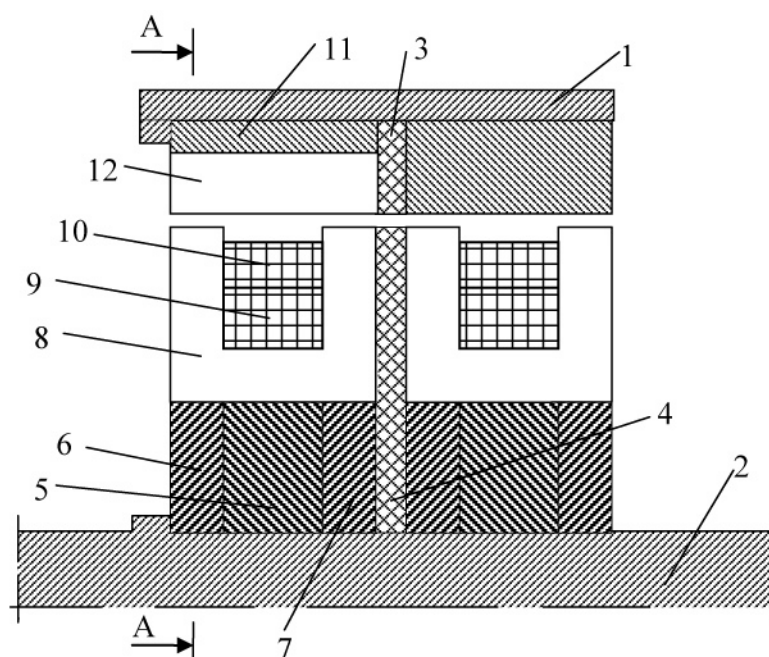


Рис. 1

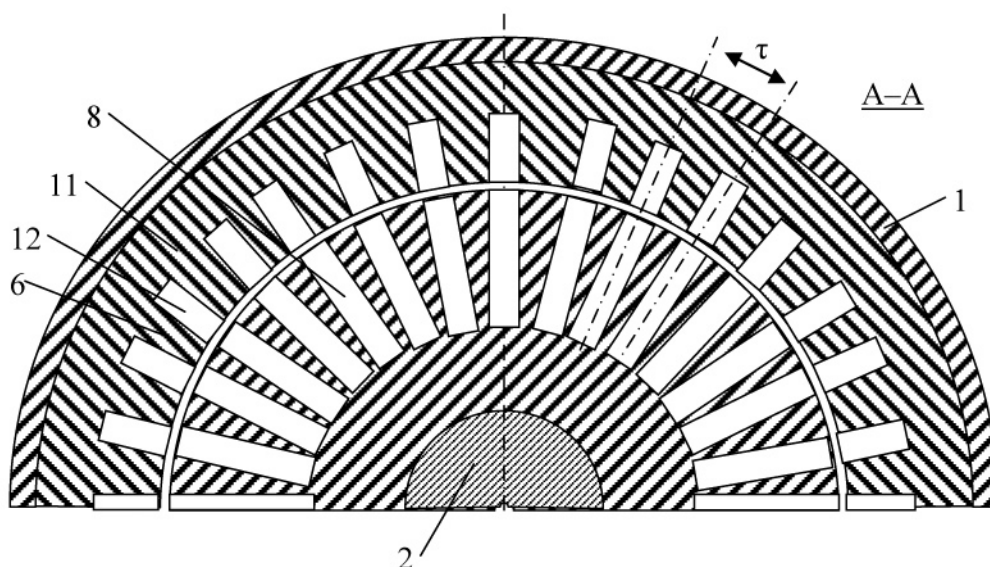


Рис. 2

Число магнитопроводов 8 (и, соответственно, 12) может быть произвольным. Угол между ними τ (зубцовое деление) при числе Z магнитопроводов равен $\gamma = 360^\circ/Z$. В рассматриваемой конструкции $Z = 36$, зубцовое деление $\gamma = 10^\circ$. Магнитопроводы роторов

двух половин ориентированы в пространстве одинаковым образом, а магнитопроводы статоров сдвинуты относительно друг друга на половину зубцового деления $\tau/2$. Таким образом, когда для одной половины зубцы ротора и статора находятся напротив друг друга (рис. 3), для другой половины они сдвинуты на угол $\tau/2$.

Принцип действия индукторного генератора основан на использовании пульсаций магнитных потоков, создаваемых обмотками возбуждения, питаемыми постоянным током, вследствие циклического изменения магнитного сопротивления на пути этих потоков.

Изменения магнитных сопротивлений обусловлено циклическим изменением величины воздушных зазоров в магнитной цепи машины при вращении ротора. Таким образом, магнитные потоки возбуждения имеют переменную составляющую, которая и наводит переменную ЭДС в выходной обмотке. Частота пульсаций потока определяется скоростью вращения ротора и числом магнитопроводов ротора или статора. При большом их числе даже при низкой скорости вращения можно обеспечить не только стандартную частоту ЭДС (50 Гц), но и частоту в несколько раз большую. При величине зубцового деления $\tau = 10^\circ$ и скоростях вращения, близких к номинальной (250 об/мин, или около 4 об/с), частота индуцируемой ЭДС около $f = 150$ Гц. При этом, поскольку стандартная частота выходного напряжения установки обеспечивается инвертором, а генератор работает лишь на подзарядку аккумуляторной батареи, такая повышенная частота является преимуществом устройства.

Рассмотрим режим работы одной половины конструкции при отсутствии тока нагрузки, т. е. режим холостого хода. Выходная обмотка разомкнута, в ней наводится переменная ЭДС, но нет тока. Магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводам 8 ротора и 12 статора (рис.1), создается только обмоткой возбуждения. Если представить себе, что ток в обмотке каким-то образом стабилизирован и остается постоянным, то намагничивающая сила (н. с.) обмотки остается постоянной, а переменная составляющая магнитного потока образуется только за счет модуляции магнитного сопротивления воздушных зазоров между ротором и статором. Магнитный поток может быть определен как

$$\Phi = \frac{i_1 w_1}{R_\mu + R_\delta}, \quad (1)$$

где $i_1 w_1$ - ток и число витков обмотки возбуждения,

R_μ - постоянное магнитное сопротивление ферромагнитных частей магнитопроводов ротора и статора,

R_{δ} - переменное магнитное сопротивление двух воздушных зазоров между магнитопроводами ротора и статора. Поэтому магнитный поток, в первом приближении, можно считать изменяющимся по закону

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_m \sin \omega t, \quad (2)$$

где Φ_0 – постоянная составляющая магнитного потока, Φ_m – амплитуда переменной составляющей (в первом приближении ее можно принять синусоидальной), ω – угловая частота, пропорциональная скорости вращения ротора. ЭДС, наводимая в выходной обмотке, равна

$$\begin{aligned} e(t) &= -\frac{d\Psi}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -W_2 \frac{d(\Phi_0 + \Phi_m \sin \omega t)}{dt} = \\ &= \omega W_2 \Phi_m \cos \omega t = E_m \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_m = \omega W_2 \Phi_m. \quad (4)$$

здесь Ψ – потосцепление выходной обмотки, W_2 – число витков выходной обмотки, E_m – амплитуда переменной ЭДС выходной обмотки.

Как видно из формулы (4), амплитуда ЭДС зависит не от величины магнитного потока возбуждения (как в классической синхронной машине), а от амплитуды его переменной составляющей. Следовательно, число витков и максимальный ток в обмотке возбуждения должны выбираться так, чтобы магнитный поток при минимальном воздушном зазоре между магнитопроводами ротора и статора не превышал потока насыщения для материала магнитопроводов ротора и статора. Максимальная же амплитуда переменной составляющей потока при этих условиях достигается при соотношениях $R_{\delta} \gg R_{\mu}$, $R_{\delta\max} \gg R_{\delta\min}$.

Но при отсутствии стабилизации тока в обмотке возбуждения реальные процессы будут сложнее даже и в режиме холостого хода. Действительно, переменная составляющая магнитного потока будет наводить ЭДС не только в выходной обмотке, но и в обмотке возбуждения, и в ней будет циркулировать переменная составляющая тока, создающая (по правилу Ленца) эффект уменьшения переменной составляющей магнитного потока и ЭДС в выходной обмотке.

При подключении нагрузки к зажимам выходной обмотки и появлении в ней переменного тока магнитный поток в сердечнике будет создаваться уже в результате совместного действия токов в обмотке возбуждения и в выходной обмотке. Особенность конструкции генератора состоит в том, что обмотки возбуждения и выходная помещены на одном и том же магнитопроводе с возникновением между ними сильной

взаимоиндуктивной связи (трансформаторного эффекта). Но работа этого своеобразного «трансформатора» сильно усложнена одновременной модуляцией магнитного сопротивления магнитопровода и наличием постоянной составляющей тока в обмотке возбуждения. По существу мы имеем дело с электромеханической системой с переменными во времени параметрами, к тому же еще и нелинейной.

Таким образом, необходимо решить задачу подавления «трансформаторного эффекта» между обмотками, при этом, не пытаясь подавить переменную составляющую магнитного потока. Достаточно добиться того, чтобы ток в обмотке возбуждения оставался постоянным.

Для решения этой задачи необходимо применять сдвоенную конструкцию генератора даже для однофазного варианта. С этой целью выходные обмотки двух половин включаются последовательно с соединением в общей точке разноименных зажимов, а обмотки возбуждения – последовательно с соединением в общей точке одноименных зажимов и подключением к источнику постоянного тока. При этом переменные ЭДС действуют в двух обмотках возбуждения встречно и взаимно компенсируются, а ЭДС в выходных обмотках суммируются. Таким образом, негативное влияние переменных составляющих магнитных потоков на обмотку возбуждения в значительной степени устраняется.

Расчет процессов в индукционном генераторе, как в электромеханической системе с переменными во времени параметрами, с учетом всех факторов является исключительно сложной задачей. В условиях лимита времени можно ограничиться приближенным расчетом, имеющим характер инженерной прикидки, однако обеспечивающей приемлемую точность, с дальнейшей доводкой конструкции на стадии натурных испытаний.

Генератор проектируется с применением ферритовых элементов магнитопровода со следующими данными: начальная относительная магнитная проницаемость $\mu = 3100$. Средняя магнитная проницаемость $\mu = 3100$, индукция насыщения $B_s = 0,39$ Тл при напряженности магнитного поля $H = 1200$ А/м. Коэрцитивная сила $H_c = 13$ А/м. Кривая намагничивания феррита представлена на рис. 3. Так как предполагается использование зависимости $B = f(H)$ только на линейном участке, следует ограничить максимально-допустимую индукцию значением $B_m = 0,3$ Тл.

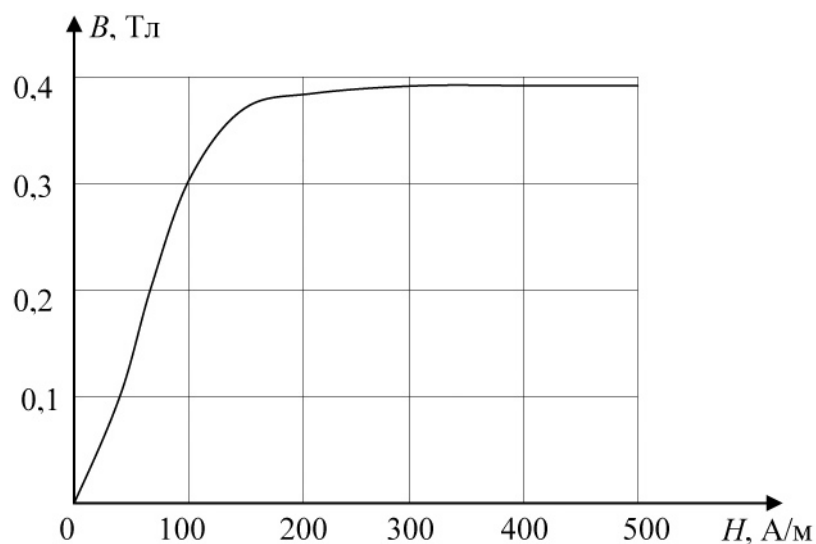


Рис. 3

Если принять среднее значение магнитной проницаемости на линейном участке кривой намагничивания $\mu = 3100$, то абсолютная магнитная проницаемость $\mu_a = \mu\mu_0 = 3100 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} = 0,0039$ Гн/м. Максимально необходимая для нормальной работы генератора напряженность магнитного поля в ферромагнитных элементах магнитной цепи генератора составляет величину $H_m = B_m/\mu_a = (0,3)/(0,0039) = 77$ А/м. Такую (и не более) напряженность должна создавать обмотка возбуждения при максимально допустимом значении магнитного потока. Существенное превышение этой величины создаст режим глубокого насыщения магнитной цепи, что сделает невозможным существенные изменения магнитного потока возбуждения, т. е. генератор окажется неработоспособным.

Расчетная схема замещения магнитной цепи электрической машины (в расчете на один элемент магнитопровода) представлена на рис. 4. Здесь $F = i_1 w_1$ – намагничивающая сила (н. с.) обмотки возбуждения, $R_{\mu c}$ – магнитное сопротивление П-образного магнитопровода 8 (рис. 1) статора, $R_{\mu p}$ – магнитное сопротивление магнитопровода 12 ротора, R_δ – магнитное сопротивление двух воздушных зазоров между магнитопроводами ротора и статора.

Магнитные сопротивления $R_{\mu c}$, $R_{\mu p}$ являются постоянными во времени и в первом приближении линейными. Они подсчитываются по формуле:

$$R_\mu = \frac{1}{\mu_a} \frac{l_{cp}}{s}, \quad (5)$$

где l_{cp} - длина средней линии, s - поперечное сечение магнитопроводов статора или ротора соответственно. Общая постоянная составляющая магнитного сопротивления (без учета воздушных зазоров) $R_{\mu} = R_{\mu c} + R_{\mu p} = 1,86 \cdot 10^5$ (1/(Ом с)).

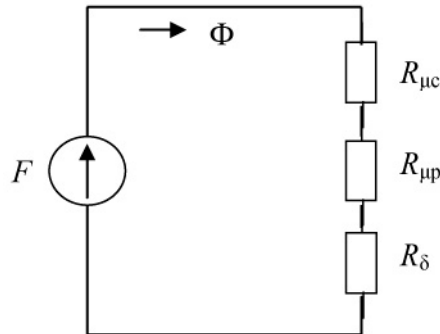


Рис. 4

Магнитное сопротивление воздушных зазоров между ротором и статором можно определить по формуле

$$R_{\delta} = \frac{1}{\mu_a} \frac{2\delta}{s}. \quad (6)$$

Это сопротивление является функцией угла поворота ротора относительно статора: $R_{\delta} = f(\alpha)$. Минимальное его значение соответствует моментам времени, когда магнитопроводы ротора и статора совмещены (см. рис. 2). В этом случае поперечное сечение воздушного зазора может быть принято равным поперечному сечению магнитопровода. Величина воздушного зазора δ по технологическим соображениям принята равной 0,5 мм. В таком случае $R_{\mu} = 22,12 \cdot 10^6$ (1/(Ом с)).

Общее минимальное значение магнитного сопротивления одного элемента равно

$$R_{\mu min} = R_{\mu c} + R_{\mu p} + R_{\delta min} = 2,96 \cdot 10^6$$
 (1/(Ом с)).

Максимальное значение

$$R_{\mu max} = R_{\mu c} + R_{\mu p} + R_{\delta max} = 22,3 \cdot 10^6$$
 (1/(Ом с)).

Отношение $(R_{\mu max})/(R_{\mu min}) \approx 7,5$ является вполне приемлемым.

Рассчитаем максимально допустимый магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, исходя из выбранного ранее максимального значения индукции, в элементах магнитопровода $B_m = 0,3$ Т. Учтем также, что в состав каждой половины устройства входит 36 таких магнитопроводов, включенных в магнитную цепь параллельно:

$$\Phi_{\max} = ZB_m s = 36 \cdot 0,3 \cdot 4,14 \cdot 10^{-4} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ (Вб)}.$$

Так как магнитный поток обратно пропорционален величине магнитного сопротивления, то при увеличении сопротивления в 7,5 раз минимальное значение потока будет равно $\Phi_{\min} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Вб)}$. Амплитуда переменной составляющей магнитного потока $\Phi_m = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min})/2 = 1,95 \cdot 10^{-3} \text{ (Вб)}$.

При частоте $f = 150 \text{ Гц}$ закон изменения во времени переменной составляющей магнитного потока можно представить как

$$\Phi(t) = 1,95 \cdot 10^{-3} \sin(2\pi \cdot 150t) = 1,95 \cdot 10^{-3} \sin(942t).$$

Выходная переменная ЭДС в расчете на один виток равна

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = 1,84 \sin(942t + \frac{\pi}{2}).$$

Для получения действующего значения выходного напряжения $U = 60 \text{ В}$ при амплитуде 84,6 В рабочая обмотка должна иметь $84,6/1,84 = 46$ витков. Так как работают две последовательно включенные выходные обмотки, каждая из них должна иметь по 23 витка. Для того, чтобы иметь возможность поддерживать номинальное напряжение при скоростях, меньших номинальной скорости ротора, а также с учетом уменьшения напряжения генератора с ростом тока нагрузки, число витков рабочей обмотки должно быть увеличено по меньшей мере вдвое. Поперечное сечение провода выходной обмотки рассчитывается с учетом величины номинального тока и его предельно допустимой плотности.

Рассчитаем теперь намагничивающую силу (н. с.) обмотки возбуждения, способной создать в сердечнике и в воздушном зазоре магнитопровода максимальный магнитный поток, соответствующий выбранному максимальному значению индукции $B_m = 0,3 \text{ Т}$. По закону полного тока

$$i_1 w_1 = H l_{\text{cp}} + H_{\delta} 2\delta = \frac{B_m}{\mu_a} l_{\text{cp}} + \frac{B_{\delta}}{\mu_0} 2\delta. \quad (5)$$

В данном случае величина н. с. равна $i_1 w_1 = 250 \text{ А}$. Такую намагничивающую силу можно создать при различных соотношениях между величиной тока возбуждения i_1 и числом витков w_1 , но при этом потребляемая обмоткой мощность различна. Выберем значение $i_1 = 1 \text{ А}$. Для обмотки возбуждения выбран провод диаметром 0,56 мм, его сопротивление в расчете на метр длины составляет 0,11 Ом. Средняя длина одного витка 1 м, длина провода обмотки 250 м, полное сопротивление обмотки возбуждения $r_b = 28 \text{ Ом}$. Потребляемая мощность составляет $P = (i_1)^2 r_b = 28 \text{ Вт}$ при напряжении

питания $U_B = 28$ В. Так как последовательно включены обмотки двух элементов магнитопровода, потребляемая мощность будет составлять 56 Вт, что вполне приемлемо, а напряжение питания U_B можно выбрать равным номинальному напряжению генератора, т. е. $U_B = 60$ В.

Выводы:

1. Рассматриваемый генератор индукционного типа способен обеспечить приемлемую величину индуцируемой ЭДС при низкой скорости вращения ротора за счет высокочастотной модуляции магнитного потока.

2. В связи с высокой частотой переменной составляющей магнитного потока возникает проблема борьбы с вихревыми токами в магнитопроводе. Наиболее успешно она решается применением ферритов в качестве материала сердечников. Попутно решается ряд технологических проблем.

3. Создание базового блока однофазного генератора позволяет в дальнейшем размещать несколько (реально 2 или 3) таких блоков на одном валу с целью увеличения выходной мощности или создания эквивалентного двух или трехфазного генератора.

4. Недостатком конструкции является размещение обмоток возбуждения и выходных рабочих обмоток таким образом, что магнитная цепь этих обмоток является общей. Возможно повышенное взаимоиндуктивное влияние этих обмоток и, как следствие, сравнительно мягкая внешняя характеристика генератора со значительным падением выходного напряжения с ростом тока нагрузки. В связи с этим может потребоваться применение емкостной компенсации. Кроме того, желательно, чтобы при номинальной скорости вращения ротора и номинальном токе возбуждения выходное напряжение генератора в режиме холостого хода значительно превышало его номинальное значение (в данной конструкции это требование выполняется). В этом случае регулированием тока возбуждения легко поддерживать необходимое значение выходного напряжения при увеличении тока нагрузки или уменьшении скорости вращения ротора.

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 839 с.
2. Бертинов А.И. Специальные электрические машины. М.: Энергоиздат, 1982. 552 с.
3. Алексеева М.М. Машинные генераторы повышенной частоты. Л.: Энергия, 1967. 344 с.