

Проектирование и выбор параметров вентильно-индукторного генератора

БАЛЬ В.Б., АУНГ МИНТ ТУН

За все время применения (более 20 лет) вентильно-индукторные генераторы зарекомендовали себя как перспективный тип генераторов с электронным управлением и простой конструкцией механической части. В последнее время разработаны новые способы коммутации генераторов, позволяющие повысить их мощность. При этом методы проектирования вентильно-индукторных генераторов развиты недостаточно. В статье проведено сравнение выбора электромагнитных нагрузок традиционного индукторного и вентильно-индукторного генераторов. Показано, что вентильно-индукторный генератор может работать при повышенных электромагнитных нагрузках, даются рекомендации по их выбору.

Ключевые слова: вентильно-индукторный генератор, коммутатор, электромагнитные нагрузки, потокосцепление, магнитная энергия

Вентильно-индукторный генератор представляет собой индукторную электрическую машину без обмотки возбуждения, с электронным коммутатором. Отсутствие обмотки возбуждения генератора упрощает конструкцию его механической части, а также улучшает технологичность, уменьшает стоимость изготовления и повышает эксплуатационную надёжность генератора.

Схема генератора показана на рис. 1. Каждая его фаза соединена с полумостовым инвертором (показан только инвертор фазы А), выход которого связан со звеном постоянного тока (ёмкость C) и преобразователем частоты ПЧ. Выходы ПЧ подсоединены к сети или автономной нагрузке. Полумостовой инвертор состоит из двух транзисторных ключей T_1, T_2 с обратными диодами D_1, D_2 , двух диодов D_3, D_4 и блока управления транзисторными ключами БУ.

Наибольшая мощность вентильно-индукторного генератора обеспечивается при способе коммутации со стабилизацией магнитного потока [1]. Цикл коммутации состоит из трёх этапов (рис. 2).

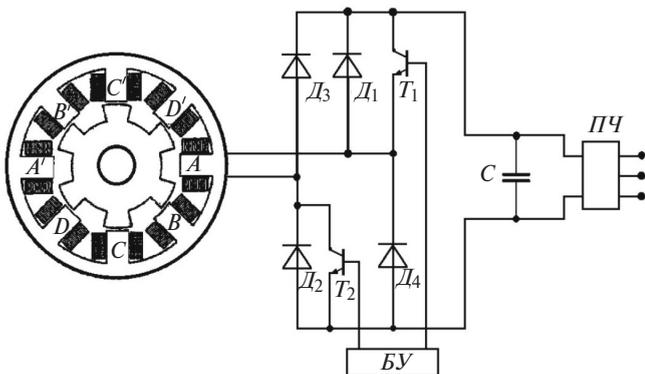


Рис. 1. Вентильно-индукторный генератор со схемой управления

На этапе I возбуждается фаза, на неё подаётся импульс положительного напряжения U длительностью $t_{и}$. Ток и потокосцепление фазы генератора увеличиваются до значений I_2 и ψ_1 . На этапе II (накопление энергии) инвертор генератора отключает фазу от источника напряжения (ёмкость C на рис. 1) и замыкает накоротко. Для этого закрывается транзистор T_1 , а транзистор T_2 остается открытым. Фаза оказывается замкнутой накоротко через открытый транзистор T_2 и обратный диод D_2 .

В этом режиме механическая энергия приводного двигателя генератора преобразуется только в энергию магнитного поля, так как фаза отключена от источника электроэнергии. Изменение магнитного потокосцепления $d\psi/dt$ пропорционально напряжению U на выводах фазы ($\frac{d\psi}{dt} = U - IR$, где I — ток фазы; R — активное сопротивление фазы). Обычно IR значительно меньше U , и без большой погрешности можно считать изменение магнитного потокосцепления пропорциональным напряжению.

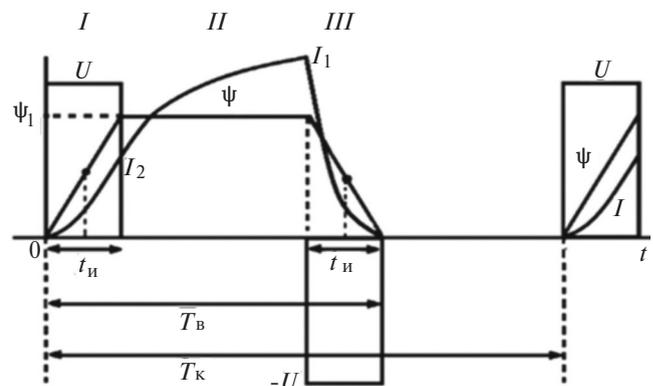


Рис. 2. Диаграмма токов, напряжений и потокосцепления генератора

Когда фаза замкнута накоротко, напряжение на ней равно нулю и изменение магнитного потокосцепления также стремится к нулю, что означает стабилизацию магнитного потокосцепления. Ток фазы в этом режиме увеличивается и достигает значения I_1 . Также увеличивается энергия магнитного поля. При постоянном магнитном потоке и уменьшающейся магнитной проводимости рабочего зазора генератора (в генераторном режиме индукторной машины магнитная проводимость зазора меняется при вращении ротора от максимального до минимального значения) ток обратно пропорционален магнитной проводимости. На этапе коммутации III (сброс магнитной энергии фазы в источник) подаётся импульс отрицательного напряжения длительностью $t_{и}$. Ток фазы и магнитное потокосцепление уменьшаются до нуля. Энергия магнитного поля передаётся в источник питания.

Прежде в основном использовался способ коммутации фаз с ограничением (стабилизацией) тока в течение цикла коммутации. Преимущество коммутации фаз с постоянным магнитным потоком по сравнению со способом коммутации фаз с постоянным током состоит в увеличении выработанной генератором энергии за цикл коммутации [1, 6]. На рис. 3 представлена диаграмма преобразования энергии генератора. Треугольник ACD соответствует энергии, выработанной генератором за цикл при коммутации фаз с постоянным магнитным потоком $W_{пм}$. Стороны треугольника соответствуют трём этапам коммутации: OA – возбуждению фазы, AC – накоплению энергии; OC – сбросу энергии. Треугольник ABD соответствует энергии, выработанной генератором за цикл при коммутации фаз с постоянным током $W_{пт}$. Разница площадей ACD и ABD (площадь треугольника ABC) равна дополнительной энергии, вырабатываемой генератором за цикл коммутации при замене коммутации с постоянным током $W_{пт}$ на коммутацию с постоянным магнитным потоком. Как показано в [1], для линейной магнитной системы увеличение энергии, выработанной за цикл коммутации генератора, а значит

и его мощности, пропорционально отношению значений максимальной Λ_{\max} и минимальной Λ_{\min} магнитной проводимости рабочего зазора генератора:

$$\frac{W_{пм}}{W_{пт}} = \frac{\Lambda_{\max}}{\Lambda_{\min}}. \quad (1)$$

Для нелинейной магнитной системы выражение (1) использовать нельзя. Насыщение магнитной цепи уменьшает разницу в значениях мощности генератора при разных способах коммутации. Как видно из рис. 3, площадь треугольника DFE , которая определяет разницу в значениях мощности генератора при разных способах коммутации для насыщенной области, существенно меньше площади треугольника ABC .

Проектирование вентильно-индукторного генератора, как и большинства других электрических машин, начинается с выбора главных размеров. Как правило, они определяются с помощью машинной постоянной, определяющей связь размеров машины с требуемым значением момента машины и электромагнитными нагрузками. Может быть использована традиционная машинная постоянная Арнольда, определяющая зависимость внутреннего объёма статора от момента машины, при электромагнитных нагрузках: магнитной индукции в рабочем зазоре B_{δ} и линейной нагрузке A [2], или машинная постоянная, связывающая объём рабочего зазора машины и значение её момента, при электромагнитной нагрузке – магнитной индукции в рабочем зазоре B_{δ} [3]:

$$C_M = \frac{2p\tau l_{\delta} \delta \omega}{P'} = \frac{8\tau}{B_{\delta}^2 \lambda_1 \delta} \cdot 10^{-7}, \quad (2)$$

где P' – приведённая мощность; p – число пар полюсов; l_{δ} – длина рабочего зазора; ω – угловая скорость вращения; τ – зубцовое деление ротора; λ_1 – удельная переменная составляющая магнитной проводимости рабочего зазора; δ – рабочий зазор.

Последняя машинная постоянная из названных выше более удобна для применения, так как объём рабочего зазора пропорционален размеру зазора δ , который в традиционной машинной постоянной Арнольда учитывается косвенно. Для выбора главных размеров с помощью постоянной Арнольда используют в том числе отношение A/B_{δ} [4], которое зависит от значения δ . Машинная постоянная (2) использует только один параметр в качестве электромагнитной нагрузки – B_{δ} .

Проектирование генератора целесообразно начинать с выбора магнитной индукции B_{δ} , затем по уравнению машинной постоянной (2) определить необходимый объём рабочего зазора машины $2p\tau l_{\delta} \delta$. Безразмерное выражение $\tau/\lambda_1 \delta$ в (2) достаточно постоянно в диапазоне изменения

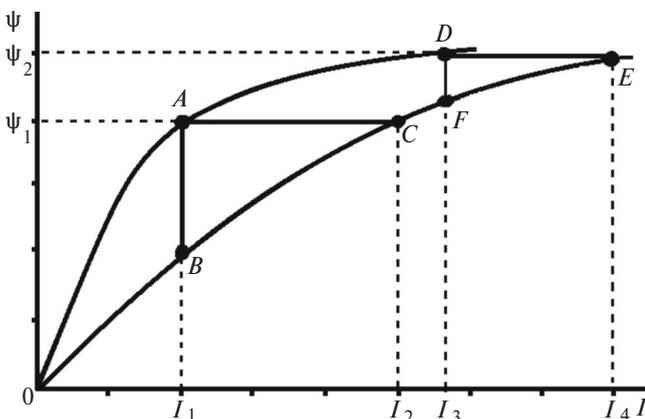


Рис. 3. Коммутация со стабилизацией тока

$\tau/\delta=8\div 120$ и может быть выбрано из значений, приведенных ниже, где даны расчётные значения $\tau/\lambda_1\delta$ в зависимости от τ/δ :

| | | | | |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|
| τ/δ | 8 | 32 | 80 | 120 |
| $\tau/\lambda_1\delta$ | 4,9 | 3,7 | 3,8 | 3,7 |

Удельная магнитная проводимость λ_1 определялась на основе моделирования магнитного поля. Предварительно, когда τ/δ неизвестно, значение $\tau/\lambda_1\delta$ может быть принято равным среднему значению 3,7.

Для обоснованного выбора B_δ было проведено моделирование магнитного поля зубцовой зоны индукторной машины. Для создания 2D-модели магнитного поля использовалась программа FEMM. При моделировании изменялся параметр τ/δ в диапазоне $8\div 120$, другие относительные размеры оставались постоянными. Значения относительной ширины и высоты зубца (b_z/τ и h_z/τ) равнялись 0,5, что соответствует наиболее распространённым соотношениям размеров зубцовых зон индукторных машин. В результате моделирования были получены зависимости удельной магнитной проводимости и удельной магнитной энергии от магнитной индукции в зубцах B_z .

На рис. 4 и 5 представлены зависимости максимальной W_{\max} , минимальной W_{\min} удельной магнитной энергии зубцовой зоны и их разности ΔW в зависимости от магнитной индукции в зубцах B_z для $\tau/\delta=8$ и $\tau/\delta=120$. Максимальная магнитная энергия соответствует минимальной магнитной проводимости рабочего зазора (рассогласованное положение зубцов статора и ротора). Минимальная магнитная энергия соответствует максимальной магнитной проводимости рабочего зазора (согласованное положение зубцов статора и ротора). Минимальная магнитная энергия соответствует энергии, затраченной на возбуждение магнитного поля, максимальная — энергии, возвращаемой в источник питания. Разница энергий ΔW — энергия, вырабатываемая генератором. Магнитная энергия дана в относительных единицах.

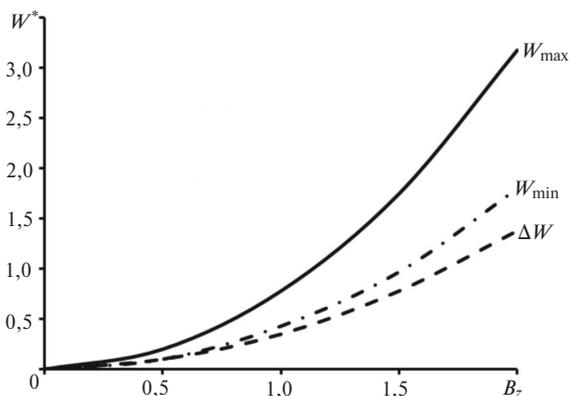


Рис. 4. Зависимости магнитной энергии зубцовой зоны индукторной машины от магнитной индукции в зубцах B_z (Тл) для $\tau/\delta=8$

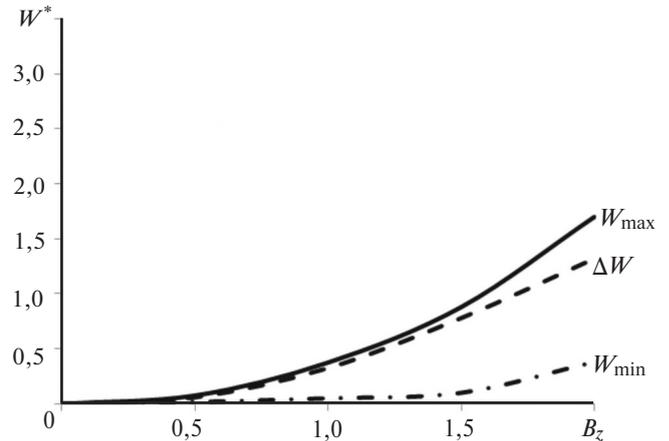


Рис. 5. Зависимости магнитной энергии зубцовой зоны индукторной машины от магнитной индукции в зубцах B_z (Тл) для $\tau/\delta=120$

За базовое принято значение энергии W_{\max} , соответствующее началу насыщения зубцовой зоны (колени кривой намагничивания). На рис. 3 начало насыщения соответствует потокосцеплению ψ_1 , а базовая энергия — площади треугольника $\psi_1 C O$.

Результаты показывают, что во всём диапазоне изменения относительного значения зазора $\tau/\delta=8\div 120$ энергия генератора ΔW остаётся практически одинаковой. Полученная авторами зависимость энергии ΔW от магнитной индукции B_z для ряда значений τ/δ , подтвердила независимость ΔW от τ/δ .

С ростом B_z энергия ΔW увеличивается, что отличает вентильно-индукторный генератор от классического индукторного генератора, имеющего падающую характеристику холостого хода [5] (рис. 6). Насыщение магнитной цепи в классическом индукторном генераторе приводит к уменьшению модуляции магнитного потока и уменьшению ЭДС E с ростом тока возбуждения I_B . В вентильно-индукторном генераторе обмен энергией с источником питания происходит независимо от значения его ЭДС, и поэтому энергия генератора

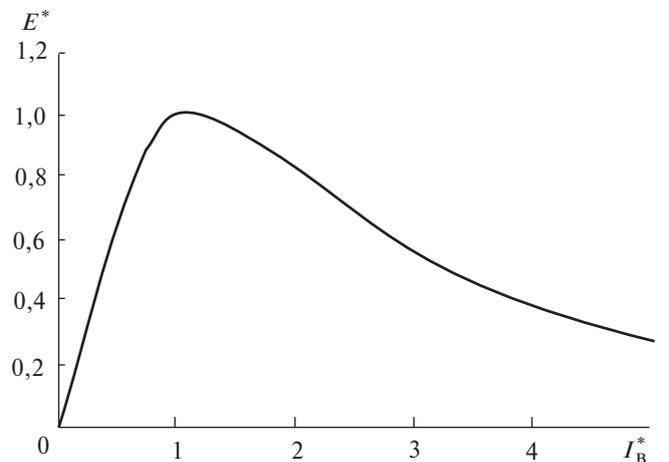


Рис. 6. Характеристика холостого хода классического индукторного генератора

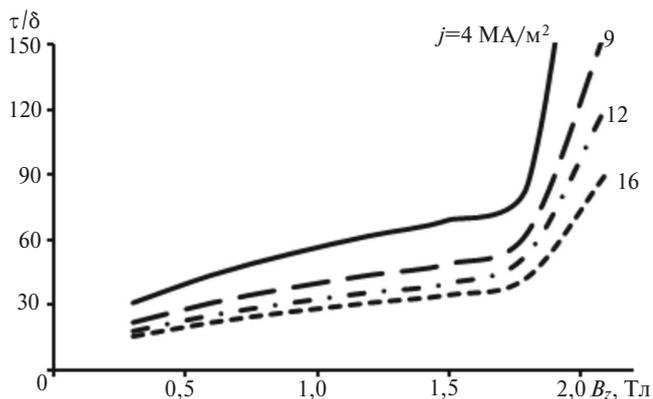


Рис. 7. Зависимости относительного значения зубцового деления τ/δ от магнитной индукции в зубцах B_z и плотности тока в обмотке j ($h_z/\tau=1$)

ΔW и его мощность плавно возрастают с ростом магнитной индукции в зубцах B_z . Рост магнитной индукции и насыщение магнитной цепи приводят к росту требуемой МДС обмотки генератора и увеличению его массогабаритных показателей, поэтому значение магнитной индукции B_z не должно быть слишком большим.

На рис. 7 и 8 приведены зависимости значений τ/δ зубцовой зоны генератора от магнитной индукции в зубцах B_z и плотности тока в обмотке j . Конструкция генератора (рис. 1) предполагает размещение обмоток в пазах статора, поэтому его зубцовое деление τ пропорционально корню квадратному площади сечения катушки обмотки, которая зависит от B_z и j . Зависимости даны в относительных единицах, так как пропорциональное изменение τ и δ не изменяет конфигурации магнитного поля зубцовой зоны и относительные параметры зубцовой зоны остаются неизменными. Зависимости получены для двух значений относительной высоты зубца $h_z/\tau=1$ (рис. 7) и $h_z/\tau=2$ (рис. 8) при коэффициенте заполнения паза $k_3=0,5$, что характерно для обмоток из прямоугольного провода электрических машин средней мощности.

Зависимости на рис. 7 и 8 показывают минимальное значение τ/δ , необходимое для размещения обмотки при данных B_z , j , k_3 и h_z/τ и могут быть использованы для выбора главных размеров генератора. При значениях магнитной индукции B_z , больших $1,8 \div 1,9 \text{ Тл}$, наступает насыщение зубцовой зоны генератора, значительно увеличивается значение τ/δ и ухудшаются массогабаритные показатели. Рекомендуемые значения магнитной индукции в зубцах B_z в зависимости от относительной глубины паза h_z/τ :

| h_z/τ | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|-----|-----|-----|
| $B_z, \text{ Тл}$ | 1,8 | 1,7 | 1,6 |

С увеличением h_z/τ насыщение увеличивается и значение магнитной индукции должно быть

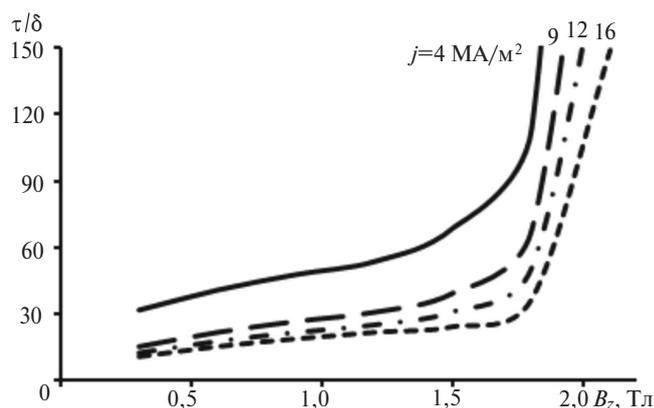


Рис. 8. Зависимости относительного значения зубцового деления τ/δ от магнитной индукции в зубцах B_z и плотности тока в обмотке j ($h_z/\tau=2$)

уменьшено. Тем не менее, значения B_z в вентильно-индукторном генераторе выше, чем в классическом индукторном генераторе. По данным [4], значения B_z в обычном индукторном генераторе не должны превышать 1,3 Тл.

Для расчёта объёма рабочего зазора по (2) можно перейти от B_z к среднему значению магнитной индукции в зазоре B_δ по соотношению $B_\delta=0,6B_z$ [4]. Конкретные размеры рабочего зазора можно определить, выбрав два относительных размера, например τ/δ и τ/l_δ . Относительное минимальное значение зубцового деления τ/δ можно определить из рис. 7 или 8, а τ/l_δ — из известных соотношений электрических машин [2]. На основе опыта проектирования оптимальные значения τ/δ_1 лежат в диапазоне $0,3 \div 1,0$. В общем случае относительные размеры определяются на основе оптимизационных расчётов для выбранного критерия оптимальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баль В.Б., Аунг Минг Тун. Вентильно-индукторные генераторы. Способы управления и проектирование. — Электротехника, 2019, № 6, с. 35–39.
2. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Юрайт, 2015, 674 с.
3. Баль В.Б., Аунг Минг Тун. Проектирование вентильно-индукторных генераторов. Машинная постоянная и выбор главных размеров. — Вестник МЭИ, 2018, № 3, с. 60 – 65.
4. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высшая школа, 1982, 272 с.
5. Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы. М.: Энергия, 1970, 192 с.
6. David A.T. Switched Reluctance Generators and Their Control. IEEE Transactions on industrial electronics, February 2002, vol. 49, No.1, с. 3–14.

[26.09.2019]

А в т о р ы: Баль Владимир Борисович — кандидат техн. наук, доцент Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» — НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1982 г.

Аунг Минг Тун — аспирант НИУ «МЭИ» (Союз Мьянма).

Design and Parameters Selection of the Switched Reluctance Generator

BAL Vladimir B. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — *Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)*

Aung Myint Tun (*Union Myanma*) — *Ph. D.-student of NRU «MPEI»*

Switched reluctance generators have been known for about 20 years. During this time, they have established themselves as a promising type of generators with electronic control and a simple design of the mechanical part. Recently, new methods of switching generators to increase their power have been developed. At the same time, the methods of designing switched reluctance generators are not yet sufficiently developed. The comparison of the choice of electromagnetic loads of the traditional inductor generator and the switched reluctance generator is carried out. It is shown that the switched reluctance generator can operate at elevated electromagnetic loads, compared with the electromagnetic loads of a traditional inductor generator. Recommendations on the choice of electromagnetic loads of the generator are given.

Key words: *switched reluctance generator, switch, excitation, current stabilization, flux coupling, magnetic energy*

REFERENCES

1. **Bal' V.B., Aung Myint Tun.** *Electrotechnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2019, No. 6, pp. 35–39.
2. **Kopylov I.P.** *Elektricheskiye mashiny (Electrical machines)*. Moscow, Yuraite, 2015, 674 p.
3. **Bal' V.B., Aung Myint Tun.** *Vestnik MPEI – in Russ. (Bulletin of Moscow Power Engineering Institute)*, 2018, No. 3, pp. 60–65.
4. **Balagurov V.A.** *Proektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka (Design of special electric AC machines)*. Moscow, Vysshaya shkola, 1982, 272 p.
5. **Alper N.Ya., Terzyan A.A.** *Induktornye generatory (Inductor generators)*. Moscow, Energiya, 1970, 192 p.
6. **David A.T.** Switched Reluctance Generators and Their Control. *IEEE Transactions on industrial electronics*, February 2002, vol. 49, No.1, pp. 3-14.

[26.09.2019]