

*Королев В. И., студент 2 курс магистратуры, кафедра «Электромеханика, электрические и электронные аппараты»*

*Национальный Исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва*

## **ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР**

**Аннотация:** Процесс совершенствования традиционных типов электрических машин продолжается более ста лет. За это время были достигнуты значительные успехи. Однако требования, предъявляемые современными электромеханическими устройствами к электрическим машинам, продолжают расти. Поэтому все больший интерес приобретают новые виды электрических машин, одним из которых является вентильно-индукторный генератор. Целью данной работы является изучение вентильно-индукторного генератора и способов регулирования его работы.

**Ключевые слова:** Индукторная машина, вентильно-индукторная машина, индуктивность, преобразование энергии, регулирование режима работы.

**Annotation:** The process of improving traditional types of electric machines has been going on for over a hundred years. Significant successes have been achieved during this time. However, the requirements of modern electro-mechanical devices for electric machines continue to grow. Therefore, new types of electric machines are gaining more and more interest, one of which is the switched-reluctance generator. The aim of this work is to study the switched-reluctance generator and methods for regulating its operation.

**Key words:** Inductor machine, switched-reluctance machine, inductivity, conversion of energy, monitor control.

Электрическая машина является одним из основных элементов любого электромеханического устройства. Поэтому улучшение его характеристик связано с совершенствованием электрической машины, в частности с оптимизацией процесса электромеханического преобразования энергии. Долгое время решение этой задачи прочно связывалось с применением более эффективных материалов, технологий производства и конструктивных решений. Перспективы дальнейшего роста эффективности электромеханического преобразования энергии связаны с непосредственным управлением этим процессом, что обуславливает повышенный интерес со стороны электромехаников к системам регулируемого электропривода.

Качественный скачок в этом направлении обозначен разработкой интеллектуальных электромеханических преобразователей энергии, которые одновременно осуществляют и преобразование энергии, и управление им. Эти устройства представляют собой, с одной стороны, электрическую машину, а с другой - интегрированную систему регулируемого электропривода, то есть система управления является неотъемлемой частью процесса преобразования энергии, что открывает широкие возможности в сфере, как разработки алгоритмов управления, так и использования принципиально новых конструкций электрических машин.

Одним из интеллектуальных электромеханических преобразователей энергии является вентильно-индукторный генератор (ВИГ) [2]. ВИГ представляет собой достаточно сложную электромеханическую систему. В ее состав входят: индукторная машина (ИМ), блок преобразования питания (БПП), система управления и датчик положения ротора (ДПР) (рисунок 1). Функциональное назначение этих элементов ВИГ очевидно: блок преобразования питания обеспечивает питание фаз ИМ однополярными импульсами напряжения прямоугольной формы; ИМ осуществляет электромеханическое преобразование энергии; система управления в

соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет данным процессом.

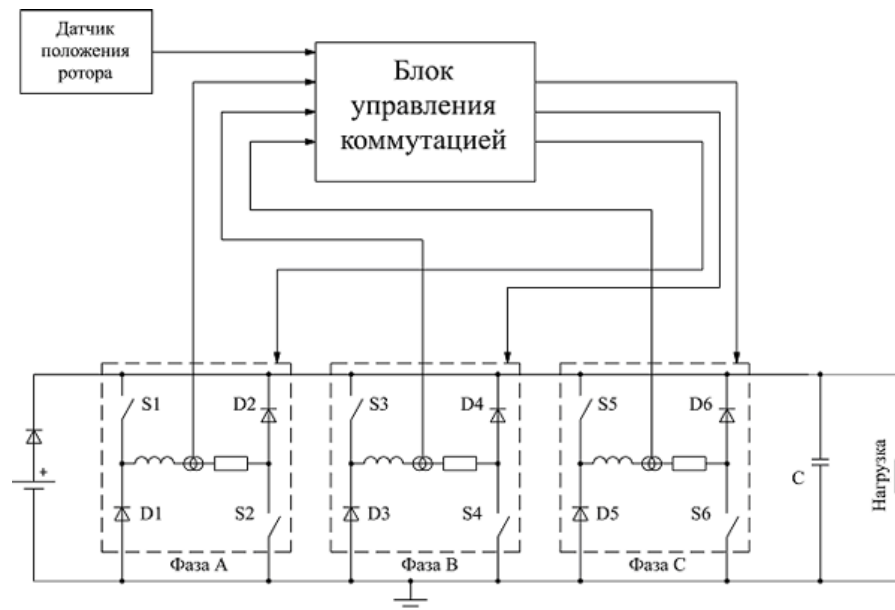


Рисунок 1. Блок-схема вентильно-индукторного генератора.

Рисунок 2 показывает поперечное сечение 4-х фазного ВИГ с явнополюсной конструкцией статора и ротора. Ротор приводится в движение благодаря внешнему источнику механической энергии, например воздушной турбине. Ток  $I$  будет возбуждать обмотку статора, и создавать магнитное поле.

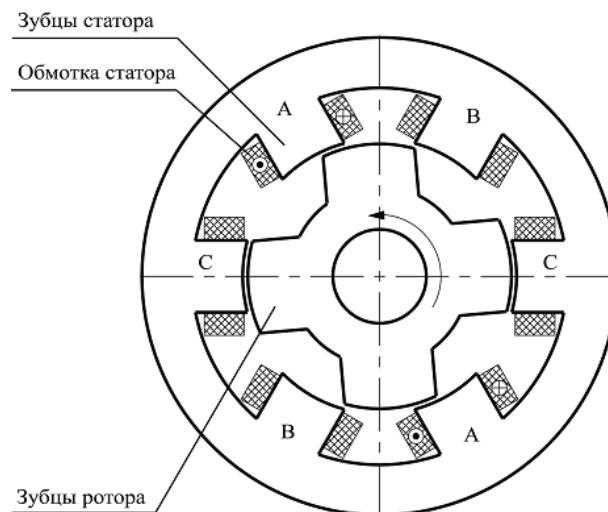


Рисунок 2. 4-х фазный вентильно-индукторного генератора в разрезе.

Статор и ротор ИМ – зубчатые, из шихтованной электротехнической стали. Конфигурацию ВИМ принято обозначать дробью, в числителе которой

указывают число зубцов статора, а в знаменателе число зубцов ротора  $Z_{ст}/Z_{рот}$ .

Обмотка статора ИМ выполняется в виде сосредоточенных, размещенных на зубцах катушек, что обеспечивает высокую технологичность их изготовления. Ротор ИМ не имеет обмотки, что повышает надежность и уменьшает стоимость ВИМ по сравнению с другими типами вентильного привода.

Рассмотрим способ работы ВИГ: выходное напряжение ВИГа будет определено благодаря изменению удельного магнитного сопротивления в зависимости от позиции ротора. Этот принцип дает возможность абсолютно иного способа управления относительно других генераторов. ВИГ по своему существу пассивен из-за отсутствия поля возбуждения. Эта проблема может быть решена с помощью источника питания, используемого для возбуждения машины [1, с. 355]. Суть работы ВИГ и его самовозбуждения состоит в том, чтобы иметь 2 фазы работы на каждый период (возбуждения и генераторный). На первой части периода работы, обмотки статора будут возбуждаться внешним источником питания (батарея или конденсатор), и электрическая энергия, подведенная к обмоткам статора, будет преобразована в энергию магнитного поля. На второй части периода, магнитное поле и механическая энергия вращения ротора будут преобразованы в электрическую энергию, которая будет отдаваться в сеть или для накопления энергии внешнего источника. Контроль над этими стадиями на протяжении периода может осуществляться достаточно гибко благодаря системе управления.

Принцип действия ИМ основан на реактивном взаимодействии зубцов статора и ротора. Потокосцепления катушек  $\psi = \psi(\theta, i)$  зависят от взаимного углового положения зубцов статора и ротора и тока катушек  $I$ .

$$U = R \cdot i + \frac{d\psi}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\psi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

Зубцы ротора ИМ, под действием протекающего в катушках фазы тока, стараются занять положение, соответствующее наибольшему значению энергии магнитного поля. [2, с. 2] Соответственно, когда ротор выходит из положения,

появляется сила, направленная против движения ротора. В обмотке статора наводится ЭДС, с обратным, относительно возбуждающей ЭДС, знаком. Под действием этой ЭДС начинает протекать ток, который является генерируемым данной машиной.

Так как  $\psi = L \cdot i$  (2),

то можно перейти от потокосцепления к индуктивности.

Индуктивность зависит от положения ротора; существуют разные методики для описания взаимосвязи между индуктивностью и положением ротора. Первая методика состоит в использовании линейного соотношения между индуктивностью и положением ротора. Вторая методика состоит в использовании нелинейной зависимости. На рисунке 3 показана линейная зависимость.

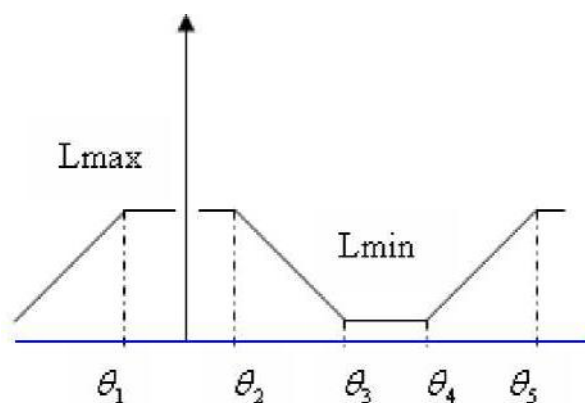


Рис. 3 Линейная зависимость между индуктивностью и положением ротора.

Нелинейная зависимость описывается последовательностью Фурье; Индуктивность, это функция тока возбуждения и угла поворота ротора  $L(\theta, i)$ ; значение индуктивности постоянно и периодически с периодом равным  $(2\pi/P_r)$ , где  $P_r$  это количество полюсов ротора. Применяя ряд Фурье и приняв во внимание симметричность относительно оси  $y$  на участке  $[-\pi/P_r, \pi/P_r]$ , получим выражение 3, описывающее взаимосвязь между индуктивностью, током и углом поворота ротора:

$$L(\theta, i) = L_0(i) + \sum_{n=1}^{\infty} L_n(i) \cos nPr\theta \quad (3)$$

В качестве результата подсчета индуктивности можно принять первые 3 гармоники:

$$L(\theta, i) = L_0(i) + L_1(i)\cos Pr\theta + L_2(i)\cos 2Pr\theta + L_3(i)\cos 3Pr\theta \quad (4)$$

Величины 4-х неизвестных индуктивностей можно определить из 4-х известных:

Максимальная величина индуктивности  $L_{\max}$  в точке  $\theta=0$

Минимальная величина индуктивности  $L_{\min}$  в точке  $\theta=\pi/Pr$

Величина индуктивности  $L_a$  в точке  $\theta=\pi/2Pr$

Величина индуктивности  $L_b$  в точке  $\theta=\pi/3Pr$

Тогда четыре неизвестные индуктивности определяются:

$$\begin{cases} L_0 = \frac{1}{4}[L_{\max}(i) + L_{\min}(i)] + \frac{1}{2}L_a(i) \\ L_1 = \frac{1}{4}L_{\max}(i) - \frac{1}{2}L_a(i) + \frac{2}{3}L_b(i) - \frac{5}{12}L_{\min}(i) \\ L_2 = \frac{1}{4}[L_{\max}(i) + L_{\min}(i)] - \frac{1}{2}L_a(i) \\ L_3 = \frac{1}{4}L_{\max}(i) + \frac{1}{2}L_a(i) - \frac{2}{3}L_b(i) - \frac{1}{12}L_{\min}(i) \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений 5 демонстрирует связь между индуктивностью, положением ротора и током. Индуктивность  $L$  изменятся как показано на рисунке 4. Максимальное значение индуктивности будет наблюдаться, когда статор и ротор согласованы, как показано на рисунке 4.

Поток может быть определен из индуктивности, связь между потоком и положением ротора можно определить, используя выражение 4.



Рисунок 4. Зависимость индуктивности от положения ротора.

Энергия в обмотке статора ВИГ разделяется на две составляющие: первая это возбуждающая или двигающая энергия и вторая это энергия, которая преобразуется в электрическую. Равенство 6 описывает метод определения

преобразуемой энергии. Электрическая энергия может быть представлена как

$$\left[ \frac{\partial A}{\partial \theta} \right]_{i=const}$$

$$A = \int_0^{i_1} \varphi(\theta, i) di \quad (6),$$

где А-работа электрического поля.

Зона В рисунка 5 представляет собой энергию, затраченную в двигательном этапе работы, а зона А представляет собой энергию, которая превращается в электрическую

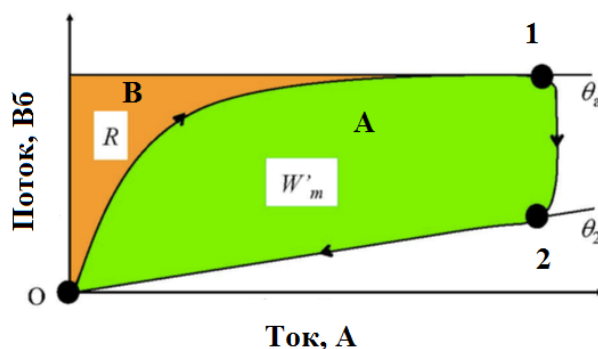


Рисунок 5. Энергия, которая превратится в электрическую или механическую.

Выходная мощность будет зависеть от плотности потока, которая в свою очередь зависит от индуктивного сопротивления машины. Анализируя зону А можно заметить, что в зависимости от тока возбуждения включение будет разделено на интервалы по 0,2 А. Равенство 6 показывает подсчет зоны А:

$$A = \sum_{n=0}^{5i} \int_n^{\frac{n+1}{5}} L(\theta, \frac{n+1}{5}) \times idi \quad (7)$$

Равенство 4 используется для определения  $L(\theta, \frac{n+1}{5})$

Равенство 8 представляет равенство 7 при токе возбуждения равным 1А.

$$A = \left( L(\theta, 0.2) \times \left[ \frac{i^2}{2} \right]_0^{0.2} + L(\theta, 0.4) \times \left[ \frac{i^2}{2} \right]_{0.2}^{0.4} + L(\theta, 0.6) \times \left[ \frac{i^2}{2} \right]_{0.4}^{0.6} + \right. \\ \left. L(\theta, 0.8) \times \left[ \frac{i^2}{2} \right]_{0.6}^{0.8} + L(\theta, 1) \times \left[ \frac{i^2}{2} \right]_{0.8}^1 \right) \quad (8)$$

Зона В соответственно равняется произведению максимального тока А и максимального потока за вычетом зоны, которая рассчитывается в выражении 8

По сравнению с большинством электрических машин вентильно-индукторная обладает рядом преимуществ:

простота конструкции: ротор и статор выполнены в виде пакетов листового магнитомягкого материала.

Отсутствие обмоток на роторе: обмотки располагаются только на статоре. Катушки изготавливаются отдельно, и устанавливаются на полюса статора;

- высокая ремонтпригодность;
- отсутствие механического коммутатора (коллектора, щеток);
- высокие массогабаритные характеристики;
- высокая надёжность ВИМ;
- высокий диапазон частот вращения: от единиц до сотен тысяч об/мин;
- активный регулятор мощности;
- возможность регулирования машины таким образом, чтобы выходная мощность и напряжение были постоянны при разных частотах вращения[3, с. 6].

Также в ВИМ есть некоторые недостатки, по сравнению с классическими машинами:

- Высокий уровень шумов и вибраций;
- Плохое использование стали;
- Значительные отходы при штамповке.

Таким образом становится понятно, что вентильно-индукторная машина способна функционировать в режиме генератора. Использование вентильно-индукторных генераторов позволяет получить высокие регулировочные и энергетические показатели и дает возможность проектировать сложные модульные системы с минимальным количеством соединений и установкой интеллектуальных систем управления либо непосредственно в оборудование, либо рядом с ним. Для обеспечения требуемых выходных показателей необходимо производить регулировку напряжения возбуждения. Так же для реализации данного режима необходимо выбирать электронные ключи из



расчета, что частота коммутации, в зависимости от точности регулирования, может в сотни раз превосходить частоту коммутации фаз.

### **Библиографический список:**

1. Kumar A., Sanjay M., Anumpa M. Comparison of Methods of Minimization of Cogging Torque in Wind Generators Using FE Analysis, Indian Inst, Sci, 2006, pages 355-362.

2. Николаев В.В. Рыбников В.А., Разработка интегрированного стартер-генератора на основе вентильно-индукторной машины, стр 2.

3. H. Chen, Implementation of a Three-phase Switched Reluctance Generator System for Wind Power Applications, 14<sup>th</sup> Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Victoria, 2008, page 1-6.