

Управление возбуждением сегментных генераторов ветроэнергетических установок изменением воздушного зазора

ЛИТВИНЕНКО А.М., КИРИЛОВ А.Б.

Математически обосновывается и экспериментально подтверждается возможность регулирования возбуждения синхронных генераторов в сегментном исполнении путем преднамеренного изменения воздушного зазора отдельных модулей активного сегмента. Обосновывается введение ранее неизвестного канала регулирования синхронных машин с постоянными магнитами, что придает системе управления адаптивные свойства, обеспечивает автоматизированное управление. Это достигается расчетом поля в зоне рабочего воздушного зазора, что позволяет найти аналитические зависимости, подтверждаемые экспериментом на макете. В частности, приведены кривые, характеризующие найденные зависимости, подтверждающие исходные теоретические положения. В результате исследования фактически доказывается возможность введения дополнительного воздействия на данный объект, что дает синергетический эффект: с одной стороны, появляется возможность при небольшой скорости ветра уменьшить противодействующий момент на ветроколесо при постоянной нагрузке низкого уровня, с другой стороны, при интенсивном ветре существенно повышается энергоотдача агрегата. Приведена структурная схема системы управления, построенная на принципах экстремального управления. В качестве экстремальной (оптимальной) выступают либо угловая характеристика синхронного генератора, либо U-образная. В первом случае система с помощью сигнум-реле и коммутатора будет управлять исполнительным механизмом, регулирующим зазор в заранее установленных пределах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ветроэнергетическая установка, возбуждение сегментных генераторов, воздушный зазор, управление, роторные элементы, статорные элементы

Резко меняющиеся скорость ветра, с одной стороны, и колебания нагрузки, с другой, предъявляют повышенные требования к регулировочным характеристикам. Выполнение этих требований осложняется (особенно в отношении маломощных ВЭУ) тем обстоятельством, что возбуждение таких ВЭУ обычно происходит с помощью постоянных магнитов (ПМ), регулирование потока которых затруднительно. Таким образом, общая классификация видов регулирования ВЭУ (исключая аэродинамическое, рассмотренное, например, в [1]) сводится к следующим:

обычное регулирование возбуждения (классические синхронные генераторы) или бесконтактное регулирование (индукторные генераторы); при этом весьма специфическим является ввод возбуждения;

секционное регулирование катушек статора как в тангенциальном, так и в радиальном (торцевое исполнение) направлениях;

регулирование воздушного зазора, при котором можно различать осевое регулирование [2] и радиальное, а также их комбинации.

Последнему виду регулирования и посвящена настоящая работа. В общем, данное регулирование является альтернативой известным способам регу-

лирования потока постоянного магнита. К их числу, собственно, относятся только два: дополнительная обмотка; схемные решения, связанные с преобразовательной техникой, подключением конденсаторных батарей и т. п. Однако такое регулирование предпочтительно для специального исполнения ВЭУ, в частности, сегментного. Особенно это актуально для ВЭУ с горизонтальной осью, для ВЭУ с вертикальной осью допустимо осевое регулирование.

Весьма специфическим является регулирование моделей ВЭУ; естественно, это относится только к многомодульным системам. В качестве примера можно привести одинарные модули или линейки однотипных модулей. Виды регулирования представлены на схеме рис. 1.

Задачей, решаемой в данной статье, является аналитическая оценка измерения интенсивности поля при перемещении сегмента статора в соответствии с конструктивной схемой [3], показанной на рис. 2, а также расчетной схемой (рис. 3).

Задача по оценке изменения поля при непрямолинейном зазоре может быть решена с использованием метода Л.В. Канторовича [4], при этом можно воспользоваться половиной решения на периоде — см. рис. 4, 5 и 6.

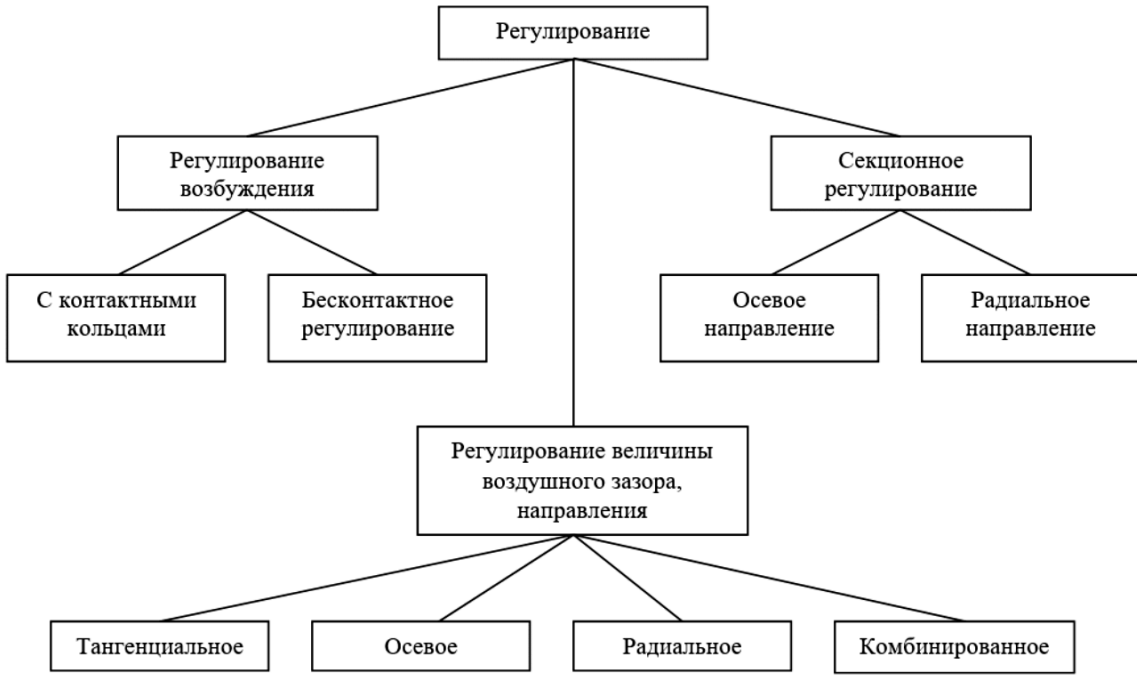


Рис. 1. Виды регулирования сегментных генераторов ВЭУ

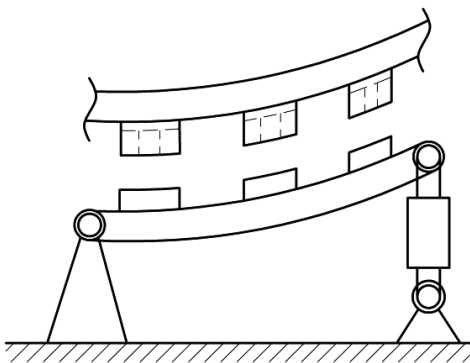


Рис. 2. Конструктивная схема регулирующего устройства

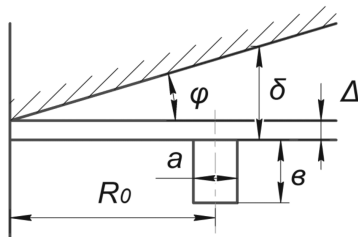


Рис. 3. Расчетная схема

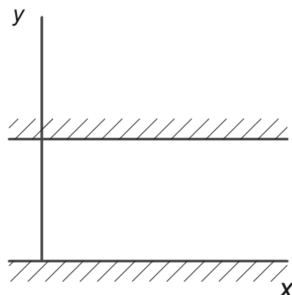


Рис. 4. Прямолинейные границы

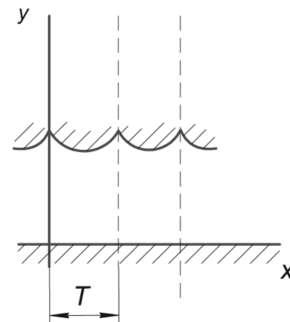


Рис. 5. Некоординатные границы

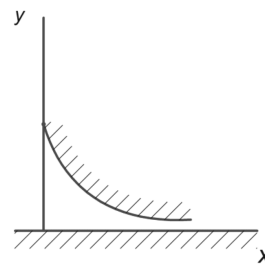


Рис. 6. Расчетный случай

Пусть сечение зазора ограничено снизу прямой, а сверху линией $y = \varphi(x)$, при этом принимаем относительную магнитную проницаемость $\mu = \infty$. Как обычно, на плоской стороне зададим потенциал $V_m = f(x)$ или токовую нагрузку $A = F(x)$, а на другой стороне $-V_m = 0$ или $\frac{dV_m}{d\tau} = 0$, где τ — полюсное деление.

Известно [5, 6], что для гармоник потенциала решение в области с координатными границами имеет вид:

$$V_m = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{\operatorname{sh}\left[\frac{\pi n}{\tau}(\delta - y)\right]}{\operatorname{sh}\left[\frac{\pi n}{\tau}\delta\right]} \sin\left[\frac{\pi n}{\tau}(x)\right],$$

где δ — ширина зазора; n — номер члена разложения; C_n — коэффициент разложения.

В первом приближении выбираем функцию $H(x, y)$ в соответствии с граничными условиями:

$$V_{mn} = H(x, y) f_n(x).$$

Примем $\nabla = \operatorname{sh}(R_n(\varphi - y))$ и найдем значение $f_n(x)$, такое, чтобы $\nabla^2 V_m = 0$ на границе $y=0$, где φ — угол поворота сегмента.

При этом

$$V_{mn} = C_n \operatorname{sh}[R_n(\varphi - y)] f_n(x),$$

где R_n — координаты зубца;

$$\frac{dV_{mn}}{dy} = -R_n C_n \operatorname{ch}[R_n(\varphi - y)] f_n(x);$$

$$\frac{d^2 V_{mn}}{dy^2} = -R_n^2 C_n \operatorname{sh}[R_n(\varphi - y)] f_n(x);$$

$$\frac{dV_{mn}}{dx} = C_n \{R_n \varphi' \operatorname{ch}[R_n(\varphi - y)] f_n(x) + \operatorname{sh}[R_n(\varphi - y)] f_n'(x)\};$$

$$\frac{d^2 V_{mn}}{dx^2} = C_n \{R_n \varphi'' \operatorname{ch}[R_n(\varphi - y)] f_n(x) +$$

$$+ R_n^2 \varphi'^2 \operatorname{sh}[R_n(\varphi - y)] f_n(x) + 2 R_n \varphi' \operatorname{ch}[R_n(\varphi - y)] f_n'(x) + \operatorname{sh}[R_n(\varphi - y)] f_n''(x)\}.$$

Тогда выражение $\nabla^2 V_m = 0$ представим в виде:

$$f_n''(x) \operatorname{ch}[R_n(\varphi - y)] + 2 R_n \varphi' \operatorname{ch}[R_n(\varphi - y)] f_n'(x) + R_n \varphi'' \operatorname{ch}[R_n(\varphi - y)] + R_n^2 \varphi'^2 \operatorname{sh}[R_n(\varphi - y)] f_n(x) = 0.$$

При $y=0$, разделив на $\operatorname{sh}(R_n \varphi) \neq 0$, получим:

$$f_n'' + 2 R_n \varphi' \frac{\operatorname{ch}(R_n \varphi')}{\operatorname{sh}(R_n \varphi)} f_n' + \left[R_n^2 + R_n^2 \varphi'^2 + R_n \varphi'' \frac{\operatorname{ch}(R_n \varphi)}{\operatorname{sh}(R_n \varphi)} \right] f_n = 0.$$

Подставляя

$$f_n(x) = \psi_x(x) \exp\left(\int_0^x p dx\right),$$

$$\text{где } p = R_n \varphi' \frac{\operatorname{ch}(R_n \varphi)}{\operatorname{sh}(R_n \varphi)},$$

получаем уравнение

$$\psi_n'' = [-p^1 - p^2 + q] \psi_n = 0,$$

где q — коэффициент при f_n , а именно:

$$q = R_n^2 + R_n^2 \varphi'^2 + R_n \varphi'' \frac{\operatorname{ch}(R_n \varphi)}{\operatorname{sh}(R_n \varphi)}.$$

Преобразуем уравнения для ψ_n :

$$-p^1 - p^2 = R_n^2 \varphi'^2 - R_n \varphi'' \frac{\operatorname{ch}(R_n \varphi)}{\operatorname{sh}(R_n \varphi)};$$

$$-p^1 - p^2 = R_n^2$$

и далее

$$\psi_n'' + R_n^2 \varphi_n = 0.$$

Данное уравнение имеет решение

$$\psi_n = \cos(R_n x),$$

т.е.

$$f_n(x) = \cos(R_n x) \exp\left(-\int_{\phi_0}^{\phi} \frac{d \operatorname{ch}(R_n \phi)}{\operatorname{sh}(R_n \phi)}\right) = \frac{\operatorname{sh}(R_n \phi_0)}{\operatorname{sh}(R_n \phi)} \cos(R_n x).$$

Выражение для потенциала

$$V_{mn} = C_n \operatorname{sh}(R_n \phi_0) \frac{\operatorname{sh}[R_n(\phi - y)]}{\operatorname{sh}(R_n \phi)} \cos(R_n x).$$

При этом, если на $y=0$ задан потенциал

$$V_{mn} \Big|_{y=0} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn0} \cos(R_n x),$$

то

$$C_n = \frac{V_{mn0}}{\operatorname{sh}(R_n \phi_0)}$$

и в итоге получаем

$$V_{mn} = V_{mn0} \frac{\operatorname{sh}[R_n(\phi - y)]}{\operatorname{sh}(R_n \phi)} \cos(R_n x).$$

Для доказательства вышеизложенного были поставлены эксперименты на макете магнитной системы осевого типа: длина сегмента ротора 135 мм, радиус ротора 500 мм, длина зубца (паза) 15 мм, высота зубца (глубина паза) 8 мм, спинка 12 мм. Толщина каждого из двух наборов 5 мм, размеры постоянных магнитов, размещенных между набо-

рами, $8 \times 6 \times 17$ мм. Соответствующий статор набран из магнитопроводов и рабочих катушек реле клапанного типа в количестве 3 шт. Размеры магнитопровода $37 \times 38 \times 55$ мм, диаметр полюсного наконечника катушки 16 мм, его высота 37 мм, диапазон изменения зазора $3 \div 6$ мм. Размеры датчика Холла из германия с удельным сопротивлением $\rho = 1,4$ Омсм составляли $1 \times 2 \times 9$ мм.

Перед экспериментом проводилась тарировка; датчик был наклеен на подложку из стеклотекстолита толщиной 0,8 мм, шириной 12 мм и длиной 160 мм. Результаты эксперимента приведены на рис. 7.

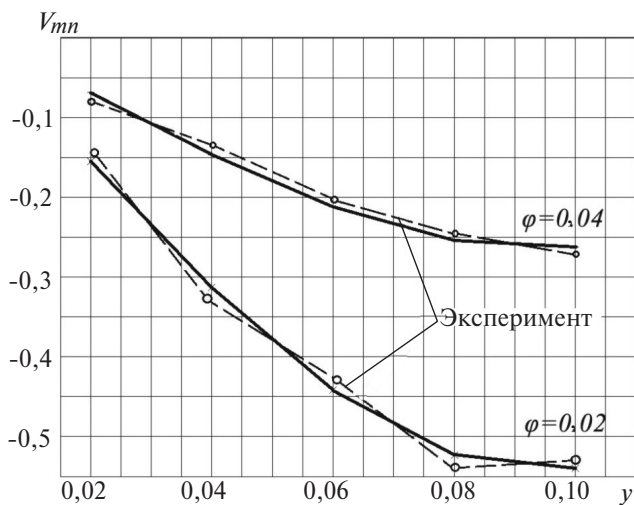


Рис. 7. Результаты расчета и эксперимента

С точки зрения теории управления данный объект является однопараметрическим, к нему можно применить принципы экстремального управления, например, с помощью коммутации поворочных реверсов с запоминанием экстремума.

Таким образом, регулирование описанным в статье способом интенсивности поля синхронных генераторов открывает возможность построения адаптивной системы управления генератором ветроэлектрической станции малой мощности, осуществляющей адаптацию как к режимам нагрузки, так и к изменениям частоты вращения вследствие внешних факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвиненко А.М. Защита интеллектуальной собственности (патентная чистота), в 5-и частях, 4.1. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2013, с. 104 – 106.
2. Патент (РФ) № 2204734. Статор ветроэлектродгенератора/А.М. Литвиненко, БИ, 2003, № 14.
3. Патент (РФ) № 2571996. Статор сегментного генератора/А.М. Литвиненко БИ, 2015, № 36.
4. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983, 25 с.
5. Гольдберг О.Д. Электромеханика: Учебник для вузов. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007, 512 с.
6. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – Киев: Наукова думка, 1979, 208 с.

[27.06.2017]

А в т о р ы: Литвиненко Александр Михайлович окончил электротехнический факультет Воронежского политехнического института (ВПИ) в 1973 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Исследование орбитальных электромеханических систем». Профессор Воронежского государственного технического университета (ВГТУ).

Кирилов Андрей Бориславович окончил факультет энергетики и систем управления Воронежского государственного технического университета (ВГТУ) в 2014 г. Аспирант ВГТУ.

Excitation Control of Segmented Windmill Generators by Adjusting the Air Gap

LITVINENKO Aleksandr M. (Voronezh State Technical University – VSTU, Voronezh, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KIRILOV Andrei B. (VSTU, Voronezh, Russia) – Ph.D. Student

The possibility of controlling the excitation of segmented synchronous generators by deliberately changing the air gap of individual modules in the active segment is substantiated mathematically and confirmed by experiment. Introduction of a previously unknown channel for control of permanent magnet synchronous machines, the use of which imparts adaptive properties to the control system and opens the possibility to perform automated control, is substantiated. This is achieved through calculating the field in the working air gap zone, as a result of which it becomes possible to find the analytical correlations confirmed by experiment on a mockup. In particular, curves characterizing the found correlations that confirm the initial theoretical statements are given. The study results firmly prove the possibility of introducing an additional action on the controlled facility, which yields a synergetic effect: on the one

hand, during operation at a moderate wind velocity it becomes possible to decrease the counter torque applied to the wind wheel at constant low-level load, and on the other hand, during operation at strong wind, a significantly higher power output is obtained from the windmill. The control system structural diagram developed proceeding from the extreme control principles is presented. Either the angular or U-shaped synchronous generator characteristic is used as the extreme (optimal) one. In the first case, the system will control the gap adjustment mechanism in the preset limits using a signum relay and a switching device.

Key words: windmill, excitation of segmented generators, air gap, control, rotor elements, stator elements

REFERENCES

1. **Litvinenko A.M.** *Zashchita intellektual'noi sobstvennosti (patentnaya chistota) v 5-i chastyakh. Ч. 1.* (Defence of intellectual property (patent cleanness) is in 5th parts. Ч.1). Voronezh, Voronezh State Technical University, 2013, pp. 104–106.

2. **Patent RF No. 2204734.** *Stator vetroelektrogeneratora* (The stator of wind power generator) / A.A. Litvinenko. Bulletin of inventions, 2003, No. 14.

3. **Patent RF No. 2571996.** *Stator segmentnogo generatora* (The stator of the segment generator)/A.A. Linvinenko. Bulletin of inventions, 2015, No. 36.

4. **Dombrovskii V.V.** *Spravochnoye posobiye po raschetu elektromagnitnogo polya v elektricheskikh mashinakh* (Reference guide for the calculation of the electromagnetic field in electric machines). Leningrad, Energoatomizdat, 1983, 25 p.

5. **Gol'dberg O.D.** *Elektromekhanika: Uchebnik dlya vuzov* (Electromechanics. Textbook for Higher education institutions). Moscow, Centre «Akademiya», 2007, 512 p.

6. **Fil'ts R.V.** *Matematicheskiye osnovy teorii elektrotekhnicheskikh preobrazovatelei* (Mathematical foundations of the theory of electrotechnical transducers). Kiev, Publ. «Naukova dumka», 1979, 208 p.

[27.06.2017]

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи и в подписных агентствах.

Полные тексты статей в формате .pdf размещены на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в конце каждого месяца).

Адрес для переписки: 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14, «НИУ «МЭИ», редакция журнала «Электричество»

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: etr1880@mail.ru