

УДК 621.31

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОМ С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Д.Л. Калужский¹, А.Д. Мехтиев², А.С. Харитонов¹, Н.А. Уваров¹,

¹Новосибирский государственный технический университет

²Карагандинский государственный технический университет

В представленной статье рассматривается адаптивная система управления генератором с комбинированным возбуждением, используемым в ветряной установке. Проанализированы условия функционирования электрической машины, способной работать и как двигатель (в стартерном режиме), и как генератор. Авторами получены уравнения индуктивных параметров, электрического равновесия и момента; разработана функциональная схема, обеспечивающая запуск ветроустановки и стабильное выходное напряжение при варьировании скорости вращения и уровня нагрузки.

Ключевые слова: ветроустановка, многополюсный генератор с комбинированным возбуждением, адаптивная система управления.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-16-26

Введение

Известно, что существующие системы генерирования электроэнергии с помощью ветроустановок, как правило, используют в качестве генераторов электрические машины с магнитоэлектрическим возбуждением. Такие объекты имеют немало достоинств. Во-первых, они ориентированы на применение серийных изделий, а значит, их стоимость минимальна. Во-вторых, использование постоянных магнитов обеспечивает отсутствие тепловых потерь на возбуждение и, как следствие, такой генератор характеризуется высоким уровнем КПД, малой массой и габаритами. Наконец, в-третьих, влияние человека на работу ветроустановки сведено к минимуму; включение в рабочий режим (при минимально допустимой скорости ветра) и выключение (при превышении скорости ветра максимально допустимого значения) происходят автоматически.

К недостаткам подобных систем относятся следующие.

1. Наличие «паразитного» момента при обесточенной якорной обмотке, обусловленной магнитной асимметрией машины, появляющейся вследствие целого ряда технологических факторов: неравномерности воздушного зазора; отклонениями от расчетных значений параметров зубцово-пазовой зоны; различными характеристиками постоянных магнитов и т. д. Согласно ряду источников, например [1, 2], величина «паразитного» момента может превышать 30 % от номинального значения, что вынуждает разработчиков ограничивать работу ветроустановок, начиная с некой минимальной скорости ветра.

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования МОН РК 2018–2020 гг. «Микротепловая электростанция когенерационного типа с рекуперацией тепла» (№ AP05131751) договор № 198 от 16.03.2018.

2. ЭДС в генераторе с магнитоэлектрическим возбуждением (МЭГ) определяется частотой вращения вала. Реальная скорость ветра, используемая для получения электроэнергии, может находиться в диапазоне от 3–4 до 20–25 м/с. Учитывая, что срок службы аккумуляторов в значительной мере зависит от того, насколько ток заряда отличается от паспортного значения, разработчики вынуждены либо ограничивать рабочий диапазон скоростей, либо использовать дорогостоящую преобразовательную технику, чтобы стабилизировать выходное напряжение [3].

3. Чтобы обеспечить возможность заряда при минимальной скорости ветра и максимальной нагрузке, разработчики вынуждены проектировать генераторы таким образом, чтобы выпрямленное напряжение в них превышало напряжение аккумулятора. Практически во всех остальных режимах работы генератор вырабатывает напряжение большее по величине, чем требуется. Поэтому для качественного электроснабжения потребителя меры, представленные в п. 2, просто необходимы.

1. Постановка задачи

Для устранения вышеперечисленных недостатков было предложено техническое решение, суть которого состоит в следующем. В качестве генератора и стартера взята синхронная многополюсная машина с комбинированным возбуждением и дискретно-распределенной обмоткой на статоре [4, 5]. Ее основными достоинствами являются следующие.

Многополюсное исполнение, а значит, даже на низких частотах она создает ЭДС высокой частоты и имеет неплохие энергетические характеристики.

В генераторе опорный поток (60–85 % от максимального значения) создается за счет постоянных магнитов. Поэтому потери на возбуждение невелики и даже в том случае, когда диапазон регулирования ЭДС достигает трех относительных единиц, потери в контуре возбуждения не превышают 25–30 % от всех тепловых потерь в машине.

Генератор способен обеспечить варьирование ЭДС в диапазоне 3–4 относительных единиц и значительно расширяет область применения ветроустановки.

Другой особенностью принимаемого технического решения является использование адаптивной системы управления генератором, способной поддерживать стабильное выходное напряжение за счет изменения тока возбуждения и осуществлять стартерный пуск при минимально возможной скорости ветра.

2. Теория

Для повышения точности расчетов и упрощения вывода конечных уравнений авторы воспользовались модифицированными функциями Радемахера и «пилообразными» функциями [6, 7], представленными на рис. 1 для нахождения МДС 1 и семи катушек, в случае, когда $m = 3$, $s = 3$, $p_1 = 2$.

Представляя МДС фаз в виде произведения временных и пространственных (т. е. функций Радемахера) составляющих и пренебрегая вытеснением магнитного потока от обмотки возбуждения в паз [7], вычислим энергию поля в зазоре [8].

Выполнив необходимые операции и вынося константы, получим несколько интегральных выражений, представляющих собой «пилообразные» функции:

$$W_{эм}^{sr} = \frac{\mu_0 D_a L_a}{16 \delta k_\delta} N_1 F_k^s(t) \cdot \overline{I_s^T} \times \overline{A^{sr}} \times \overline{I_r} \cdot F_r.$$

Здесь D_a , L_a – внутренний диаметр и длина статора; δk_δ – приведенный воздушный зазор; $F_k^s(t)$ – временная составляющая МДС фазы; $N_1 = p_1 / p_2$ – коэффициент; $\overline{I_s} = \text{colon}\{1, 1, \dots, 1\}$; $\overline{I_r}$ – столбцевые матрицы.

$$A^{sr} = \begin{array}{|c|c|} \hline pL(0, p_2) & pL(-\bar{b}_n, p_2) \\ \hline -pL(\beta, p_2) & -pL(\beta - \bar{b}_n, p_2) \\ \hline -pL(\beta, p_2) & -pL(\beta - \bar{b}_n, p_2) \\ \hline pL(2\beta, p_2) & pL(2\beta - \bar{b}_n, p_2) \\ \hline pL(2\beta, p_2) & pL(2\beta - \bar{b}_n, p_2) \\ \hline -pL(3\beta, p_2) & -pL(3\beta - \bar{b}_n, p_2) \\ \hline \end{array}$$

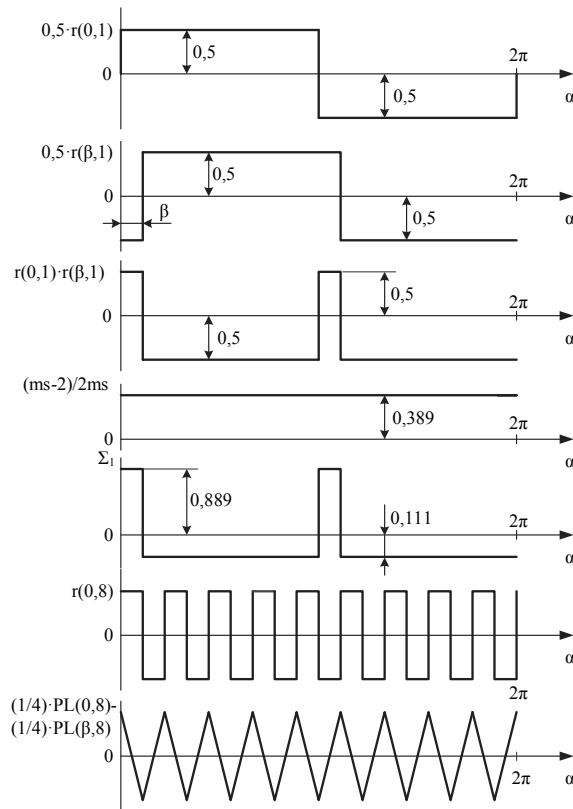


Рис. 1 – Модифицированные функции Радемахера и «пилообразные» функции

p_1 – число фазных зон; s – число согласно включенных катушек в фазной зоне; m – число фаз; α – угол вдоль внутренней поверхности статора; $p = p_1/2 = 1$ – число периодов изменения функции Радемахера; θ – угловое положение ротора; β – начальная фаза

Fig. 1 – Modified Rademacher functions and “sawtooth” functions:

p_1 – the number of phase zones; s – the number according to the included coils in the phase zone; m – number of phases; α – angle along the inner surface of the stator; $p = p_1/2 = 1$ – the number of periods of change of the Rademacher function; θ – the angular position of the rotor; β – initial phase

Суммирование «пилообразных» функций с учетом их начальных фаз происходит аналогично сложению пространственных МДС отдельных катушек в распределенных обмотках, в результате чего в уравнениях индуктивностей появляются коэффициенты укорочения и распределения. В рассматриваемом случае взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и k -й фазой трехфазной обмотки будет равна

$$L_{kv}^{sr}(\theta) = \frac{16 \cdot D_a L_a \mu_0 w_k s k_{pv} k_{\beta v} w_b}{\pi v^2 \delta_1 k_\delta (ms \pm 1)} \times \cos v \left[p_2 \theta + \frac{m-1}{m} \pi(k-1) \right], \quad (1)$$

где v – порядковый номер гармоники;

$$k_{\beta v} = \cos\left(\frac{v\pi}{2ms}\right) \cos\left(\frac{v\pi b_2}{2\tau}\right);$$

$$k_{pv} = \frac{\sin\left(\frac{v\pi}{2m}\right)}{s \cdot \sin\left(\frac{v\pi}{2ms}\right)}.$$

В свою очередь, потокосцепление, обусловленное наличием на роторе магнитов и наводящее ЭДС в k -й фазе, будет равно

$$\Psi_{kv}^{sr}(\theta) = \frac{16 D_a L_a w_k s k_{pv} k_{\beta v} B_0}{\pi v^2 \delta_1 k_\delta (ms \pm 1)} \times \cos v \left[p_2 \theta + \frac{m-1}{m} \pi(k-1) \right]. \quad (2)$$

Здесь B_0 – амплитуда магнитной индукции, созданной магнитами; знак «плюс» в (1), (2) ставится в том случае, когда $2p_2 > ms p_1$.

Записав уравнения напряжений для прямой и обратной последовательности в осях, синхронно вращающихся с угловой частотой ω , а затем выполнив преобразования к осям d , q , 0 , получим выражения напряжений:

$$u_d = p \frac{\sqrt{m}}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) + (r^s + pL^s) i_d - \omega L^s i_q,$$

$$u_q = \omega \frac{\sqrt{m}}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) + (r^s + pL^s) i_q + \omega L^s i_d$$

и, пренебрегая потокосцеплением по оси q , получим уравнение момента

$$M = p_2 \frac{m}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) i_q.$$

Полученные уравнения позволяют в линейной постановке задачи проводить инженерные расчеты и сравнивать различные типы электрических машин с единых позиций.

Ниже на рис. 2 представлена структурная схема с микропроцессорной системой управления (МПСУ) силовой части для прохождения «мертвой» зоны при пуске ветроустановки и для регулирования величины ЭДС при варьировании частоты вращения и нагрузки.

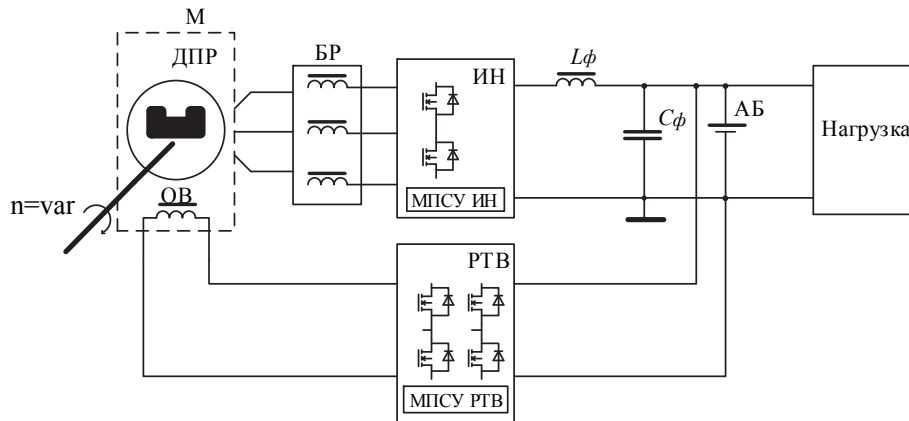


Рис. 2 – Структурная схема с микропроцессорной системой управления (МПСУ):

М – ветроустановка; ДПР – датчик положения ротора двигателя; ОВ – обмотка возбуждения двигателя; БР – блок реакторов; ИН – инвертор напряжения; МПСУ ИН – микропроцессорная система управления ИН; РТВ – регулятор тока возбуждения; МПСУ РТВ – микропроцессорная система управления РТВ; $L\phi$ и $C\phi$ – индуктивность и емкость выходного LC фильтра; АБ – аккумуляторная батарея

Fig. 2 – Block diagram with microprocessor control system (MPSU):

М – wind turbine; DPR – engine rotor position sensor; OV – motor field winding; BR – reactor block; IN – voltage inverter; MPSU IN – microprocessor control system IN; RTV – excitation current regulator; MPSU RTV – microprocessor control system RTV; $L\phi$ and $C\phi$ – inductance and capacitance of the output LC filter; AB – rechargeable battery

Система управления работает в двух режимах, а именно в режиме электростартерного запуска и в режиме генерирования. В режиме электростартерного запуска обеспечивается двигательный режим работы, управление и электропитание осуществляются с помощью инвертора напряжения и аккумуляторной батареи. Регулирование тока возбуждения осуществляется с заданием на ток возбуждения равным нулю.

После перехода электрической машины в режим генерирования инвертор напряжения работает как активный выпрямитель (АВ), осуществляя по определенному закону преобразование переменного напряжения в постоянное, с последующей передачей его в нагрузку. АВ представляет собой инвертор напряжения, работающий в обратном режиме, может быть выполнен на IGBT или MOSFET модулях в зависимости от требований принадлежности комплектующих. Силовой LC-фильтр служит для обеспечения заданного уровня пульсаций в выходном напряжении в режиме генерирования, а также для частичного шунтирования аккумуляторной батареи в режиме электростартерного запуска. РТВ выполнена на базе однофазного транзисторного реверсивного преобразователя с широтно-импульсным регулированием. Необходимость такой реализации вызвана требованием реверса тока возбуждения. Любая другая схемная реализация РТВ потребует установки дополнительных индуктивностей и конденсаторов. АВ в режиме генерирования штатно работает как обычный неуправляемый выпрямитель за счет «обратных» диодов.

МПСУ осуществляет управление, защиту, встроенный автоматический контроль, а также, при необходимости, связь с системами управления верхнего уровня.

Система автоматического регулирования (САР) выходного напряжения реализуется посредством управления током возбуждения электрической машины. В контур регулирования входит обмотка возбуждения и собственно электрическая машина с выпрямителем и силовым фильтром.

При синтезе структуры САР была принята система подчиненного регулирования с последовательной коррекцией, что обосновывалось следующими достоинствами подобного рода систем:

- возможностью достижения оптимальных показателей качества переходных процессов;
- отлаженной методикой настройки регуляторов;
- возможность ограничения регулируемых величин.

Свойство подобного рода систем обеспечивать переходные процессы с малым перерегулированием и относительно высоким быстродействием является важным для рассматриваемого применения, так как нагрузка в данном случае является весьма динамичной.

Структурная схема САР выходного напряжения электрической машины приведена на рис. 3.

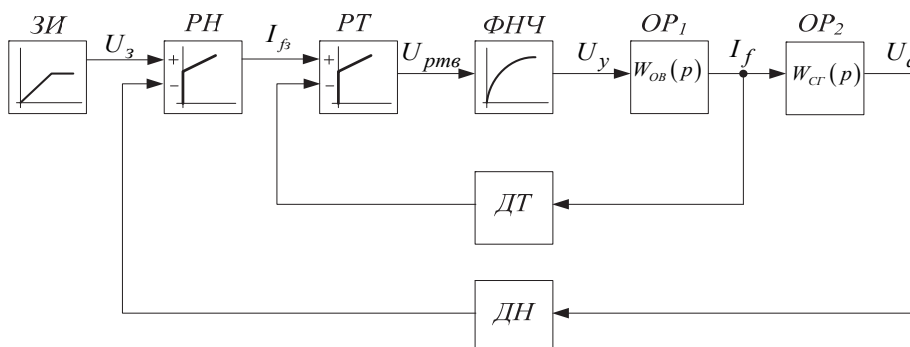


Рис. 3 – Структурная схема САР выходного напряжения электрической машины:

ZI – задатчик интенсивности, ограничивает скорость нарастания задающей величины; RN, RT – регуляторы напряжения и тока, реализуют пропорционально-интегральный (ПИ) закон управления; ФНЧ – фильтр нижних частот, определяет полосу пропускания САР; ОП1, ОП2 – объекты регулирования, первый из них представляет мостовой транзисторный преобразователь с обмоткой возбуждения, второй – электрическую машину с выпрямителем и силовым фильтром; ДТ – датчик тока возбуждения; ДН – датчик выходного напряжения

Fig. 3 – Block diagram of the ATS of the output voltage of an electric machine:

ZI – intensity adjuster, limits the slew rate of the set value; RN, RT – voltage and current regulators, realize the proportional-integral (PI) control law; Low-pass filter – low-pass filter, determines the bandwidth of the ATS; OP1, OP2 – objects of regulation, the first of them is a bridge transistor converter with an excitation winding, the second is an electric machine with a rectifier and a power filter; DT – field current sensor; DN – output voltage sensor

Как следует из рис. 3, САР является двухконтурной, при этом внутренний контур обеспечивает регулирование тока возбуждения, а внешний контур – регулирование выходного напряжения.

Для первого объекта регулирования (ОП1), в который входят мостовой транзисторный преобразователь с обмоткой возбуждения электрической машины, передаточная функция апериодического звена первого порядка достаточно точно опи-

сывает поведение объекта. Для внешнего контура с объектом регулирования, включающим электрическую машину с выпрямителем и силовым фильтром, описание ОР такой передаточной функцией является в известном роде упрощением, так как электрическая машина является сложным нелинейным объектом. В расчет берется только свойство управляемого по цепи ОВ и последовательно соединенного с ним неуправляемого выпрямителя (НВ). НВ необходим для преобразования, с определенными коэффициентом и постоянной времени, трехфазного напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока.

Для каждого контура регулятор конструируется по одной и той же стандартной методике. Передаточная функция регулятора

$$R(p) = Kp + \frac{1}{Tr \cdot p},$$

где Kp – коэффициент усиления регулятора; Tr – постоянная времени регулятора, равные соответственно:

$$Kp = T / Ti ;$$

$$Tr = Ti / \lambda ,$$

где T и λ – параметры передаточной функции ОР; Ti – постоянная интегрирования, определяемая из условия настройки регулятора на модульный оптимум:

$$Ti = k \cdot T\mu ,$$

где k – коэффициент, равный 2 для первого контура регулирования, для каждого следующего контура коэффициент умножается на два; $T\mu$ – базовая некомпенсированная постоянная времени САР. Данный параметр определяет полосу пропускания системы и выбирается исходя из необходимого быстродействия САР и скорости протекания регулируемых в контурах процессов. При настройке САР на модульный оптимум необходимо помнить, что быстродействие каждого внешнего контура уменьшается вдвое в сравнении с его внутренним контуром регулирования.

Для ввода базовой постоянной времени на выходе управляющей части САР ставится фильтр нижних частот (ФНЧ), с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{1}{T\mu p + \lambda} .$$

Таким образом, мы конструируем САР с желаемой степенью инерционности и соответствующей полосой пропускания.

Поскольку электрическая машина имеет смешанный тип возбуждения, то часть потока возбуждения в ней создается постоянными магнитами, остальная часть – током возбуждения. Соотношение составляет примерно 70 и 30 % соответственно. Регулирование величины выходного напряжения, отдаваемого в нагрузку, может осуществляться как АВ, так и током возбуждения. В том случае, если РТВ будет не хватать диапазона регулирования, АВ может его дополнить. Наиболее оптимальным регулирование величины выходного напряжения становится при совместном управлении АВ и РТВ.

К достоинствам выбранной схемы управления следует отнести:

- относительно небольшое количество силовых элементов;

- относительно небольшое количество дискретных элементов в МПСУ (малое количество драйверов силовых ключей).

Недостатком выбранной схемы является то, что силовые ключи должны выбираться на максимальный ток режима электростартерного запуска и поэтому могут иметь большую массу и габариты.

3. Результаты

По результатам исследований спроектирован и изготовлен многополюсный генератор, технические параметры которого представлены ниже.

Технические параметры электрической машины
Technical parameters of an electric machine

Полезная мощность, Вт	1800
Максимальная частота вращения, об/мин	1500
Минимальная частота вращения, об/мин	500
Максимальный момент по S1, Нм	12
Ток номинальный, не более, А	52
Напряжение в звене постоянного тока, В	36
Число фаз	3
Число пар полюсов	8
Электрические потери в обмотке статора, Вт	165
Электрические потери в обмотке возбуждения, Вт	32
Потери в стали статора, не более, Вт	44

4. Обсуждение результатов

Проанализируем полученные результаты.

Метод расчета синхронных электрических машин с использованием «пилообразных» функций и модифицированных функций Радемахера позволяет в аналитическом виде и с высокой точностью записать уравнения электрического равновесия, момента и мощности.

Имея высокий КПД, малую массу и габариты, сопоставимые с аналогичными параметрами магнитоэлектрических генераторов с высококоэрцитивными магнитами на роторе, предложенная электрическая машина способна обеспечить стабильное выходное напряжение в широком диапазоне частот вращения при варьировании нагрузки. Последняя особенность более характерна для генераторов с обмотками возбуждения на роторе, но они, как показано выше, имеют значительно больший уровень тепловых потерь и низкий КПД.

Разработанная адаптивная система управления возбуждением генератора способна самостоятельно осуществить стартерный пуск при малой ветровой нагрузке и за счет увеличения магнитного потока поддерживать стабильное напряжение даже при номинальной нагрузке.

Адаптивная система содержит минимальное число силовых элементов и небольшое число драйверов силовых ключей, что существенно снижает ее массу, габариты и, самое главное, стоимость. А поскольку отличие предложенного генератора от существующих промышленных образцов МЭГ состоит только в наличии кольцевой обмотки возбуждения на статоре, общая себестоимость изделия не увеличится, а само оно будет конкурентоспособным в ветроэнергетике.

Заключение

В статье приведены теоретические исследования, ставящие своей целью получение уравнений специального многополюсного генератора с комбинированным возбуждением, работающего в автономной системе электроснабжения. В качестве двигателя в системе используется ветроустановка. Для запуска ветроустановки при малой ветровой нагрузке и преодоления «мертвой зоны» разработана структурная схема с микропроцессорной системой управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веселовский О.Н., Калужский Д.Л.** Индукторные машины с дискретно-распределенными обмотками // Электротехнические системы транспортных средств и их роботизированных производств: научно-техническая конференция с международным участием. – М.: Суздаль, 1995. – С. 7–8.
2. **Веселовский О.Н., Калужский Д.Л.** Синхронный редукторный двигатель // Fourth International conference on unconventional electromechanical and electrical systems: proceedings. – Szczecin: Techn. univ. press, 1999.
3. **Taran A.V., Frantsuzova G.A., Kharitonov S.A.** Control system of electric power steering // Proceedings of the IASTED International Conference “Automation, Control, and Information Technology”, Novosibirsk, Russia, June 10–13, 2002. – Novosibirsk, 2002. – P. 121–124.
4. Патент 107418 Российская Федерация. Индукторная машина переменного тока комбинированного возбуждения / Д.В. Левин, Э.Я. Лившиц, М.М. Юхнин. – № 2010146046/07; заявл. 12.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
5. **Калужский Д.Л., Мехтиев А.Д., Югай В.В.** Электрическая машина с комбинированным возбуждением. Заявление о выдаче патента Республики Казахстан на изобретение № 2018/0906.1.
6. **Веселовский О.Н., Калужский Д.Л.** Уравнения электрического равновесия и момента синхронных и асинхронных двигателей с дискретно-распределенными обмотками // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 31–36.
7. **Калужский Д.Л.** Электрические машины с дискретно-распределенными обмотками для низкоскоростных электроприводов // Электротехника. – 1997. – № 9. – С. 10–13.

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF A GENERATOR WITH A COMBINED EXCITATION IN WIND POWER

D.L. Kaluzhskii¹, A.D. Mekhtiyev², A.S. Kharitonov¹, N.A. Uvarov¹

¹ *Novosibirsk State Technical University/Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk, Russia*

² *Karaganda State Technical University/Department of Electronics and Electrical Engineering, Karaganda, Kazakhstan*

This article discusses the adaptive control system of a generator with a combined excitation used in a wind farm. The conditions for the functioning of an electric machine capable of operating as an engine (in starter mode) and as a generator are analyzed. The authors obtained the equations of inductive parameters, electrical equilibrium and moment; A functional circuit has been developed to ensure the launch of a wind turbine and a stable output voltage with varying rotational speed and load level.

Keywords: wind turbine, multi-pole generator with combined excitation, adaptive control system.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-16-26

REFERENCES

1. Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L. [Inductor machines with discrete-distributed windings]. *Elektrotehnicheskie sistemy transportnykh sredstv i ikh robotizirovannykh proizvodstv: nauchno-tehnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [Electrotechnical systems of vehicles and their robotic industries: a scientific and technical conference with international participation]. Moscow, Suzdal' Publ., 1995, pp. 7–8. (In Russian).
2. Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L. [Synchronous gear motor]. *Fourth International conference on unconventional electromechanical and electrical systems: proceedings*. Szczecin, Techn. univ. press, 1999.
3. Taran A.V., Frantsuzova G.A., Kharitonov S.A. Control system of electric power steering. *Proceedings of the IASTED International Conference "Automation, Control, and Information Technology"*, Novosibirsk, Russia, June 10–13, 2002, pp. 121–124.
4. Levin D.V., Livshits E.Ya., Yukhnin M.M. *Induktornaya mashina peremennogo toka kombinirovannogo vzbuzhdeniya* [Inductor AC machine combined excitation]. Patent RF, no. 107418, 2011.
5. Kaluzhskii D.L., Mekhtiyev A.D., Yugai V.V. *Elektricheskaya mashina s kombinirovannym vzbuzhdeniem* [Electric machine with a combined excitation]. Application for the grant of a patent of the Republic of Kazakhstan for the invention no. 2018/0906.1.
6. Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L. Uravneniya elektricheskogo ravnovesiya i momenta sinkhronnykh i asinkhronnykh dvigatelei s diskretno-raspredeleennymi obmotkami [Equations of electric equilibrium and moment of synchronous and asynchronous motors with discrete-distributed windings]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2000, no. 5, pp. 31–36.
7. Kaluzhskii D.L. Elektricheskie mashiny s diskretno-raspredeleennymi obmotkami dlya nizkoskorostnykh elektroprivodov [Electrical machines with discrete-distributed windings for low-speed electric drives]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1997, no. 9, pp. 10–13. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Калужский Дмитрий Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Работает в НГТУ с 1980 года. Область научных интересов – бесщеточные электрические двигатели, системы управления бесщеточными электрическими двигателями. Имеет более 40 научных публикаций. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: verp307@mail.ru).

Kaluzhskii Dmitry Leonidovich – Doctor of Sciences (Eng.), Professor of department “Electronics and Electrical Engineering”, NSTU graduated from Novosibirsk Institute of Electrical Engineering (NIEE) in 1980. He works in NSTU (NIEE) from 1980. His area of scientific research is brushless electric motors and their control systems. Prof. Kaluzhskii has more than 40 papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: verp307@mail.ru).



Мехтиев Али Джаванширович – канд. техн. наук, зав. кафедрой технологии и системы связи Карагандинского государственного технического университета (КГТУ). Окончил КГТУ в 1999 году. Работает в КГТУ с 1999 года. Область научных интересов: электродвигатели, электротехника, механика. Имеет более 106 научных публикаций. (Адрес: 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Mekhtiyev Ali Dzhavanshiroovich – Candidate of sciences (Eng.), the Head of the “Technology and communication systems” Department of Karaganda State Technical University (KSTU). Graduated from KSTU in 1999. He works in KSTU from 1999. His area of scientific research is gearless energy, electric motors, electrical engineering, mechanics. Has more than 106 papers. (Address: 56, Nursultan Nazarbayev Av., Karaganda, 100027, Republic Kazakhstan. E-mail: barton.kz@mail.ru).



Харитонов Андрей Сергеевич – ведущий инженер, ИНОЦ «Силовая электроника», кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Область научных интересов: управляемый электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами, управляемые системы генерирования энергии с синхронным магнитоэлектрическим генератором (МЭГ), авиационные стартер-генераторные системы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: andrekh@yandex.ru).

Kharitonov Andrey Sergeevich – Lead engineer, Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University, NSTU. His research interests are currently focused on control motor drive based on PMSM, systems of generating electrical energy based on synchronous generator, starter generator based on synchronous generator with permanent magnets for aircrafts and helicopters. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: andrekh@yandex.ru).



Уваров Никита Алексеевич – получил степень бакалавра в области электроники и нанoeлектроники на кафедре электроники и электротехники в Новосибирском государственном техническом университете, (НГТУ) в 2017 году. Область научных исследований – безредукторные электродвигатели и их системы управления. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: uvarov.nik.64@gmail.com).

Uvarov Nikita Alekseevich received B.S. degree in Electronics and Nanoelectronics from Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University, NSTU, in 2017. His area of scientific research is brushless electric motors and their control systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: uvarov.nik.64@gmail.com).

*Статья поступила 08 апреля 2019 г.
Received April 08, 2019*

To Reference:

Kaluzhskii D.L., Mekhtiyev A.D., Kharitonov A.S., Uvarov N.A. Adaptivnaya sistema upravleniya generatorom s kombinirovannym возбуждением v vetroenergetike [Adaptive control system of a generator with a combined excitation in wind power]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 16–26. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-16-26.