

УДК 62-523.2

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-111-117

## Повышение эффективности модульных магнитокоммутируемых генераторов ветроэнергетических установок

Н. М. Шайтор, кандидат технических наук, доцент,  
Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*Вследствие простоты конструкции и высокой надежности модульные индукторные генераторы имеют хорошие перспективы для применения в аэродинамических энергетических установках возобновляемой энергетики и могут составить альтернативу синхронным и асинхронным электрическим машинам, которые используются в настоящее время.*

*Целью исследования является повышение эффективности преобразования энергии путем решения задач установления причинно-следственных связей и оптимальных соотношений между магнитным потоком, ЭДС, геометрией электрических и магнитных цепей, структурным расположением электрических обмоток и схемными решениями системы автоматического электромагнитного возбуждения генераторов нового типа.*

*Рассмотрены актуальные вопросы эффективного использования возбуждающего магнитного потока для регулирования напряжения в системах электроснабжения, получающих питание от энергетических установок, главные генераторы которых содержат распределенную магнитную систему при сосредоточенных электрических обмотках. Оптимальные структурные композиции и геометрия соотношений электрических и магнитных контуров определяются из основного расчетного уравнения машины, полученного по условию максимального магнитного потока. Установлены причины наведения переменных ЭДС в обмотках возбуждения постоянного тока, которые препятствуют эффективному намагничиванию машины.*

*Предложена локация электрических обмоток, позволяющая ослабить или полностью компенсировать пульсации магнитного потока, сцепленного с возбуждающими контурами. Установлено, что для устранения паразитных ЭДС в возбуждающих обмотках необходимо применять двухконтурные схемы поочередной коммутации магнитного потока в контурах, при последовательном включении секций обмоток возбуждающих контуров. Для полного исключения этих ЭДС двухконтурные схемы коммутации магнитного потока целесообразно выполнять с общей возбуждающей обмоткой. Рассмотрены способы и особенности схемной реализации условий электромагнитного возбуждения и поддержания постоянного напряжения на выходе генераторов нового типа.*

*Для стабилизации ЭДС рекомендуется применять систему АРВ по отклонению мгновенного значения от опорного напряжения применением высокочастотного возбуждающего генератора.*

**Ключевые слова:** индукторный генератор, магнитная коммутация, электрические обмотки, система возбуждения.

### Введение

Несмотря на развитие технологий ветровых энергетических установок (ВЭУ) с вертикальной осью вращения, вопросы выбора оптимальных параметров конструкций остаются открытыми [1–4]. В настоящее время разработчики отмечают эффективность энергетических модулей генераторов и оптимизации параметров ВЭУ [5–8]. Большое значение придается способам создания, расчета и управления возбуждающими магнитными потоками [9–12]. Генерирующие установки работают в комплексе с системами автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [13–16]. ВЭУ должна предусматривать стабилизацию частоты вращения вала, иметь динамическую стабилизацию переменного напряжения [17–19].

Вследствие простоты конструкции и высокой надежности, индукторные генераторы имеют хорошие перспективы для применения в аэродинамических энергетических установках возобновляемой энергетики и могут составить альтернативу синхронным и асинхронным электрическим машинам.

Цель исследования – повышение эффективности преобразования энергии путем установления причинно-следственных связей и оптимальных соотно-

шений между магнитным потоком, ЭДС, геометрией электрических и магнитных цепей, структурным расположением электрических обмоток и схемными решениями системы автоматического электромагнитного возбуждения модульных генераторов ВЭУ.

### Материалы и методы

**Проектирование оптимального возбуждающего магнитного потока ВЭУ.** Перспективные конструкции модульных индукторных машин с магнитной коммутацией хорошо комбинируются с ВЭУ с вертикальной осью и пустотелым ротором. На рис. 1 показан вариант ВЭУ с вращающимся пустотелым ротором 1 с лопастями, установленными в корпусе ветродвигателя 2, на валу с подшипником 3. Со стороны входного отверстия корпуса установлен конфузор 4, а со стороны выходного отверстия – флюгер 5.

Стабилизация вращения вала обеспечивается изменением углов атаки лопастей. Генератор представлен коаксиальными электрическими обмотками 6, которые по всему наружному периметру ротора охвачены П-образными шихтованными сердечниками, жестко закрепленными на корпусе. Снижение массы достигается исключением собственного ротора, функцию которого выполняет полый ротор ветродвигателя.

Простейший электромагнитный модуль (рис. 2) состоит из пары П-образных шихтованных сердечников 1 трансформаторного типа. Модули с обмотками 2 закреплены на корпусе вдоль внешней окружности вращающегося ротора 3. Торцы их зубцов расположены друг напротив друга, образуя зазор. В зазоре перемещаются закрепленные на роторе ферромагнитные вставки 4.

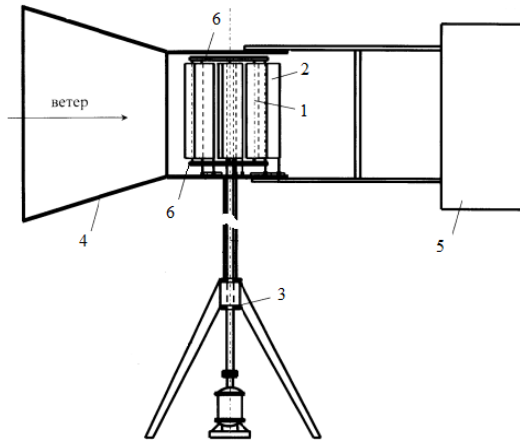


Рис. 1. Ветроэнергетическая установка с модульным индукторным генератором

Fig. 1. Wind power plant with modular inductor generator

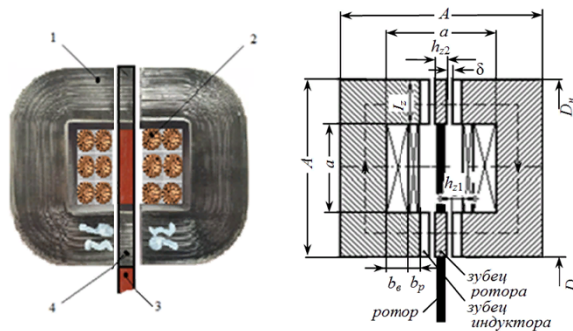


Рис. 2. Простейший электромагнитный модуль генератора в разрезе

Fig. 2. Sectional view of the simplest electromagnetic generator module

По назначению обмотки являются рабочими или возбуждающими; по способу соединения в электрическом и магнитном отношении – последовательными или параллельными, встречными или согласными; по расположению относительно оси вращения – аксиальными или радиальными.

Главные размеры машины определяют наружным диаметром ротора

$$D_H = D_B + A. \quad (1)$$

Внутренний диаметр расположения модуля, ближайшего к оси вращения, определяют исходя из минимально допустимой ширины зубца:

$$D_B = z b_z / \alpha_z, \quad (2)$$

где  $b_z = b_{z \min} = (3 \div 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – минимально допустимая ширина зубца, которая может быть увеличена по конструктивным соображениям;  $z = 60f/n$  –

число пар зубцов индуктора (ротора);  $f$  – частота тока;  $n$  – скорость вращения ротора, об/мин, задаваемые техническим заданием на проектирование;  $\alpha_z$  – зубцовое перекрытие (отношение ширины зубца к зубцовому делению).

ЭДС рабочих обмоток определяется известным выражением:

$$E = 2,22 k_{\text{зп}} w f \Phi (k_{\lambda} - 1) / k_{\lambda}, \quad (3)$$

где  $k_{\lambda} = \Phi_{\max} / \Phi_{\min}$  – коэффициент модуляции потока;  $\Phi_{\max}$  – максимальный магнитный поток;  $\Phi_{\min}$  – минимальный магнитный поток;  $\Phi = z \Phi_{\max}$  – полный магнитный поток машины;  $z$  – число пар модулей.

Действующее значение магнитного потока записывают в виде:

$$\Phi = F \Lambda_c / (C_2 + 1), \quad (4)$$

где  $C_2 = \Lambda_c / \Lambda_{\delta}$  – постоянное отношение магнитной проводимости стали к проводимости зазора;  $F = j k_3 a^2$  – результирующая МДС обмотки возбуждения;  $j$  – плотность тока;  $k_3$  – коэффициент заполнения медью;  $a$  – внутренний габарит модуля, определяющий сечение меди.

Оптимальное возбуждение достигается путем однопараметрической оптимизации магнитного потока по внутреннему габариту модуля машины. Исследование функции (3) на экстремум путем взятия производной  $d\Phi(a)/da = 0$  приводит к уравнению:

$$a^2 + Aa - A^2 = 0, \quad (5)$$

где  $A$  – наружный габарит модуля, определяющий общее сечение, стали и меди.

Физический смысл в этом уравнении имеет положительный корень  $a = 0,61A$ . Отсюда получают радиальный размер зубца модуля:

$$b_{z1} = 0,5(A - a) = 0,32a. \quad (6)$$

Выражения (1)–(6) дают оптимальные соотношения меди и стали, которые приводят к получению максимального магнитного потока возбуждения и ЭДС генератора (3). При форме сечения электромагнитного модуля, отличающегося от квадратного сечения, оптимальным соотношениям (5), (6) габаритов  $a$  и  $A$  должны удовлетворять размеры его параллельных сторон.

Основное расчетное уравнение модульной машины устанавливает соотношение геометрии машины с мощностью, электрическими, магнитными и механическими параметрами, заданными техническими условиями на проектирование:

$$a^3 - a S_B - c = 0. \quad (7)$$

В данном выражении сечение меди обмотки возбуждения:

$$S_B = \kappa_{\text{рс}} \kappa_{\text{зп}} k_F \kappa_{\text{зс}} B_{\delta} \delta' / \mu_0 \kappa_{\text{зм}} j, \quad (8)$$

где  $\kappa_{\text{рс}} = 1,5 \div 2,0$  – коэффициент рассеяния магнитного потока;  $\kappa_{\text{зп}} = 1,15$  – коэффициент запаса на регулирование напряжения генератора;  $k_F = 1,25 \div 1,45$  – отношение МДС магнитной цепи к

МДС зазора;  $B_\delta = B_{z1} \kappa_{3,c} \alpha_z$  – индукция в зазоре;  $\kappa_{3,c} = 0,81 \div 0,99$  – коэффициент заполнения стальной;  $B_{z1}$  – допустимое значение индукции в зубцах индуктора;  $\delta' = 4(i-1)\delta$  – расчетное значение воздушного зазора ( $i$  – число аксиальных слоев или дисков статора);  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\kappa_{3,m} = 0,35 \div 0,65$  – коэффициент заполнения окна медью;  $j$  – плотность тока в обмотках.

Постоянная  $c$  в основном расчетном уравнении представляет собой эффективный объем рабочей обмотки:

$$c = [P \kappa_\lambda / 42,62 (\kappa_\lambda - 1) \kappa_{3,p} \kappa_{3,m} j b_z B_\delta] \times (n / f^2), \quad (9)$$

где  $P$  – электромагнитная мощность, заданная при проектировании.

Основное расчетное уравнение (7) имеет практическое решение для двух случаев. В случае если  $(c/2)^2 - (S_b/3)^3 \geq 0$ , следует воспользоваться решением Кардано, физический смысл в котором имеет первый действительный корень:

$$a = \sqrt[3]{c/2 + \sqrt{(c/2)^2 - (S_b/3)^3}} + \sqrt[3]{c/2 - \sqrt{(c/2)^2 - (S_b/3)^3}}. \quad (10)$$

В противном случае необходимо прибегнуть к тригонометрическому решению:

$$a = 2\sqrt{(S_b/3)} \cos(\alpha/3), \quad (11)$$

где  $\alpha = \arccos[c/2\sqrt{(S_b/3)^3}]$  – постоянная, определяемая параметрами электрических обмоток машины.

#### Оптимальная локация возбуждающих обмоток модульного генератора

На рис. 3, а показана двухконтурная схема коммутации магнитных потоков при раздельной укладке возбуждающей и рабочей обмоток (стрелками указаны направления коммутируемых магнитных потоков в контурах). Каждый магнитный контур содержит секции рабочих  $PO1$ ,  $PO2$  и возбуждающих  $OB1$ ,  $OB2$  обмоток и коммутируется индивидуально общим ротором, причем зубцы первого контура смещены относительно зубцов второго контура в направлении вращения на половину зубцового шага при последовательном включении секций обмоток возбуждения. В обмотки возбуждения подается постоянный ток.

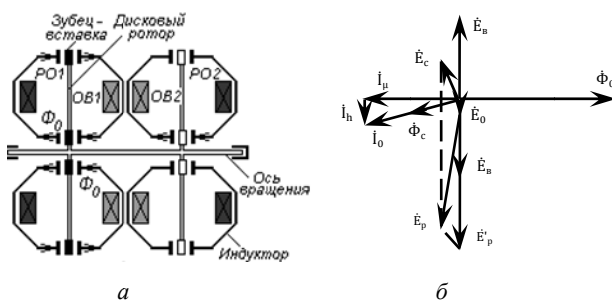


Рис. 3. Двухконтурная коммутация модульного генератора

Fig. 3. Double-circuit switching of a modular generator

На рис. 3, б показана векторная диаграмма первых гармонических ЭДС, индуцируемых в рабочих обмотках при двухконтурной коммутации. Гармоническая составляющая основного потока  $\Phi_0$  индуцирует ЭДС  $E_p'$  – в секциях  $PO1$  и  $PO2$ ,  $E_b$  – в секциях  $OB1$  и  $OB2$ , вихревую ЭДС  $E_0$  – в стали индуктора, отстающих от потока на угол  $\pi/2$ . Поскольку секции обмотки возбуждения в контурах соединены последовательно, а магнитные потоки контуров находятся в противофазе, то ЭДС секций, наводимых в обмотки возбуждения, взаимно компенсируются и не создают гармонической составляющей тока и размагничивающей МДС.

Следствием вихревой ЭДС  $E_0$  является ток  $I_0$  и дополнительный поток рассеяния в стали  $\Phi_c$ . Этот ток содержит размагничивающую реактивную  $I_\mu$  и активную составляющую  $I_h$ , учитывающую явления гистерезиса и вихревых токов.

Поток рассеяния  $c$ , сцепленный с рабочими обмотками, индуцирует в них ЭДС  $E_c$ , в результате чего смещается фаза и незначительно снижается действующее значение ЭДС  $E_p$  рабочей обмотки из-за потерь на вихревые токи и гистерезис.

На рис. 4, а показана одноконтурная схема коммутации. Случаю раздельного расположения секций возбуждающей и рабочей обмоток соответствует эксперимент с секциями обмоток  $OB1 - PO2$  (или  $OB2 - PO1$ ), векторные диаграммы которых приведены на рис. 4, б.

Случаю совместного расположения секций возбуждающей и рабочей обмоток соответствует эксперимент с секциями обмоток  $OB1 - PO1$  (или  $OB2 - PO2$ ), векторные диаграммы которых приведены на рис. 4, в.

Если магнитный поток создан только одной секцией  $OB1$ , ЭДС  $E_b$  этой секции оказывается некомпенсированной, поэтому в секции появляется гармоническая составляющая тока  $I_b$ , которая отстает от ЭДС на угол  $\pi/2$ , рис. 4, б.

Этот ток создает размагничивающий магнитный поток  $\Phi_b$ , который, складываясь с потоком рассеяния  $\Phi_c$  и образуя общий поток  $\Phi_{bc}$ , индуцирует в раздельно расположенной секции рабочей обмотки  $PO2$  ЭДС  $E_{bc}$ .

В результате размагничивающего действия секции обмотки возбуждения происходит двукратное снижение действующего значения со смещением фазы ЭДС  $E_p$  секции рабочей обмотки  $PO2$ .

В секции рабочей обмотки  $PO1$ , уложенной в общие пазы с секцией  $OB1$ , преобразование энергии еще больше теряет эффективность по причине магнитного потока рассеяния  $\Phi_s$ , сцепленного с рабочей обмоткой, рис. 4, в. В этом случае векторная диаграмма, построенная на рис. 4, в для секции  $PO1$ , дополняется потоком рассеяния  $\Phi_s$ , который находится в противофазе с основным потоком  $\Phi_0$  и оказывает на него размагничивающее действие.

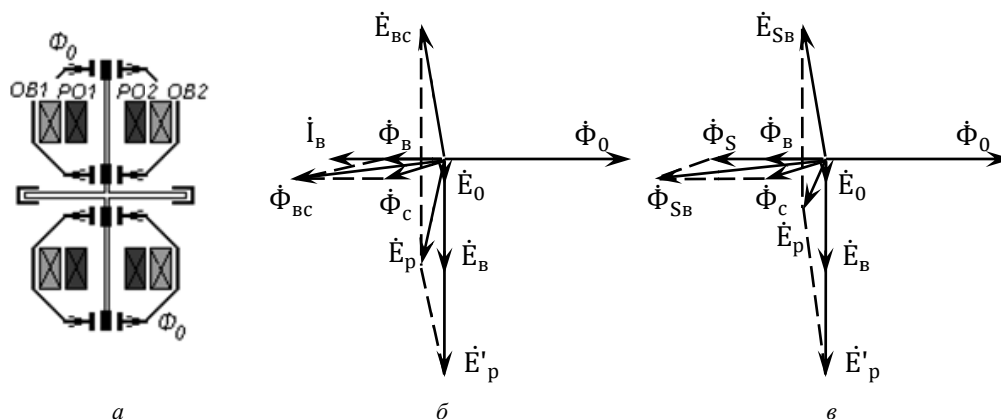


Рис. 4. Одноконтурная коммутация модульного генератора

Fig. 4. Single-circuit switching of a modular generator

В результате сложения потоков  $\Phi_c$ ,  $\Phi_b$  и  $\Phi_s$  образуется поток  $\Phi_{sb}$ , а в секции  $PO1$  индуцируется ЭДС  $E_{sb}$ , которая находится практически в противофазе с исходной ЭДС  $E'_p$ . Действие указанных факторов на порядок уменьшает действующее значение и значительно смещает фазу результирующей ЭДС  $E_p$  секции рабочей обмотки  $PO1$ .

#### Система управления возбуждением модульного генератора ВЭУ

В основу способа регулирования напряжения модульного генератора ВЭУ поставлена задача повышения быстродействия регулирования и снижение искажения выходной синусоиды фазового

напряжения, которая реализуется путем преобразования временного интервала в величину, обратную величине угла задержки по отношению к началу каждого полупериода выпрямленного напряжения возбуждения.

При этом частота напряжения возбуждения многократно превышает частоту напряжения генератора, что обеспечивает снижение прерывистости тока возбуждения и уменьшение искажения синусоиды ЭДС и фазового напряжения генератора.

Данный способ регулирования напряжения генератора по принципу отклонения мгновенного значения напряжения на выходе генератора при изменении нагрузки во времени  $t$  поясняется на рис. 5.

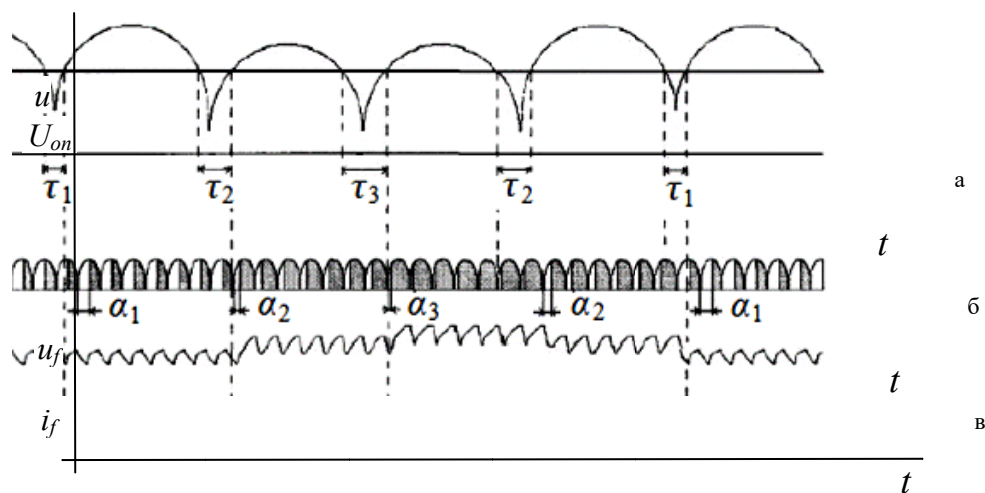


Рис. 5. Регулирование напряжения на выходе модульного генератора

Fig. 5. Voltage regulation at the output of the modular generator

Измерение временного интервала  $\tau$  каждого такта пульсаций мгновенного выпрямленного напряжения  $u$  генератора по линии сравнения с заданным опорным напряжением  $U_{оп}$  осуществляется на каждом полупериоде напряжения, рис. 5, а. При снижении напряжения во время увеличения нагрузки потребителями ширина временного интервала  $\tau$  растет. Ее преобразуют в величину, обратную величине угла

задержки  $\alpha$  по отношению к началу каждого полупериода выпрямленного напряжения возбуждения  $u_f$ , рис. 5, б.

При этом угол  $\alpha$  уменьшается, а напряжение возбуждения  $U_f$  и ток возбуждения  $i_f$  растут, рис. 5, в. В результате напряжение генератора  $u$  восстанавливается, одновременно восстанавливается временной интервал  $\tau$ , напряжение  $u_f$  и ток возбуждения  $i_f$ .

При увеличении напряжения СГ во время снижения нагрузки процесс проходит в обратном порядке.

Реализация предложенного способа регулирования напряжения  $u$  главного генератора GM поясняется на рис. 6.

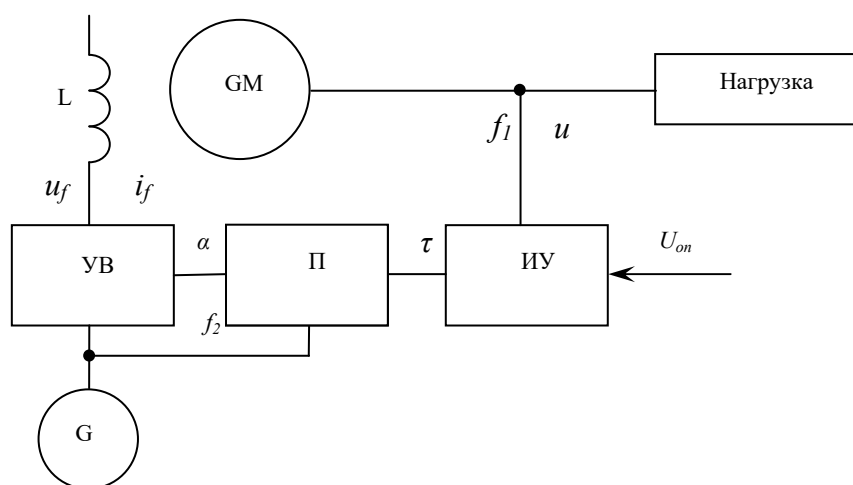


Рис. 6. Структурная схема АРВ модульного генератора ВЭУ

Fig. 6. Block diagram of ARV at the output of the wind turbine generator

Первая операция осуществляется измерением временного интервала  $\tau$  каждого такта пульсаций мгновенного выпрямленного напряжения  $u$  по линии сравнения с заданным опорным напряжением  $U_{on}$  на измерительном устройстве ИУ.

Вторая операция заключается в применении преобразователя П, который трансформирует временной интервал  $\tau$  в величину, обратную величине угла задержки  $\alpha$  по отношению к началу каждого полупериода выпрямленного напряжения возбуждения  $u_f$ . Третью операцию реализуют с помощью управляемого выпрямителя УВ, на вход которого поступают управляющие импульсы с углом задержки  $\alpha$  и частотой  $f_2$  возбудителя G, которая многократно превышает частоту  $f_1$  главного генератора GM.

Регулируемые напряжение  $u_f$  и ток возбуждения  $i_f$  подаются от возбудителя G через управляемый выпрямитель УВ на обмотку возбуждения L главного генератора GM.

Возбудитель G представляет собой модульный индукторный генератор малой мощности повышенной частоты. Электрические обмотки этого генератора расположены коаксиально соосно обмоткам главного генератора GM, а коммутаторы магнитного потока выполнены на роторе в виде постоянных магнитов.

Достоинствами способа является высокое быстродействие и незначительная прерывистость напряжения питания обмотки возбуждения, что приводит к уменьшению искажения синусоиды ЭДС и эффективному поддержанию постоянства фазового напряжения генератора.

#### Анализ результатов

При проектировании модульного генератора рекомендуется воспользоваться основным расчетным

уравнением и его решениями (7)–(11), а также выражениями (1)–(6), чтобы предусмотреть необходимую геометрию и расположение компонентов ВЭУ для получения максимально возможного возбуждения магнитного потока и генерируемой электромагнитной мощности при оптимальном соотношении меди и стали генератора.

В одноконтурных схемах коммутации магнитного потока в обмотках возбуждения модульных машин индуцируется паразитная ЭДС, препятствующая намагничиванию. При совместной укладке рабочей и возбуждающей обмоток ЭДС рабочей обмотки снижается из-за этого на порядок, а при раздельной укладке – в два раза. Для взаимной компенсации ЭДС, индуцируемой в обмотках возбуждения, необходимо применять двухконтурные схемы с поочередной коммутацией потока в контурах, при последовательном включении секций обмоток возбуждающих контуров.

Для полного избегания ЭДС, индуцируемой в обмотках возбуждения, двухконтурные схемы коммутации потока должны выполняться с общей возбуждающей обмоткой. Благодаря этому величина общего потока, сцепленного с обмоткой возбуждения, при поочередной коммутации потока не изменяется и в обмотке возбуждения ЭДС не индуцируется. Такая схема коммутации позволяет повысить эффективность преобразования энергии при снижении массы меди возбуждающей обмотки.

Регулирование возбуждения модульного генератора ВЭУ с помощью высокочастотного генератора-возбудителя обеспечивает высокое быстродействие системы АРВ, приводит к уменьшению искажения синусоиды ЭДС и поддержанию постоянства фазового напряжения генератора при изменении нагрузок.

### Вывод

Повышение эффективности преобразования энергии достигается выполнением комплекса мероприятий, включающих расчет и локацию электромагнитных модулей и электрических обмоток, исключающих паразитные ЭДС, наводимые в процессе коммутации возбуждающего магнитного потока. Предпочтительными вариантами локации являются двухконтурные схемы поочередной коммутации потока с общей возбуждающей обмоткой, либо с индивидуальными возбуждающими обмотками коммутируемых контуров при последовательном их соединении. Менее предпочтителен вариант одноконтурной коммутации магнитного потока при раздельной локации рабочих и возбуждающих обмоток, совместное расположение обмоток применять не следует. Отступление от рекомендаций при совместной укладке рабочей и возбуждающей обмоток снижает расчетную мощность генератора на порядок, а при раздельной укладке снижает ее в два раза.

Для поддержания качества генерируемой синусоиды ЭДС рекомендуется применять системы АРВ, работающие по отклонению мгновенного значения от опорного напряжения, с опосредованным управлением током возбуждения, поступающего от возбуждающего генератора повышенной частоты. Модульный возбуждающий генератор с постоянными магнитами на роторе может быть представлен частью общей конструкции модульного генератора ВЭУ.

### Библиографические ссылки

1. Шпенст В. А., Ермолович В. С. Анализ факторов, снижающих энергоэффективность работы ветроэнергетических станций // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 4 (79). С. 34–38.
2. Рахимов Ф. М. Влияние соотношения сторон турбины вертикально-осевой ветроэнергетической установки на его производительность // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2022. № 2 (58). С. 21–30.
3. Самарская Н. С., Парамонова О. Н., Борисова Ю. С. Жизненный цикл ветроэнергетической установки // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 3 (37). С. 41–44. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-37-3-41-44.
4. Мелехин А. А. Многокритериальная оптимизация параметров ветроэнергетической установки // Естественные и технические науки. 2020. № 1 (139). С. 176–178.
5. Костин А. А., Куличенко А. В. Мобильная ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения // Научный аспект. 2020. Т. 6, № 3. С. 779–782.
6. Бычков Е. В., Титов В. Г., Васенин А. Б. Анализ функциональных возможностей ветроэнергетических установок при обслуживании трассовых объектов // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 3 (128). С. 42–48.
7. Татевосян А. А. Оптимизация тихоходного синхронного генератора модульного типа и принцип реализации системы управления напряжением генератора на основе нейронной сети // Электричество. 2021. № 7. С. 61–70. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-7-61-70.
8. Штена Е. П. Ветроэлектростанция с биротативным синхронным генератором // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 1-1 (69). С. 253–259.

9. Зубков Ю. В., Владимиров Д. А. Проектирование генератора с магнитоэлектрическим возбуждением электростанции собственных нужд // Электричество. 2020. № 6. С. 24–30. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-6-24-30.

10. Татевосян А. А. Исследование влияния конструктивных параметров тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов на их энергетические характеристики // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15, № 2. С. 15–25.

11. Воронин С. Г., Чернышев А. Д. Модель вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 4–12. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-4-12.

12. Красовский А. Б., Восторгина Е. С. Особенности режима ослабления поля в вентильно-индукторной электрической машине // Электричество. 2022. № 12. С. 36–47. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-12-36-47.

13. Горюжанкин А. Н., Коржов А. В. Особенности синтеза синхронных реактивных и индукторных электрических машин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22, № 2. С. 81–91. DOI: 10.14529/power220208.

14. Система автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами на основе активного выпрямителя напряжения / Н. Ю. Шевырева, Ю. Т. Портной, Ю. В. Шевырев, Д. Э. Доброхотов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2021. Т. 181, № 2. С. 10–17.

15. Зубков Ю. В., Иванников Ю. Н., Макаричев Ю. А. Повышение качества выходного напряжения в многополюсных генераторах ВЭУ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 3 (78). С. 108–112.

16. Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов автономных источников электроэнергии с внешней форсировкой / В. Г. Сугаков, О. С. Хватов, А. А. Тошев, Л. В. Зобов // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 1 (21). С. 51–61. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_1\_51.

17. Мыцык Г. С., Маслов А. Е. О современных средствах стабилизации напряжения генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением // Новое в российской электроэнергетике. 2020. № 3. С. 6–14.

18. Золотов И. И., Шевцов А. А. Принцип и режимы работы динамического стабилизатора напряжения автономных генераторов // Электротехника. 2021. № 10. С. 65–67.

19. Системы стабилизации выходного напряжения синхронных генераторов / Е. А. Бирюкова, М. А. Подгузова, Д. А. Шевцов, Д. М. Шишов, Р. И. Ильясов // Практическая силовая электроника. 2022. № 2 (86). С. 26–31.

### References

1. Shpenst V.A., Ermolovich V.S. [Analysis of factors that reduce the energy efficiency of wind power stations]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2023, no. 4, pp. 34-38 (in Russ.).
2. Rakhimov F.M. [The influence of the aspect ratio of the turbine of a vertical-axis wind power plant on its performance]. *Politehnicheskii vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*, 2022, no. 2, pp. 21-30 (in Russ.).
3. Samarskaya N.S., Paramonova O.N., Borisova Yu.S. [Life cycle of a wind power plant]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*, 2021, no. 3, pp. 41-44 (in Russ.). DOI: 10.52684/2312-3702-2021-37-3-41-44.
4. Melekhin A.A. [Multicriteria optimization of wind power installation parameters]. *Natural and technical sciences*, 2020, no. 1, pp. 176-178 (in Russ.).

5. Kostin A.A., Kulichenko A.V. [Mobile wind power plant with a vertical axis of rotation]. *Nauchnyi aspekt*, 2020, vol. 6, no. 3, pp. 779-782 (in Russ.).
6. Bychkov E.V., Titov V.G., Vasenin A.B. [Analysis of the functionality of wind power plants when servicing route facilities]. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 2020, no. 3 (128), pp. 42-48 (in Russ.).
7. Tatevosyan A.A. [Optimization of a low-speed synchronous generator of a modular type and the principle of implementing a generator voltage control system based on a neural network]. *Electricity*, 2021, no. 7, pp. 61-70 (in Russ.). DOI: 10.24160/0013-5380-2021-7-61-70.
8. Shtepa E.P. [Wind power plant with a birotative synchronous generator]. *Current scientific research in the modern world*, 2021, no. 1-1, pp. 253-259 (in Russ.).
9. Zubkov Yu.V., Vladimirov D.A. [Design of a generator with magnetoelectric excitation for a power plant for its own needs]. *Electricity*, 2020, no. 6, pp. 24-30 (in Russ.). DOI: 10.24160/0013-5380-2020-6-24-30.
10. Tatevosyan A.A. [Study of the influence of design parameters of low-speed synchronous generators with permanent magnets as part of electrical complexes on their energy characteristics]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 15-25 (in Russ.).
11. Voronin S.G., Chernyshev A.D. [Model of a switched inductor generator with capacitor excitation]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2020, no. 1, pp. 4-12 (in Russ.). DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-4-12.
12. Krasovsky A.B., Vostorgina E.S. [Features of the field weakening mode in a switched reluctance electric machine]. *Electricity*, 2022, no. 12, pp. 36-47 (in Russ.).
13. Gorozhankin A.N., Korzhov A.V. [Features of the synthesis of synchronous reactive and inductor electrical machines]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 81-91 (in Russ.). DOI: 10.14529/power220208.
14. Shevyreva N.Yu., Portnoy Yu.T., Shevyrev Yu.V., Dobrokhotov D.E. [System for automatic voltage regulation of a synchronous generator with permanent magnets based on an active voltage rectifier]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIE*, 2021, vol. 181, no. 2, pp. 10-17 (in Russ.).
15. Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N., Makarichev Yu.A. [Improving the quality of output voltage in multi-pole generators of wind turbines]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. 3, pp. 108-112 (in Russ.).
16. Sugakov V.G., Khvatov O.S., Toshchev A.A., Zobov L.V. [Systems for automatic control of excitation of synchronous generators of autonomous power sources with external forcing]. *Intellektual'naya elektrotekhnika*, 2023, no. 1, pp. 51-61 (in Russ.). DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_1\_51.
17. Mytsyk G.S., Maslov A.E. [On modern means of stabilizing the voltage of generators with magnetoelectric excitation]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*, 2020, no. 3, pp. 6-14 (in Russ.).
18. Zolotov I.I., Shevtsov A.A. [Principle and operating modes of a dynamic voltage stabilizer for autonomous generators]. *Electrical engineering*, 2021, no. 10, pp. 65-67 (in Russ.).
19. Biryukova E.A., Podguzova M.A., Shevtsov D.A., Shishov D.M., Ilyasov R.I. [Systems for stabilizing the output voltage of synchronous generators]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2022, no. 2, pp. 26-31 (in Russ.).

\* \* \*

### Efficiency Increasing of Modular Magnetic Commuted Generators of Wind Power Installations

N. M. Shaitor, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*Modular inductor generators, due to their simplicity of design and high reliability, have good prospects for use in aerodynamic power plants of renewable energy, and can become an alternative to synchronous and asynchronous electrical machines that are currently in use.*

*The purpose of the study is to increase the energy conversion efficiency by solving the problems of establishing cause-and-effect relationships and optimal relationships between magnetic flux, EMF, geometry of electrical and magnetic circuits, structural arrangement of electrical windings, and circuit solutions for automatic electromagnetic excitation systems of new type generators.*

*The current issues of exciting magnetic flux effective application for voltage regulation in power supply system's receiving power from power plants, which main generators contain a distributed magnetic system with concentrated electric windings, are considered. The optimal structural compositions and geometry of the relationships between the electrical and magnetic circuits are determined from the basic design equation of the machine, obtained according to the condition of maximum magnetic flux. The reasons for the induction of variable EMF in the DC excitation windings, preventing the effective magnetization of the machine, have been established.*

*The location of electrical windings which makes it possible to weaken or completely compensate for the pulsations of the magnetic flux coupled to the exciting circuits is proposed. It has been established that in order to eliminate parasitic EMF in the exciting windings, it is necessary to use double-circuit schemes for alternating switching of the magnetic flux in the circuits, with winding sections of the exciting circuits being connected in series.*

*To stabilize the EMF, it is recommended to use an ARV system based on the deviation of the instantaneous value from the reference voltage, using a high-frequency exciting generator.*

**Keywords:** inductor generator, magnetic switching, electrical windings, excitation system.

Получено: 15.01.24

### Образец цитирования

Шайтор Н. М. Повышение эффективности модульных магнитокоммутуемых генераторов ветроэнергетических установок // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 117–124. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-111-117.

### For Citation

Shaitor N.M. [Increasing the efficiency of modular magnetic commuted generators of wind power installations]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 111-117. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-111-117.