

ПУЛЬСАЦИИ ВЫПРЯМЛЕННОЙ ЭДС ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Б.Н. Гомберг¹, А.И. Согрин², Н.Н. Мехваник¹

¹ АО «НПО «Электромашина», г. Челябинск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассмотрены способы снижения пульсаций выпрямленного напряжения вентильных генераторов, построенных на базе синхронных электрических машин, широко применяемых в автономных системах электрооборудования. Произведена систематизация понятий, характеризующих пульсации, выявлены величины, позволяющие получить их количественную оценку. Для этого выполнено сравнение вентильных генераторов, различающихся числом фаз и схемой полупроводникового выпрямителя. Процессы выпрямления рассматривались в режиме холостого хода генераторов. В рассмотрение принимались вентильные генераторы с четным и нечетным числом фаз, якорные обмотки которых образованы трехфазными группами. Рассмотрены однополупериодные и двухполупериодные схемы выпрямления. В качестве параметров, характеризующих пульсации, выбраны: относительный размах значений выпрямленной ЭДС, пульсность и коэффициент пульсации схемы выпрямления, определяемые по общепринятым методикам и соотношениям. По результатам проведенного анализа показано, что качество выпрямленного напряжения при двухполупериодных схемах выпрямления зависит как от количества фаз генератора, так и от того, четным или нечетным является их число, в то время как при однополупериодных схемах выпрямления качество выходного напряжения определяется только количеством фаз генератора. Сделано заключение о том, что наилучшие показатели при сравнительно небольшом числе фаз могут быть получены при использовании агрегатированного генератора, обмотка якоря которого разделена на две части, смещенные на 30 эл. град. друг относительно друга и соединенные с раздельными мостовыми выпрямителями, включенными последовательно или параллельно относительно нагрузки. Такой генератор может рассматриваться как один из приемлемых вариантов обеспечения высоких требований по ограничению пульсаций выпрямленного напряжения энергоустановки.

Ключевые слова: вентильный генератор, якорная обмотка, выпрямитель, пульсации выпрямленного напряжения, коэффициент пульсаций.

Введение

Синхронные генераторы, работающие в автономных системах электрооборудования постоянного тока в качестве основного источника электроэнергии, в настоящее время широко применяются в авиации, на автомобильном транспорте и специальных электроустановках, где они постепенно вытеснили ранее применявшиеся генераторы постоянного тока. Основными причинами этой тенденции являются: простота конструкции синхронных генераторов, их высокие удельные характеристики и во многих случаях главное – высокая надежность, обусловленная отсутствием у них механического выпрямителя – коллектора. Этот непреходящий конструктивный элемент машины постоянного тока в рассматриваемых случаях заменяется силовым полупроводниковым выпрямительным блоком (далее будем называть его выпрямителем), в связи с чем синхронные генераторы, работающие на выпрямленную нагрузку и содержащие собственно электрическую машину и выпрямитель, называют также вентильными.

Важнейшим функциональным требованием, предъявляемым к вентильному генератору, явля-

ется обеспечение низкого уровня пульсаций (изменений) выпрямленного напряжения. Для авиационных генераторов этот показатель обычно не должен превышать 12 %. Значения пульсаций выпрямленного напряжения зависят от обмоточных данных генератора, в первую очередь от числа фаз, и схемы выпрямления. Амплитуды пульсаций выпрямленного напряжения при холостом ходе меньше, чем при нагрузке, и уменьшаются с увеличением числа фаз. В некоторых случаях, как будет показано ниже, имеет значение, является ли число фаз нечетным или четным, меньшие амплитуды получаются при нечетном числе фаз. Наиболее широкое практическое применение в выпрямителе вентильного генератора нашли мостовые (двухполупериодные) схемы выпрямления. Они позволяют получить хорошее использование мощности генератора (теоретически в идеальном случае эта мощность лишь на 4,5 % превышает выпрямленную мощность) и обеспечивают пульсации на допустимом уровне при числе фаз $m = 5-7$ для диапазона мощностей генератора до 20–50 кВА, а иногда и большей мощности.

Проблемы конструирования и проектирования генераторов автономных объектов обсуждаются, например, в работах [1–6], где, в частности, рассматриваются вопросы выбора числа фаз генератора и схемы его выпрямителя с учетом качества выходного напряжения, рассмотрены многофазные вентильные генераторы и приведены основные показатели некоторых из них. Проблемы выбора числа фаз вентильных машин освещены в работах [7–10]. В работах [11, 12] рассматриваются вопросы математического моделирования электрических машин с многофазной обмоткой, соединенной по схеме «двойная звезда». В работе [13] обсуждается целесообразность использования двенадцатифазного генератора. В статье [14] рассмотрены некоторые конструкции и схемотехнические решения вентильных генераторов с многофазной замкнутой обмоткой якоря. Ряд работ посвящен дополнительным возможностям, появляющимся при использовании многофазных якорных обмоток. Так, в работе [15] показано, что включение якорной обмотки по схеме двойной звезды позволяет повысить надежность электрического генератора за счет резервирования фазных обмоток. В работах [16–18] предложено использование сдвоенной обмотки якоря для снижения требований к силовым вентилям выпрямителя.

Однако и в указанной выше литературе, и в других многочисленных работах по вентильным генераторам вопрос об уровне пульсаций выпрямленного напряжения рассматривается вскользь, в самом общем виде. Более того, оцениваемые параметры у разных авторов не совпадают и даже обозначения применяемых терминов различаются. А между тем факт наличия проблем с обеспечением заданного уровня пульсаций нередко выясняется только при испытаниях готовых образцов, после чего, как правило, требуется серьезная переработка конструкции машины. Настоящая работа не претендует на полноту освещения всех возможных решений этой проблемы. Авторы стремились систематизировать и закрепить понятия, характеризующие пульсации, а также величины, позволяющие получить их количественную оценку, показать, что кроме общеизвестного пути – увеличения числа фаз генератора существует еще целый ряд других решений. В качестве одного из таких перспективных предложений в работе рассмотрено выполнение вентильного генератора с относительно небольшим числом фаз, но с якорной обмоткой, состоящей из двух трехфазных групп [19].

Постановка задачи

Для целей нашего исследования и большей наглядности обоснований выводов и предложений ограничимся рассмотрением процессов выпрямления при холостом ходе генератора. Поэтому далее будем оперировать не с напряжениями, а с ЭДС

обмоток. Только в некоторых случаях в целях сохранения общепринятых обозначений будем использовать термин «напряжение». Второе допущение состоит в том, что форму кривых фазных ЭДС будем считать синусоидальной. Третье допущение: выпрямитель состоит из идеальных неуправляемых вентилях (силовых диодов), то есть таких приборов, падением напряжения на которых при протекании прямого тока можно пренебречь, а ток, протекающий по диоду при приложении к нему обратного напряжения, не учитывать. Другими словами, будем считать, что при протекании прямого тока анод с катодом диода замкнуты накоротко, а для обратного напряжения на диоде – цепь разомкнута.

Выпрямленная ЭДС кроме постоянной по величине полезной составляющей E_d , равной среднему значению выпрямленной ЭДС, содержит и периодическую составляющую e_n – ЭДС пульсаций. Однозначного (стандартизованного) определения понятия «пульсация» в настоящее время не существует. Наиболее распространен подход, предполагающий, что этот термин является синонимом слова «изменение», а в качестве количественной характеристики пульсации принят размах, то есть разность между наибольшим и наименьшим значениями измеряемой величины. Такое толкование термина «пульсация» представляется весьма наглядным, и поэтому оно используется в данной работе.

Тогда величина пульсации Δe_d выпрямленной ЭДС e_d , определяется как

$$\Delta e_d = e_{d \max} - e_{d \min}, \quad (1)$$

где $e_{d \max}$ и $e_{d \min}$ – соответственно наибольшее и наименьшее мгновенные значения выпрямленной ЭДС (рис. 1).

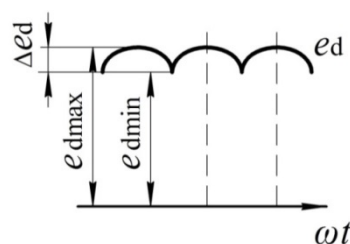


Рис. 1. Кривая выпрямленной ЭДС

Сравнительный анализ выпрямительных систем удобно проводить не по абсолютным значениям пульсации Δe_d , получаемым из (1), а по относительным значениям $\Delta e_{d\%}$, в процентах от постоянной составляющей (среднего значения) E_d выпрямленной ЭДС.

Значение E_d зависит от числа фаз обмотки генератора и схемы выпрямителя. Поэтому относительные значения пульсаций описываются формулами структурно подобными, но различными для четного и нечетного числа фаз m . При двухполу-

периодной (мостовой) схеме выпрямления значение пульсаций определяется формулами [1]:

$$\Delta e_{d\%}^* = \frac{\Delta e_d}{E_d} 100 = \frac{\pi}{2m} \frac{1 - \cos(\pi/2m)}{\sin(\pi/2m)} 100; \quad (2)$$

$$\Delta e_{d\%}^* = \frac{\Delta e_d}{E_d} 100 = \frac{\pi}{2m} \frac{1 - \cos(\pi/m)}{\sin(\pi/m)} 100. \quad (3)$$

При расчетах по формулам (2) и (3) получается, что при нечетных числах фаз $m=3, 5, 7$ пульсации составляют 14; 4 и 2,5 % соответственно, а при четном числе фаз $m=6$ пульсация равна 14 %.

Расчет пульсаций по формулам (2) и (3) не учитывает такого важного параметра выпрямленного напряжения, как частота пульсаций, который существенно отражается на необходимости и, при наличии, на габаритах сглаживающего фильтра [2]. Поэтому кроме рассмотренного выше параметра $\Delta e_{d\%}^*$ для наиболее общей оценки степени пульсации и качества процесса выпрямления введена еще одна специальная величина – коэффициент пульсации выпрямленной ЭДС. Обычно коэффициент пульсации обозначают буквой g , но чтобы не путать это обозначение с символом числа пазов на полюс и фазу, будем обозначать его близкой по начертанию буквой g .

Кривая ЭДС e_n , как любая периодическая кривая, может быть разложена по методу Фурье на гармоники первого и более высоких порядков. Коэффициент пульсации g подсчитывают как отношение амплитуды гармонической первого порядка (основной) E_{n1m} ЭДС пульсаций e_n к среднему значению выпрямленной ЭДС E_d :

$$g = E_{n1m}/E_d. \quad (4)$$

Численное значение коэффициента пульсаций находят по формуле [11]:

$$g = \frac{2}{\mu^2 - 1}, \quad (5)$$

где μ – пульсность выпрямителя, определяемая как отношение частоты ЭДС пульсации e_n к частоте ЭДС генератора.

Таким образом, для сравнения пульсационных свойств различных схем вентиляльных генераторов в

данной работе используются два критерия – размах выпрямленного напряжения $\Delta e_{d\%}^*$ и коэффициент пульсации g , являющиеся достаточно информативными. В качестве «частотного» критерия g некоторые авторы применяют величину «пульсность» μ , но, по нашему мнению, этот термин менее понятен и привычен для отечественной терминологии. Объектом исследования являются вентиляльные генераторы, имеющие якорную обмотку, состоящую из одной-двух трехфазных групп. Для рассматриваемой мощности генератора порядка 30–50 кВт дальнейшее увеличение числа обмоточных групп не целесообразно.

Трехфазный генератор с однополупериодным выпрямителем

В качестве простейшего вентиляльного генератора из ряда электрических машин, для которых регламентированы пульсационные характеристики, принят, что наиболее удобно и логично, трехфазный генератор с однополупериодным выпрямителем (рис. 2).

Схема электрических соединений этого генератора показана на рис. 2а, кривая выпрямленной ЭДС e_d – сплошной линией на рис. 2б. Эта кривая состоит, с учетом принятых допущений, из отрезков синусоид фазных ЭДС, имеющих на данном интервале наиболее положительный потенциал. Моменты a, b, c , когда фазные ЭДС пересекаются (на рис. 2б это соответственно значения ωt , равные 30, 150 и 270 эл. град.), являются точками естественного отпирания диодов выпрямителя. В каждый момент времени ток проводит диод, у которого на аноде потенциал наиболее положителен. Согласно рис. 2б величина Δe_d , определяемая по формуле (1), равна

$$\Delta e_d = (\sin 90^\circ - \sin 30^\circ) E_m = 0,5 E_m, \quad (6)$$

где E_m – амплитуда фазной ЭДС.

Кривая e_d пульсирует с частотой в 3 раза большей, чем частота фазной ЭДС, а период пульсации составляет 120 эл. град. Следовательно, $\mu = 3$ и коэффициент пульсации, подсчитанный по формуле (5), $g = 0,25$.

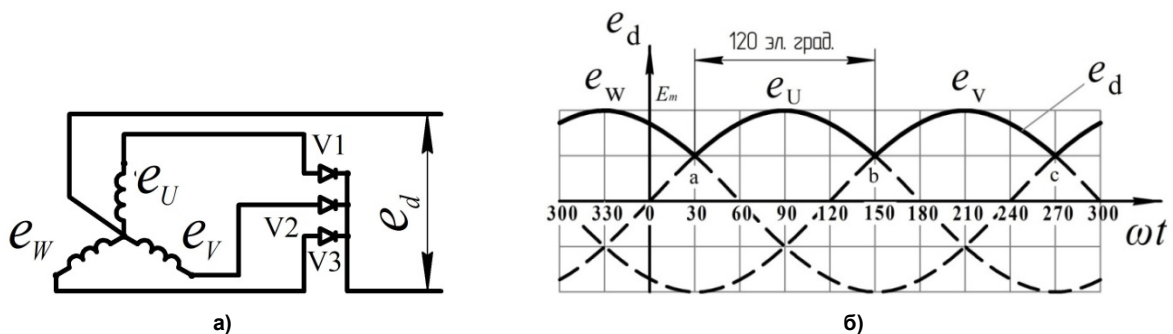


Рис. 2. Трехфазный вентиляльный генератор с однополупериодным выпрямителем (а) и кривая его выпрямленной ЭДС (сплошная линия) (б)

Среднее значение выпрямленной ЭДС E_d равно [11]:

$$E_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{2\pi/3+\pi/6} E_m \sin \omega t dt = 0,83E_m = 1,17E_\phi. \quad (7)$$

Здесь E_ϕ – эффективное значение фазной ЭДС.

Относительная пульсация согласно формуле (2) будет равна

$$\Delta e_{d\%}^* = (\Delta e_d / E_d) \cdot 100 = (0,5/0,83) \cdot 100 = 60,1\%. \quad (8)$$

Полученные результаты показывают, что у трехфазного генератора с однополупериодным выпрямителем пульсационные характеристики намного хуже обычно требуемых.

Трехфазный генератор с двухполупериодным выпрямителем

Схема электрических соединений генератора показана на рис. 3а, кривые положительного $\phi_{кк}$ и отрицательного $\phi_{аа}$ потенциалов на диодах его выпрямителя – на рис. 3б. Отметим, что потенциальные кривые имеют относительный сдвиг, равный половине периода пульсации.

В мостовых схемах выпрямления мгновенное значение ЭДС e_d равно разности потенциалов ($\phi_{кк} - \phi_{аа}$) вентилей катодной и анодной групп. Кривые потенциалов $\phi_{кк}$ и $\phi_{аа}$, являющиеся частями синусоид линейных ЭДС, показаны на рис. 3б сплошными линиями. Построенная таким методом кривая выпрямленной ЭДС e_d трехфазного вентильного генератора с мостовым выпрямителем

представлена на рис. 4. Можно заметить, что в этом случае период пульсации составляет 60 эл. град. и частота пульсаций в 6 раз больше частоты ЭДС генератора.

Следовательно, у генератора по рис. 3 пульсность $\mu = 6$ и коэффициент пульсации $g = 0,06$.

Таким образом, замена однополупериодного выпрямителя мостовым при нечетном числе фаз позволила увеличить частоту пульсаций в 2 раза. По рис. 3 можно определить, что $e_{d\max} = 1,73 E_m$, $e_{d\min} = 1,50 E_m$, следовательно, $\Delta e_d = 0,23 E_m$. Среднее значение выпрямленной ЭДС, подсчитанное по формуле, аналогичной (7), получается равным $E_d = 1,66 E_m = 2,34 E_\phi$, то есть оно в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении. Объясняется такой результат тем, что в мостовой схеме на нагрузке складываются выходные ЭДС двух однополупериодных выпрямителей. Величина $\Delta e_{d\%}^*$ для данного генератора получается равной 13,9%, то есть формула (3) достаточно точно описывает процесс при принятых допущениях.

Таким образом, при нечетном числе фаз применение двухполупериодного (мостового) выпрямителя вместо однополупериодного приводит к резкому (более чем в 4 раза) уменьшению коэффициента пульсации.

Шестифазный генератор с однополупериодным выпрямителем

Теперь рассмотрим машину, имеющую обмотку якоря с четным числом фаз. На рис. 5а показана схема электрических соединений вентильного

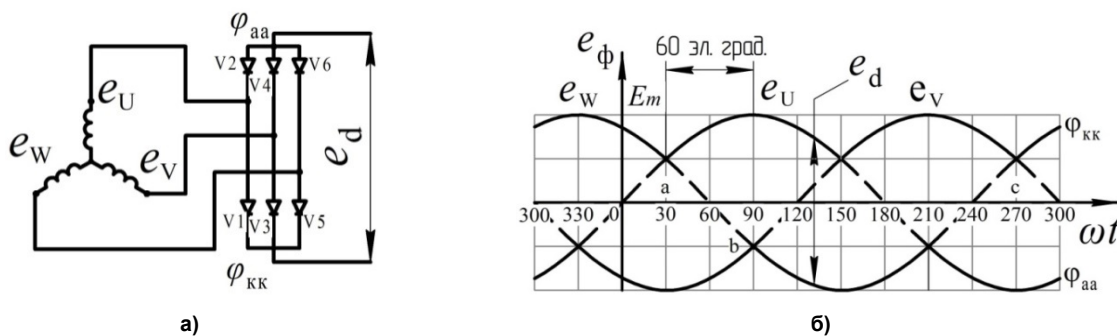


Рис. 3. Трехфазный вентильный генератор с двухполупериодным выпрямителем (а) и потенциальные кривые катодной и анодной групп его выпрямителя (б)

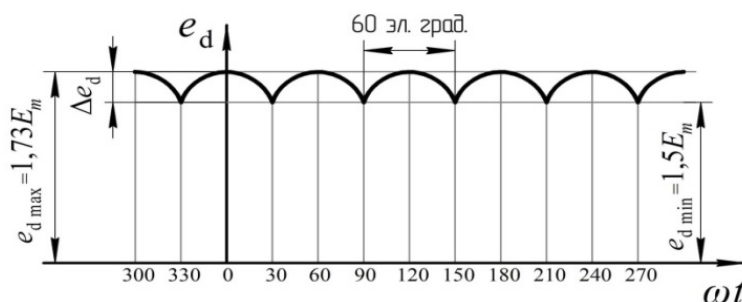


Рис. 4. Кривая выпрямленной ЭДС трехфазного вентильного генератора с двухполупериодным выпрямителем

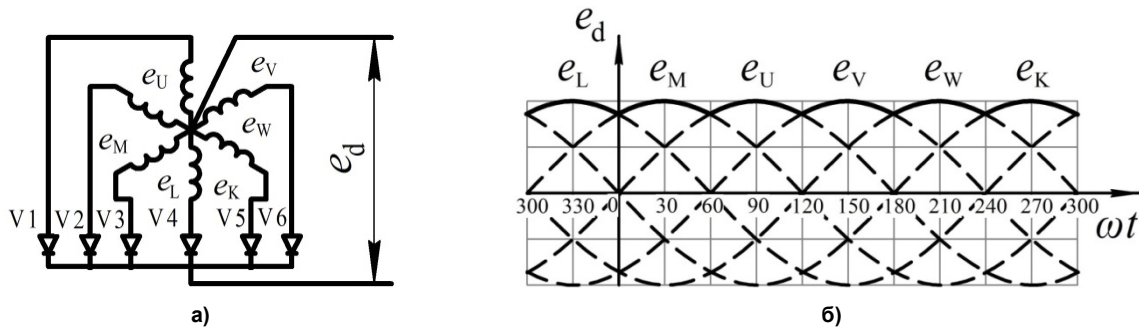


Рис. 5. Шестифазный вентильный генератор с однополупериодным выпрямителем (а) и кривая его выпрямленной ЭДС (сплошная линия) (б)

генератора, состоящего из синхронной машины с шестифазной обмоткой якоря ($m = 6$) и однополупериодным выпрямителем. На рис. 5б сплошной линией, образованной отрезками синусоид фазных ЭДС, изображена кривая мгновенных значений выпрямленной ЭДС этого генератора. По рис. 5б видно, что в такой машине частота пульсаций выпрямленной ЭДС в 6 раз превышает частоту фазной ЭДС, а период пульсации равен 60 эл. град. Следовательно, $\mu = 6$, $g = 0,06$.

Шестифазный генератор с двухполупериодным выпрямителем

Схема электрических соединений вентильного генератора, имеющего обмотку якоря с четным числом фаз ($m = 6$) и двухполупериодный (мостовой) выпрямитель, показана на рис. 6а. На рис. 6б сплошными линиями изображены потенциальные кривые его выпрямителя. По рис. 6б видно, что у шестифазного вентильного генератора, а также у генератора с любым другим четным числом фаз частота пульсации выпрямленной ЭДС при мостовом и однополупериодном выпрямителе имеет одно и то же значение. В данном случае кратность частоты пульсации по отношению к частоте ЭДС равна $\mu = 6$, следовательно, коэффициент пульсации $g = 0,06$. Таким образом, параметры пульсации остались такими же, как и у генератора с однополупериодным выпрямителем (см. рис. 5).

Рассчитанный указанным выше методом размах значений выпрямленной ЭДС (в долях амплитуды ЭДС) получается равным $\Delta e_d = 0,268E_m$.

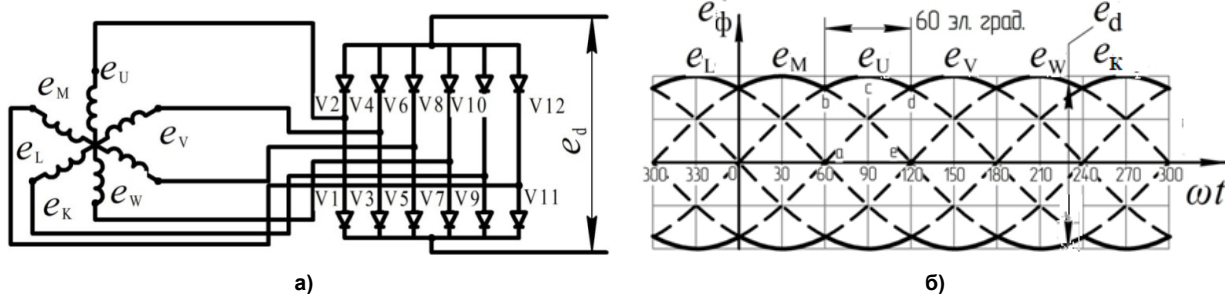


Рис. 6. Шестифазный генератор с двухполупериодным выпрямителем (а) и потенциальные кривые его выпрямителя (б)

При определении среднего значения выпрямленной ЭДС данного генератора учтем, что в силу симметрии потенциальных кривых можно выделить 12 одинаковых фрагментов, площадь каждого из них ограничена контуром $abcdea$ (см. рис. 6б). Тогда среднее значение выпрямленной ЭДС равно удвоенной средней ординате выделенного фрагмента

$$E_d = \frac{2E_m}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin \omega t \, d\omega t = 1,907E_m. \quad (9)$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \Delta e_{d\%} &= (\Delta e_d / E_d) \cdot 100 = \\ &= \frac{0,268}{1,907} 100 = 14,1\%. \end{aligned} \quad (10)$$

Из рис. 6б видно, что при четном числе фаз потенциальные кривые симметричны относительно оси ωt . Сравнивая рис. 3 и 6, убеждаемся, что при четном числе фаз амплитуда пульсации больше, а частота пульсации меньше.

Установленные закономерности имеют общий характер, что позволяет дать следующие рекомендации: для уменьшения пульсации выпрямленной ЭДС (напряжения) вентильного генератора при двухполупериодном выпрямителе число фаз генератора должно быть нечетным и наибольшим из возможных. Очевидно, что реализация предложения об увеличении числа фаз имеет ограничения, связанные с повышением трудоемкости изготовления машины и предъявленными к ней конкретными условиями и требованиями.

Рассмотрение потенциальных кривых (см. рис. 2б и 5б) показывает, что при однополупериодном выпрямителе выбор нечетного числа фаз обмотки не позволяет улучшить пульсационные характеристики вентильного генератора. Дело в том, что в этом случае у генераторов существует только одна, а именно верхняя (положительная) потенциальная кривая. Роль нижней потенциальной кривой при однополупериодном выпрямителе выполняет ось абсцисс ωt , а пульсационная характеристика машины тогда зависит лишь от мгновенных положительных значений фазных ЭДС.

Общий вывод – при однополупериодном выпрямителе коэффициент пульсации тем меньше, чем больше число фаз обмотки, и не зависит от того, четное или нечетное это число.

Шестифазный агрегатированный генератор

Шестифазная обмотка, как любая обмотка с четным числом фаз, при мостовом выпрямителе обладает повышенными пульсациями выпрямленной ЭДС. Вместе с тем такая обмотка имеет дополнительные возможности уменьшения амплитуды и повышения частоты пульсации e_d за счет того, что она разделяется на две одинаковые трехфазные обмоточные группы, обозначим их 1 UVW и 2 UVW. Группы взаимно смещены в пространстве на $1/6$ полюсного деления машины, а токи в них сдвинуты во времени на $1/12$ периода. Как будет видно далее, эти свойства шестифазной обмотки в сочетании с 12-пульсным выпрямителем позволяют значительно улучшить пульсационные характеристики вентильного генератора. Это же позволяет рассматривать шестифазный генератор как агрегат, состоящий из двух трехфазных вентильных генераторов, расположенных на одном валу и питающих составной выпрямитель, образованный двумя однополупериодными или мостовыми трехфазными выпрямителями. Соединение выпрямителей друг с другом может быть последовательным или параллельным, благодаря чему расширяются эксплуатационные характеристики агрегатированной машины [15–17]. Понятно, что в обоих случаях соединение выпрямителей должно обеспечивать их согласованную работу. Вентильный генератор, выполненный по такой схеме, далее будем называть агрегатированным, а якорную обмотку такого генератора – сдвоенной трехфазной.

Пульсационные характеристики агрегатированного генератора улучшаются за счет создания временного сдвига между выпрямленными (выходными) ЭДС трехфазных групп, равного половине периода пульсации и составляющего 30 эл. град., обеспечиваемого сдвоенной трехфазной обмоткой якоря электрической машины. Это позволяет в 2 раза повысить частоту и существенно уменьшить коэффициент пульсации выпрямленной ЭДС.

Дополнительные возможности улучшения характеристик синхронной машины при использовании шестифазной обмотки как сдвоенной трехфазной не остались незамеченными инженерным сообществом. Так, например, в 1965 году было предложено применить такой метод для улучшения гармонического состава выходного напряжения трехфазного генератора переменного тока [20]. Этот же подход положен в основу классической теории шестифазной обмотки [19]. Однако до настоящего времени шестифазная обмотка изучена довольно поверхностно. Данная работа является попыткой продолжить исследование возможностей, предоставляемых такой обмоткой.

Сдвоенная трехфазная обмотка может быть подключена к 12-пульсному ($\mu = 12$) выпрямителю. Для этого нужно каждую трехфазную группу соединить с мостовым выпрямителем. Относительный временной сдвиг между выходными (выпрямленными) ЭДС выпрямителей, равный 30 эл. град., получается за счет пространственного сдвига трехфазных групп относительно друг друга на статоре машины. Отметим, что количественные значения пульсации генератора одинаковы при последовательном и параллельном соединении выпрямителей. При этом для нормальной работы генератора при параллельном соединении выпрямителей необходимо дополнительное устройство – уравнивающий реактор $L_{ур}$, предназначенный для компенсации разницы мгновенных значений выпрямленных ЭДС трехфазных групп.

Электрическая схема агрегатированного вентильного генератора со сдвоенной трехфазной обмоткой и последовательным соединением двухполупериодных выпрямителей представлен на рис. 7а, на рис. 7б показаны кривые выпрямленных ЭДС «машин», составляющих агрегат. Как указано выше, между ними есть относительный временной сдвиг, равный 30 эл. град.

Кривые ЭДС e_{d1} и e_{d2} генератора по рис. 7 те же, что показаны на рис. 4. Численные значения этих величин подсчитаны для пяти значений $\omega t = 0; 15; 30; 45$ и 60 эл. град. приведены в табл. 1.

Кривые выпрямленных ЭДС e_{d1} и e_{d2} показаны на рис. 7б, при этом, как указано выше, между ними есть относительный временной сдвиг, равный 30 эл. град.

Процессы, происходящие в вентильном генераторе по рис. 7, можно пояснить следующим образом. В данном случае имеет место двухступенчатое повышение качества выпрямления. На первой ступени применение мостового выпрямителя в трехфазном вентильном генераторе в два раза повышает частоту выпрямленной ЭДС обмоточной группы относительно частоты линейной ЭДС. При этом параметры пульсаций становятся равными $\mu = 6$ и $g = 0,06$. Затем, на второй ступени, за счет относительного временного сдвига выпрямленных ЭДС выпрямителей на половину периода pulsa-

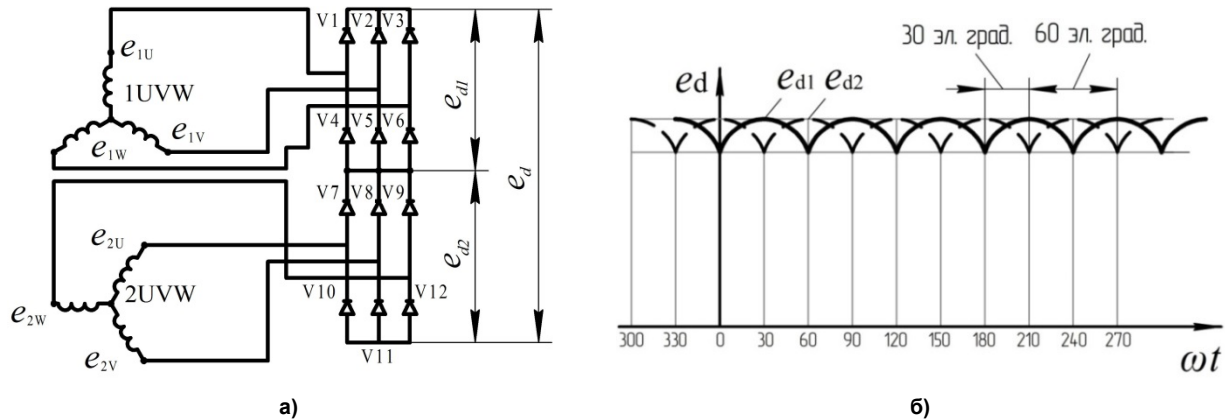


Рис. 7. Агрегатированный вентильный генератор со двояной трехфазной обмоткой и последовательно соединенными мостовыми выпрямителями (а) и кривые выпрямленных ЭДС его обмоточных групп (б)

Таблица 1

ωt	0	15	30	45	60
$e_{d1}/E_m, e_{d2}/E_m$	1,50	1,67	1,73	1,67	1,50

ций частота этих пульсаций еще раз удваивается. Одновременно в два этапа уменьшается период пульсации, который на первом этапе составляет 60 эл. град. и на втором этапе – 30 эл. град.

Кривая результирующей выпрямленной ЭДС e_d (ЭДС агрегатированного генератора) показана на рис. 8. Она имеет частоту пульсаций в 12 раз большую, чем частота линейных ЭДС ($\mu = 12$), и коэффициент пульсаций генератора принимает значение $g = 0,014$.

Из-за фазового сдвига между выпрямленными ЭДС «машин», составляющих агрегатированный генератор, мгновенное значение суммарной ЭДС e_d равно полусумме выпрямленных ЭДС обмоточных групп (табл. 2).

Значения остальных пульсационных параметров генератора по рис. 7 находим, используя рис. 8 и данные табл. 2.

$$\Delta e_d = (1,67 - 1,61)E_m = 0,06E_m. \quad (11)$$

Кривая e_d не описывается простым аналитическим выражением. Кроме того, значение «высоты дуг» этой кривой весьма мало по сравнению с ее постоянной частью. Поэтому определение величины E_d вполне допустимо произвести, принимая ее как некоторое среднее значение

$$E_d = [1,6 + (0,7 - 0,1)/3] E_m = 1,63 E_m.$$

Тогда

$$\Delta e_d^* = \frac{0,06E_m}{1,63E_m} 100 = 3,68 < 4 \%. \quad (12)$$

Обратим внимание на то, что между обмоточными группами отсутствует непосредственная гальваническая связь. Электрическое соединение (последовательное или параллельное) осуществляют только между выпрямителями. Напомним, что если выпрямитель имеет мостовую схему, то под выходной ЭДС следует понимать линейную ЭДС обмоточной группы.

Представленные выше материалы показывают,

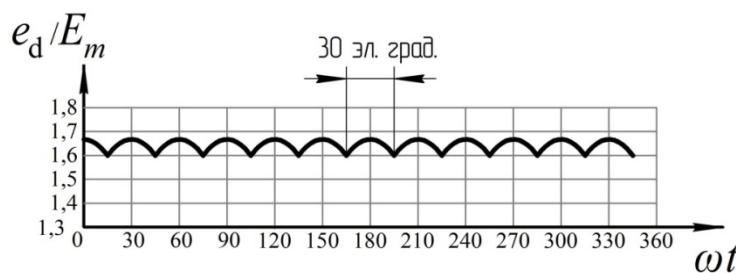


Рис. 8. Кривая выпрямленной ЭДС вентильного генератора по рис. 7

Таблица 2

ωt	0	15	30	45	60
e_{d1}	1,50	1,67	1,73	1,67	1,50
e_{d2}	1,73	1,67	1,50	1,67	1,73
$(e_{d1} + e_{d2})/2$	1,61	1,67	1,61	1,67	1,61

Таблица 3

Тип и число фаз обмотки, тип выпрямителя	№ рис.	Δe_d	E_d	$\Delta e_{d\%}^*$	μ	g
Простая трехфазная, однополупериодный	2	0,5	0,83	60,2	3	0,25
Простая трехфазная, мостовой	3	0,23	1,66	13,9	6	0,06
Обычная шестифазная, однополупериодный	5	–	–	–	6	0,06
Обычная шестифазная, мостовой	6	0,27	1,91	14,1	6	0,06
Сдвоенная трехфазная звезда, мостовой	8	0,06	1,63	< 4	12	0,014

Примечания:

1. Величины Δe_d и E_d даны в долях амплитуды фазной ЭДС E_m .
2. В обмотке «двойная трехфазная звезда» сдвиг между обмоточными группами равен 60 эл. град.
3. В сдвоенной трехфазной обмотке сдвиг между обмоточными группами равен 30 эл. град.

что вентильный генератор со сдвоенной трехфазной обмоткой и составным мостовым выпрямителем можно рассматривать как один из приемлемых вариантов при необходимости обеспечения высоких требований по ограничению пульсаций выпрямленного напряжения синхронных генераторов.

Результаты работы

Численные значения пульсационных параметров рассмотренных генераторов сведены в табл. 3.

Выводы

1. В работе проведен сравнительный анализ пульсационных характеристик вентильных генераторов с трех- и шестифазной обмоткой якоря и 3–12-пульсными выпрямителями. В качестве параметров, характеризующих пульсации, рассмотрены: относительный размах значений выпрямленной ЭДС, пульсность и коэффициент пульсации схемы выпрямления, определяемые по общепринятым методикам и соотношениям.

2. Показано, что при использовании двухполупериодного выпрямителя качество выпрямления зависит от того, четным или нечетным является число фаз якорной обмотки генератора. При однополупериодном выпрямителе четность (или нечетность) числа фаз не отражается на пульсационных характеристиках машины.

3. Существенно повысить качество выходного напряжения удается при использовании шестифазного агрегатированного вентильного генератора, якорная обмотка которого состоит из двух трехфазных групп, смещенных друг относительно друга на 30 эл. град. и подключенных к двум мостовым выпрямителям. Кроме того, такая конструкция позволяет дополнительно увеличить эксплуатационные свойства генератора за счет возможности соединения выпрямителей на выходе в последовательную или параллельную схему.

Литература

1. Балагуров, В.А. *Электрические генераторы с постоянными магнитами* / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

2. Ahmad Saad Aladsani. *Design of a Multiphase Hybrid Permanent Magnet Generator for Series Hybrid EV* / Ahmad Saad Aladsani, Omid Beik // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2018. – Vol. 33, iss. 3. – P. 1499–1507. DOI: 10.1109/TEC.2018.2828027

3. Brown, G. *Aviation Electricity and Electronics – Power Generation and Distribution* / G. Brown, L. Bovender. – Naval Education and Training Professional Development, 2002. – 68 p.

4. Duran, M. *Recent advances in the design, modeling and control of multiphase machines – Part 2* / M. Duran, F. Barrero // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2016. – Vol. 63, no. 1. – P. 459–468. DOI: 10.1109/TIE.2015.2448211

5. Al-Adsani, A.S. *Comparison of three- and nine-phase hybrid permanent magnet generator* / A.S. Al-Adsani, N. Schofield // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – P. 3880–3885. DOI: 10.1109/IECON.2009.5415351

6. Соловьев, В.А. *Моделирование тягового генератора и стенда для его испытания* / В.А. Соловьев // *Наука и образование*. – 2013. – № 3. – С. 385–412.

7. Siavash Sadeghi. *Wide operational speed range of five-phase permanent magnet machines by using different stator winding configurations* / Siavash Sadeghi, L. Guo, H.A. Toliyat, L. Parsa // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2012. – Vol. 59, no. 6. – P. 2621–2631. DOI: 10.1109/TIE.2011.2164771

8. Jordan, S. *Winding Configurations for Five-Phase Synchronous Generators with Diode Rectifiers* / S. Jordan, D. Manolopoulos Charalampos, J.M. Apsley // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2016. – Vol. 63, no. 1. – P. 517–525. DOI: 10.1109/TIE.2015.2493507

9. Jordan, S. *Diode Rectification of Multiphase Synchronous Generators for Aircraft Applications* / S. Jordan, J.M. Apsley // *Transactions of Energy Conversion Congress and Exposition*. – 2011. – P. 3208–3215. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6064201

10. *Comparison of conventional and unconventional 5-phase PM motor structures for naval applications* / F. Sculler, E. Semail, J.F. Charpentier, S. Clenet // *IASME Transactions*. – 2004. – Vol. 1, no. 2. – P. 365–371.

11. Levi, E. *Multiphase electric machines for variable-speed applications* / E. Levi // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2008. – Vol. 55. – P. 1893–1909. DOI: 10.1109/TIE.2008.918488

12. Xing-yuan, Li. *Performance of a Double-Star Synchronous Generator with Bridge Rectified Output* / Li Xing-yuan, O.P. Malik // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 1994. – Vol. 9, no 3. – P. 613–619. DOI: 10.1109/60.326482

13. *Development of a New Permanent-Magnet BLDC Generator Using 12-Phase Half-Wave Rectifier* / Z.R. Zhang, Y.G. Yan, S.S. Yang, B. Zhou // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56, no. 6. – P. 2023–2029. DOI: 10.1109/TIE.2009.2016511

14. Методика сопоставительной оценки вариантов вентиляционного генератора / С.И. Маслов, Г.С. Мыцык, Хлаинг Мин У, Ян Хаинг Мыинт // *Вестник МЭИ*. – 2014. – № 1. – С. 50–58.

15. Shamsi-Nejad M.A., Nahid-Mobarakeh B., Pierfederici S., Meibody-Tabar F. *Fault Tolerant and Minimum Loss Control of Double-Star Synchronous Machines Under Open Phase Conditions* / M.A. Shamsi-Nejad, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar // *IEEE Transactions on Industrial Elec-*

tronics. – 2008. – Vol. 55, no. 5. – P. 1956–1965. DOI: 10.1109/tie.2008.918485

16. *Investigation on Multi-Star Structures For Large Power Direct-Drive Wind Generator* / D. Vizireanu, S. Brisset, X. Kestelyn et al. // *Electric Power Components and Systems*. – 2007. – Vol. 35, no. 2. – P. 135–152. DOI: 10.1080/15325000600891093

17. *Polyphased modular direct-drive wind turbine generator* / D. Vizireanu, X. Kestelyn, S. Brisset et al. // *Transactions on 2005 European Conference on Power Electronics and Applications*. – 2005. – P. 1–9. DOI: 10.1109/EPE.2005.219658

18. *A starter-generator for a diesel power plant* / S.G. Voronin, A.I. Sogrin, P.O. Shaburov, B.D. Shumakov // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – Vol. 84, iss. 10. – P. 556–559. DOI: 10.3103/s1068371213100118

19. Жерве, Г.К. *Обмотки электрических машин* / Г.К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд., 1989. – 400 с.

20. А. с. 79623 СССР. М. кл.3/28. *Трехфазный генератор* / М.В. Липковский. – № 375375; заявл. 16.02.1948; опубл. 1965 г. Бюл. № 18. – 2 с.: ил.

Гомберг Борис Наумович, канд. техн. наук, ученый секретарь Научно-технического совета, АО «НПО «Электромашина», г. Челябинск.

Согрин Андрей Игоревич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sogrinai@susu.ru.

Мехваник Наталья Николаевна, начальник бюро сборочного производства отдела технологического сопровождения производства (ОТСП) блока главного технолога (БГТ), АО «НПО «Электромашина», г. Челябинск; natalya_74@list.ru.

Поступила в редакцию 20 марта 2019 г.

DOI: 10.14529/power190211

RIPPLE OF RECTIFIED EMF IN ALTERNATORS

B.N. Gomberg¹,

A.I. Sogrin², sogrinai@susu.ru,

N.N. Mehvanik¹, natalya_74@list.ru

¹ JSC NPO Electromashina, Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article discusses ways to reduce the ripple of rectified voltage in alternators based on synchronous electrical machines. To that end, the paper compares alternators that differ in the number of phases as well as in the circuitry of the semiconductor rectifier. The authors consider odd- and even-phased alternators with armature windings made of three-phase groups. Half-wave and full-wave rectifying circuits are considered. The ripple coefficient was used as the comparison criterion. Analysis reveals the performance with a relatively small number of phases can be maximized using an aggregated generator, the armature winding of which is divided into two parts offset by 30 electrical degrees against each other and connected to separate bridge rectifiers connected in series or parallel to the load.

Keywords: alternator, armature winding, rectifier, rectified voltage ripple, ripple coefficient.

References

1. Balagurov V.A., Galteev F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Permanent Magnet Electric Generators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 280 p.
2. Ahmad Saad Aladsani, Omid Beik. Design of a Multiphase Hybrid Permanent Magnet Generator for Series Hybrid EV. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, vol. 33, iss. 3, pp. 1499–1507. DOI: 10.1109/TEC.2018.2828027
3. Brown G., Bovender L. *Aviation Electricity and Electronics – Power Generation and Distribution*. Naval Education and Training Professional Development, 2002. 68 p.
4. Duran M., Barrero F. Recent Advances in the Design, Modeling and Control of Multiphase Machines – Part 2. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 459–468. DOI: 10.1109/TIE.2015.2448211
5. Al-Adsani A.S., Schofield N. Comparison of Three- and Nine-Phase Hybrid Permanent Magnet Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, pp. 3880–3885. DOI: 10.1109/IECON.2009.5415351
6. Solov'ev V.A. Simulation of a Traction Generator and Its Test Bench. *Science and Education*, 2013, no. 3, pp. 385–412. DOI: 10.7463/0313.0542271
7. Siavash Sadeghi, Guo L., H. Toliyat A., Parsa L., Wide Operational Speed Range of Five-Phase Permanent Magnet Machines by Using Different Stator Winding Configurations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 6, pp. 2621–2631. DOI: 10.1109/TIE.2011.2164771
8. Jordan S., Manolopoulos Charalampos D., Apsley J. M. Winding Configurations for Five-Phase Synchronous Generators with Diode Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 517–525. DOI: 10.1109/TIE.2015.2493507
9. Jordan S., Apsley J. M. Diode Rectification of Multiphase Synchronous Generators for Aircraft Applications. *Transactions of Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011, pp. 3208–3215. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6064201
10. Scuiller F., Semail E., Charpentier J.F., Clenet S. Comparison of Conventional and Unconventional 5-Phase PM Motor Structures for Naval Applications, *IASME Transfctions*, 2004, vol. 1, no. 2, pp. 365–371.
11. Levi E. Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, pp. 1893–1909. DOI: 10.1109/TIE.2008.918488
12. Xing-yuan Li, Malik O.P. Performance of a Double-Star Synchronous Generator with Bridge Rectified Output. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1994, vol. 9, no 3, pp. 613–619. DOI: 10.1109/60.326482
13. Zhang Z.R., Yan Y.G., Yang S.S., Zhou B. Development of a New Permanent-Magnet BLDC Generator Using 12-Phase Half-Wave Rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2023–2029. DOI: 10.1109/TIE.2009.2016511
14. Maslov S.I., Mytsyk G.S., Khlaing Min U, Yan Naing M'int [Methodology of Comparative Assessment of the Variant Types of Contactless Direct Current Generator]. *Bulletin of the MPEI*, 2014, no 1, pp. 50–58. (in Russ.)
15. Shamsi-Nejad M.A., Nahid-Mobarakeh B., Pierfederici S., Meibody-Tabar F. Fault Tolerant and Minimum Loss Control of Double-Star Synchronous Machines Under Open Phase Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 5, pp. 1956–1965. DOI: 10.1109/TIE.2008.918485
16. Vizireanu D., Brisset S., Kestelyn X., Brochet P., Milet Y., Laloy D. Investigation on Multi-Star Structures for Large Power Direct-Drive Wind Generator. *Electric Power Components and Systems*, 2007, vol. 35, no. 2, pp. 135–152. DOI: 10.1080/15325000600891093
17. Vizireanu D., Kestelyn X., Brisset S., Brochet P., Milet Y., Laloy D. Polyphased Modular Direct-Drive Wind Turbine Generator. *Transactions on 2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005, pp. 1–9. DOI: 10.1109/EPE.2005.219658
18. Voronin S.G., Sogrin A.I., Shaburov P.O., Shumakov B.D. A Sarter-Generator for a Diesel Power Plant. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, issue 10, pp. 556–559. DOI: 10.3103/S1068371213100118
19. Zherve G.K. *Obmotki elektricheskikh mashin* [Windings of Electrical Machines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1989. 400 p.
20. Lipkovskiy M.V. *Trekhfaznyy generator* [Three Phase Generator]. Patent of the USSR, no. 79623, 1965.

Received 20 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гомберг, Б.Н. Пульсации выпрямленного напряжения вентильного генератора / Б.Н. Гомберг, А.И. Согрин, Н.Н. Мехваник // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 97–106. DOI: 10.14529/power190211

FOR CITATION

Gomberg B.N., Sogrin A.I., Mehvanik N.N. Ripple of Rectified EMF in Alternators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 97–106. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190211