

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОФАЗНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МИНИ-ГЭС ПРИ РАБОТЕ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

А.М. Давлатов

Институт энергетики Таджикистана

В настоящей работе исследована эффективность многофазных синхронных генераторов применительно к гидроэлектростанциям малой и средней мощности. Как правило, эти электрические машины работают в автономном необслуживаемом режиме. Увеличение числа фаз обусловлено повышением надежности, так как для многофазных электрических машин выход из строя одной из фаз приводит к ухудшению параметров, но не полному отказу, при этом повышается эффективность работы самого генератора. В работе проведена оценка эффективности работы генераторов при увеличении числа фаз и различных схемах подключения к выпрямительному блоку. Число фаз изменялось от 3-х до 9-ти. Были рассмотрены схемы соединения в звезду, кольцо и мостовые схемы. В качестве показателя качества были приняты среднее значение выпрямленного напряжения и уровень пульсаций выпрямленного напряжения. Результаты анализа сведены в таблицы, которые удобно использовать в инженерной практике.

Ключевые слова: мини-ГЭС, обмотка генератора, многофазный генератор, выпрямитель, мостовое соединение, пульсации выпрямленного напряжения.

ТАДҚИҚИ САМАРАНОКИИ ГЕНЕРАТОРҲОИ СИНХРОНИИ БИСЁРФАЗАИ НЕУРОГОҲҲОИ БАРҚИ ОБИИ ХУРД ҲАНГОМИ ФАЪОЛИЯТ ДАР РЕҶАИ МУҚАРРАӢ

А.М. Давлатов

Ин кори илмӣ ба тадқиқи самаранокии генераторҳои синхронии бисёрфаза дар неругоҳҳои барқи оби иқтидорашон хурд ва миёна бахшида шудааст. Одатан, ин мошинаҳои барқӣ дар реҷаи мустақил (автономӣ) ва бидуни хизматрасонии доимӣ фаъолият мекунанд. Зиёд кардани шумораи фазаҳо бо мақсади баланд бардоштани эътимоднокӣ сурат гирифтааст, зеро дар мошинҳои барқии бисёрфаза аз қор баромадани яке аз фазаҳо боиси бад шудани нишондиҳандаҳо мегардад, вале боиси аз қор мондани пурраи дастгоҳ намешавад. Ҳамзамон, ин усул самаранокии кори худии генераторро низ афзун мегардонад. Дар ин қор арзёбии самаранокии фаъолияти генераторҳо ҳангоми афзоиши шумораи фазаҳо ва истифодаи нақшаҳои гуногуни пайвастишавӣ ба блоки росткунанда гузаронида шудааст. Шумораи фазаҳо аз 3 то 9 адад тағйир дода шуд. Схemaҳои пайвастишавии ситора, ҳалқавӣ ва схemaи пулак мавриди баррасӣ қарор гирифтанд. Ҳамчун нишондиҳандаи сифат, қимати миёнаи шиддати ростшуда ва сатҳи набзи (пульсатсияи) шиддати ростшуда қабул карда шуданд. Нагиҷаҳои таҳлил дар ҷадвалҳо ҷамъбаст гардидаанд, ки истифодаи онҳо дар таҷрибаи муҳандисӣ қулай мебошад.

Калидвожаҳо: НБО-хурд, печаи генератор, генератори бисёрфаза, росткунанда, пайвасти пулакӣ, набзи шиддати ростшуда.

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF MULTIPHASE SYNCHRONOUS GENERATORS OF MINI HYDROPOWER PLANTS UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS

A.M. Davlatov

The present work investigates the efficiency of multiphase synchronous generators for small and medium-capacity hydropower plants. Generally, these electrical machines operate in an autonomous, unattended mode. The increase in the number of phases is driven by the need for higher reliability; in multiphase machines, a single-phase failure results in performance degradation rather than a total system shutdown, while simultaneously improving the overall efficiency of the generator. This study evaluates the operational efficiency of generators across an increased number of phases and various connection schemes to the rectifier unit. The number of phases was varied from 3 to 9. Star, ring (polygon), and bridge connection schemes were examined. The average value of the rectified voltage and the ripple factor (ripple level) were used as quality indicators. The analysis results are summarized in tables, which are convenient for use in engineering practice.

Keywords: mini hydropower plant (Mini HPP); generator winding, multiphase generator, rectifier, bridge rectifier connection, rectified voltage ripple.

Вводные замечания

Современный вектор развития мировой энергетики продиктован необходимостью минимизации экологического ущерба, возникающего при сжигании углеводородного топлива. В поиске устойчивых альтернатив особое место занимает гидроэнергетика [13-17]. Благодаря значительным природным запасам и относительной равномерности их распределения освоение энергии воды технологически более доступно по сравнению с ядерным синтезом или биоэнергетическими установками. Очевидно, что текущие темпы развития крупных гидротехнических объектов не способны компенсировать прогрессирующий глобальный энергодефицит.

В связи с вышеизложенным, актуальной научной задачей становится количественная и качественная оценка работы гидрогенераторов при варьировании числа фаз в условиях номинального режима эксплуатации. Настоящая работа посвящена частичному решению данной задачи, предлагая методику анализа эффективности многофазных машин.

Варианты подключения фаз в системе генератор-выпрямитель

Исторически автономное использование многофазных генераторов было ограничено узким сегментом специализированных сетей, что препятствовало их массовому внедрению. Однако в современной энергетике возрастает интерес к синхронному генератору — выпрямителю, где многофазная машина формирует звено постоянного тока. Следовательно, традиционные методы расчета, применимые для классических сетей, оказываются некорректными для систем с выпрямительными мостами. Это обуславливает необходимость разработки уточненной математической модели, учитывающей импульсный характер токов и нелинейность взаимодействия обмоток генератора с преобразовательным звеном. Указанная специфика работы фаз на полупроводниковый преобразователь неизбежно ведет к снижению энергетического КПД генераторной установки [1-3].

Согласно теоретическим исследованиям [4-7], при проектировании систем «генератор – выпрямитель» рассматриваются следующие базовые способы сочленения фазных обмоток (рис. 1):

- соединение фаз в звезду;
- соединение фаз в кольцо;
- соединение фаз в мосту независимо друг от друга.

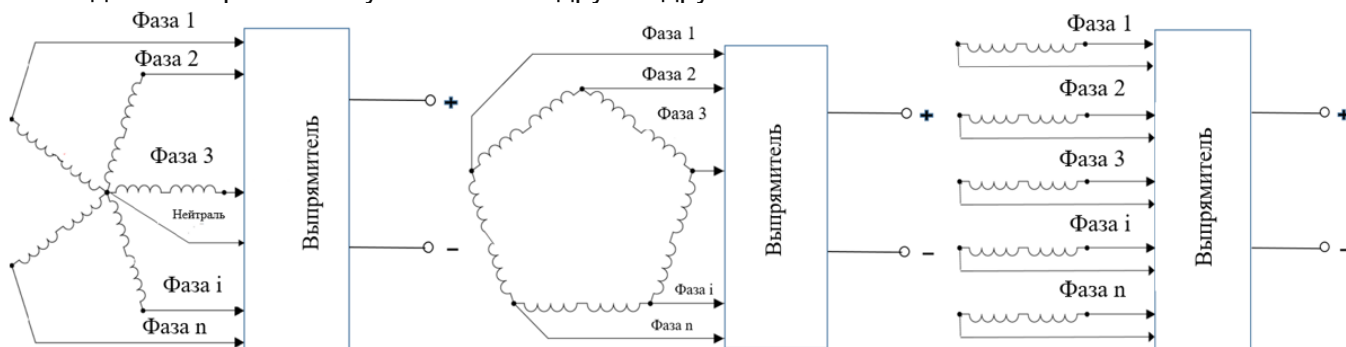


Рисунок 1– Соединение фаз: а – звезду: б – треугольник: в – мостовое соединение

Для определения оптимальной конфигурации системы «генератор - выпрямитель» необходимо провести комплексную оценку функционирования многофазных машин при их интеграции с различными типами преобразовательных схем.

Анализ работы многофазного генератора на однополупериодный выпрямитель

В рамках исследования нормального режима работы рассмотрим m -фазную генераторную установку, нагруженную на однополупериодный выпрямитель. С точки зрения схемотехники, единственно возможной конфигурацией для реализации такого режима является соединение фазных обмоток по схеме «звезда» с обязательным выводом нейтральной точки.

Принципиальная электрическая схема исследуемого соединения и способ интеграции полупроводниковых диодов отражены на рис. 2.

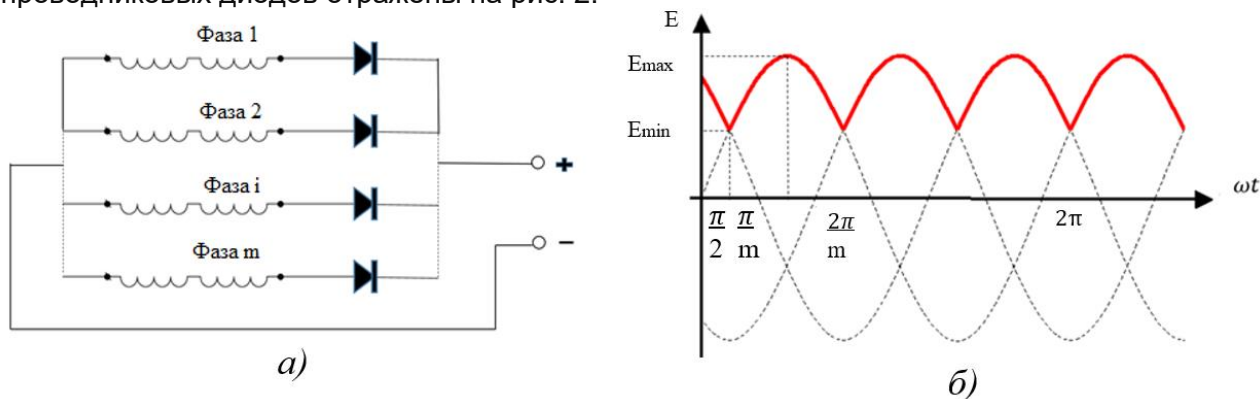


Рисунок 2 – Однополупериодный выпрямитель m -фазного генератора: а) принципиальная схема; б) зависимость выпрямленного напряжения

Детальное изучение графических закономерностей, представленных на рис. 3, позволяет систематизировать ключевые параметры функционирования выпрямительного узла. Результаты проведенного анализа дают возможность количественно описать рабочие характеристики системы и выявить их корреляцию с числом фаз генератора.

Угол, при котором выпрямитель имеет минимальное напряжение:

$$\alpha_{min} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}, \quad (1)$$

где m – число фаз.

Угол, при котором выпрямитель имеет максимальное напряжение:

$$\alpha_{max} = \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

Соответственно, минимальное напряжение определится по формуле:

$$E_{min} = E_m \sin(\alpha_{min}). \quad (3)$$

Максимальное напряжение будет равно амплитуде фазного напряжения генератора E_m :

$$E_{max} = E_m. \quad (4)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{срkv} = \frac{m \int_{\alpha_{min}}^{\frac{\pi}{2}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi} \quad (5)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{ср} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}. \quad (6)$$

Пульсации выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$\Delta E = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}. \quad (7)$$

Следовательно, расчет коэффициента использования обмотки якоря должен базироваться на учете скажности токовых импульсов. Математически данный показатель, отражающий степень интеграции активных материалов в процесс передачи мощности, описывается следующим выражением:

$$K_{исп_якоря} = \frac{1}{m} \quad (8)$$

Для проведения количественного анализа и выявления закономерностей целесообразно представить исследуемые характеристики в нормированном виде. В ходе вычислительного эксперимента число фаз (m) варьировалось в диапазоне от 3 до 9. Сводные результаты расчетов, отражающие влияние фазности на выходные показатели системы, систематизированы в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели однополупериодного выпрямителя для различного количества фаз

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{срkv}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{ср}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{исп_якоря}$
3	0,827	0,75	0,333	0,333
4	0,9	0,854	0,172	0,25
5	0,935	0,905	0,106	0,2
6	0,955	0,933	0,072	0,167
7	0,967	0,95	0,052	0,143
8	0,974	0,962	0,04	0,125
9	0,98	0,97	0,31	0,111

Обобщая результаты анализа однополупериодных схем, можно констатировать наличие выраженного технического противоречия. С одной стороны, наращивание числа фаз способствует оптимизации формы выходного напряжения и снижению коэффициента пульсаций.

Анализ работы многофазного генератора на двухполупериодный выпрямитель

Для двухполупериодного выпрямителя возможны два варианта соединения фаз: в звезду и в кольцо [8-10]. Исследуем оба варианта для режима холостого хода. Принципиальная электрическая схема данного варианта представлена на рис. 4.

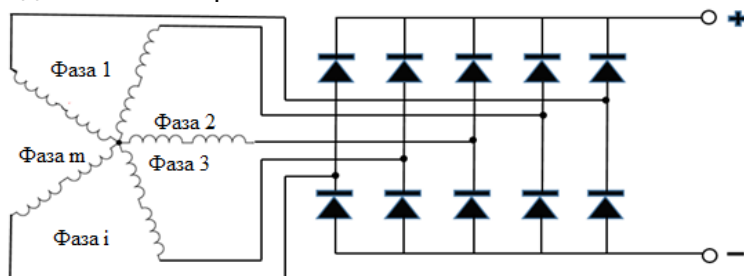


Рисунок 3 – Принципиальная схема m -фазного генератора и двухполупериодного выпрямителя при соединении фаз в звезду

При эксплуатации m -фазного генератора, обмотки которого соединены по схеме «звезда», в связке с двухполупериодным мостовым преобразователем проявляется специфический характер распределения токовых нагрузок. Выбор активных фаз определяется принципом экстремальных потенциалов: в работу вовлекаются те обмотки, мгновенные значения ЭДС которых в данный интервал времени достигают максимального положительного и максимального отрицательного уровней относительно нейтральной точки.

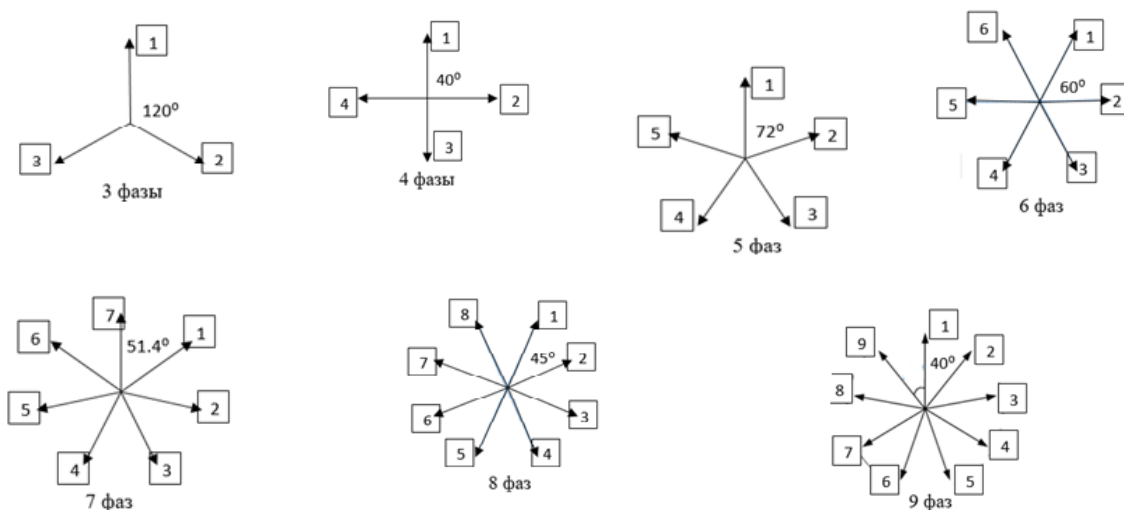


Рисунок 4 – Углы между фазами для многофазного генератора

Зависимость выпрямленного напряжения при произвольном числе фаз, соединенных в звезду, для двухполупериодного выпрямления показана на рис. 5.

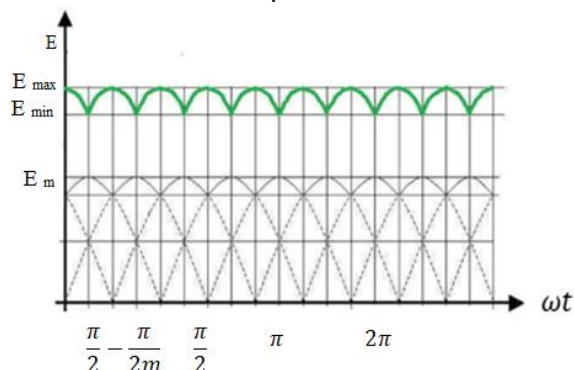


Рисунок 5 – Зависимость выпрямленного напряжения при произвольном числе фаз, соединенных в звезду, для двухполупериодного выпрямления

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{\text{срkv}} = \frac{m \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi} \quad (9)$$

Для удобства сравнительного анализа сведем параметры двухполупериодного многофазного выпрямления при соединении фаз в звезду в табл. 2.

Таблица 2 – Показатели двухполупериодного выпрямителя для различного количества фаз, соединенных в звезду

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{\text{срkv}}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{\text{ср}}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{\text{исп_якоря}}$
3	1,654	1,616	0,072	0,667
4	1,949	1,924	0,04	0,5
5	1,871	1,856	0,025	0,4
6	1,977	1,966	0,017	0,333
7	1,934	1,925	0,013	0,286
8	1,987	1,981	0,0097	0,25
9	1,96	1,955	0,00765	0,222

Сравнительный анализ параметров табл. 1 и табл. 2. показывает, что двухполупериодная коммутация имеет преимущество перед однополупериодной, включая коэффициент использования меди обмотки якоря.

Соединение фаз в кольцо. Принципиальная схема этого варианта представлена на рис. 6.

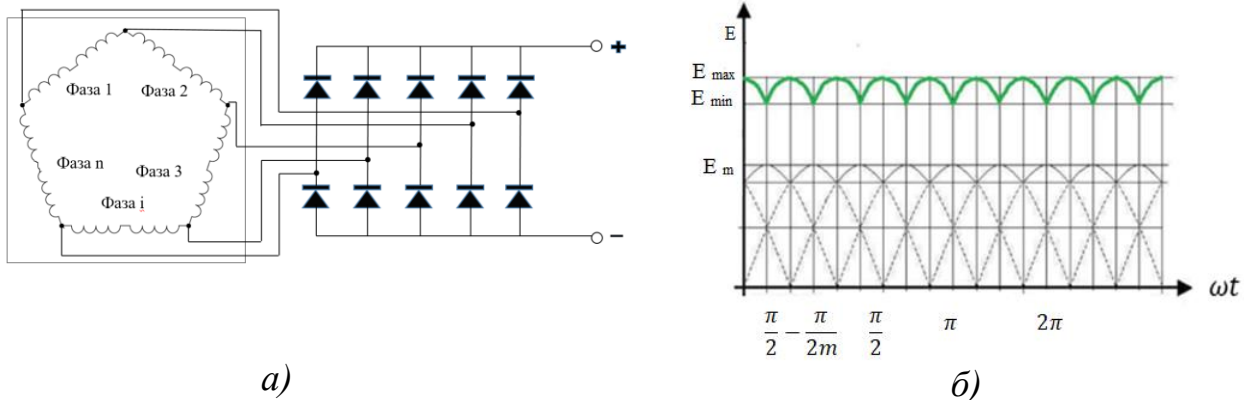


Рисунок 6 – *m*-фазный генератор и двухполупериодная выпрямления: а) принципиальная схема; б) график выпрямленного напряжения

Фундаментальный алгоритм функционирования двухполупериодной схемы остается неизменным и в данной конфигурации. Состояние проводимости по-прежнему ограничивается парой вентилей, коммутирующих фазы с наибольшей разностью потенциалов (наивысшим положительным и наиболее низким отрицательным значениями ЭДС). Поведение кривой выпрямленного напряжения в данном случае идентична осциллограмме, характерной для схемы «звезда» (рис. 8). Однако, несмотря на визуальное сходство формы сигнала, его энергетические показатели претерпевают изменения

Поскольку по всем фазам будет протекать ток, так как они будут находиться либо в одной, либо в другой параллельной ветви, то коэффициент использования меди якоря можно принять $K_{\text{исп_якоря}} = 1$.

Таблица 3 – Показатели двухполупериодного выпрямителя для различного количества фаз, соединенных в кольцо

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{срkv}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{ср}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{исп_якоря}$
3	0,955	0,933	0,072	1,0
4	1,378	1,36	0,04	1,0
5	1,592	1,578	0,025	1,0
6	1,977	1,966	0,017	1,0
7	2,228	2,219	0,013	1,0
8	2,596	2,588	0,0097	1,0
9	2,865	2,721	0,00765	1,0

Сопоставление расчетных данных, систематизированных в табл. 2 и 3, позволяет выявить нелинейную зависимость эффективности преобразования от числа фаз генерирующей системы. В диапазоне малой фазности конфигурация «звезда» демонстрирует более высокие показатели выпрямленной ЭДС по сравнению с кольцевым соединением. Точкой инверсии данных характеристик является шестифазная система ($m=6$), где обе топологии демонстрируют идентичные параметры выходного напряжения.

Анализ работы многофазного генератора на полную мостовую схему выпрямления

Принципиальная схема этого варианта представлена на рис. 7.

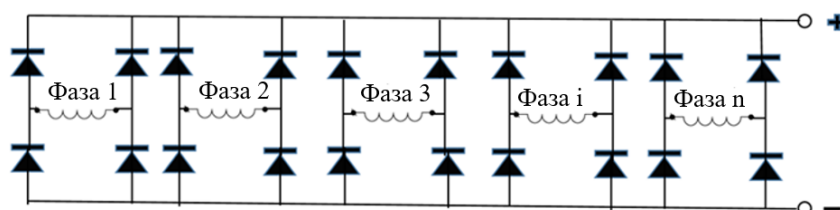


Рисунок 7 – Принципиальная схема многофазного генератора с полной мостовой схемой выпрямления при параллельном соединении мостов

Механизм функционирования системы в режиме холостого хода характеризуется выраженной селективностью: диоды моста, находящегося под воздействием наибольшей мгновенной ЭДС, запирают вентили остальных мостовых групп, потенциалы которых на данном временном интервале ниже. Таким образом, в отсутствие нагрузки генерирование выходного напряжения обеспечивается исключительно одним мостом, обладающим наивысшим энергетическим потенциалом в текущем такте.

Графическая интерпретация зависимости выходного напряжения для данного критического случая приведена на рис. 10. Данный подход позволяет определить минимально гарантированный уровень энергетических показателей установки при неблагоприятных условиях коммутации.

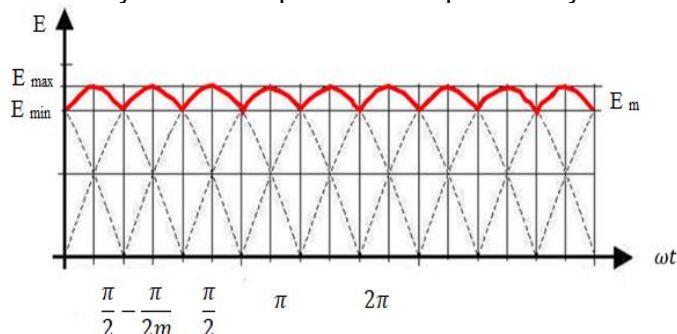


Рисунок 8 – Зависимость выпрямленного напряжения для многофазного генератора с полной мостовой схемой выпрямления при параллельном соединении мостов

Для удобства сравнительного анализа сведем параметры двухполупериодного многофазного выпрямления при соединении фаз в звезду в табл. 4.

Таблица 4 – Показатели полного мостового выпрямителя для различного количества фаз при параллельном соединении мостов.

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{срkv}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{ср}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{исп_якоря}$
3	0,955	0,933	0,072	0,333
4	0,974	0,962	0,04	0,25
5	0,984	0,976	0,025	0,2
6	0,989	0,983	0,017	0,167
7	0,992	0,987	0,013	0,143
8	0,994	0,99	0,0097	0,125
9	0,995	0,992	0,00765	0,111

Из таблицы видно, что данная схема имеет хорошие показатели по пульсациям, но небольшое значение выпрямленного напряжения - низкий коэффициент использования обмотки якоря.

Последовательное соединение мостов

Принципиальная схема этого подсоединения фаз к выпрямителю представлена на рис. 9, а), ее зависимость выпрямленного напряжения – рис. 9, б).

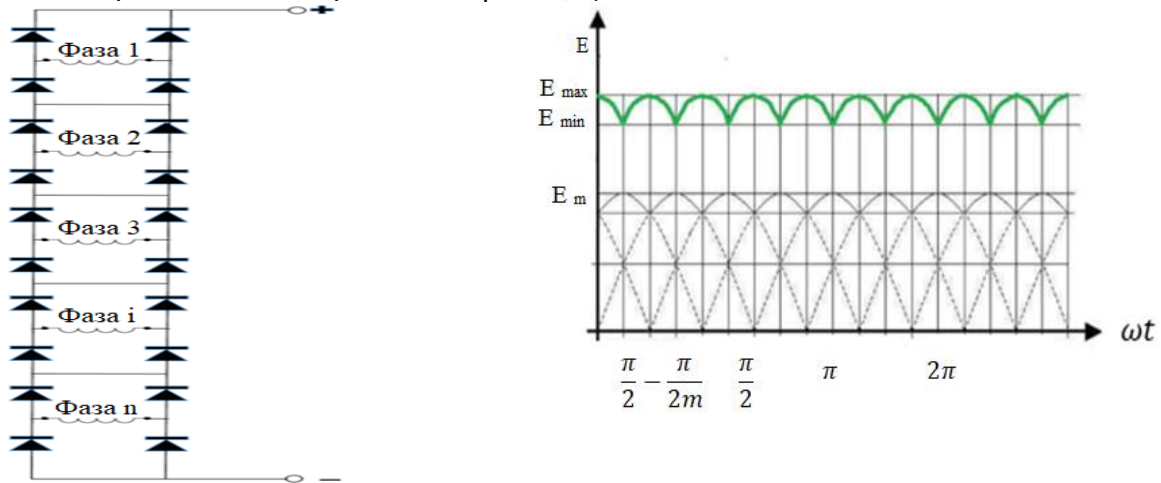


Рисунок 11 – Многофазный генератор с полной мостовой схемой: а) принципиальная схема выпрямления; б) зависимость выпрямленного напряжения

Рассматриваем полученные параметры при исследованиях многофазного генератора с мостовой схемой в таблице 5.

Таблица 5 – Показатели полного мостового выпрямителя для различного количества фаз при последовательном соединении мостов.

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{срkv}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{ср}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{исп_якоря}$
3	1,91	1,886	0,072	1,0
4	1,949	1,924	0,04	1,0
5	2,748	2,724	0,025	1,0
6	3,954	3,932	0,017	1,0
7	4,454	4,435	0,013	1,0
8	4,747	7,782	0,0097	1,0
9	5,73	5,71	0,00765	1,0

Из табл. 5 видно, что этот выпрямитель имеет наибольшую среднюю ЭДС, низкий уровень пульсаций и хороший коэффициент использования якорной обмотки.

Сравнительный анализ схем выпрямления

В ходе выполненного исследования были определены фундаментальные электроэнергетические характеристики системы «многофазный генератор — преобразователь». Расчетный базис включил в себя определение действующих (среднеквадратичных) и средних значений напряжения, а также амплитудно-частотных показателей пульсаций для широкого спектра схемотехнических решений: от классических однополупериодных схем до мостовых двухполупериодных выпрямитель.

Детальный анализ эксплуатационных параметров выявляет ряд системных ограничений, присущих схемам с однополупериодным преобразованием. Фундаментальным недостатком данной конфигурации является крайне низкая эффективность использования активных материалов статора. Это обусловлено дискретным характером коммутации: в любой произвольный момент времени токовую нагрузку несет лишь одна фазная обмотка [11-12].

Переход от однополупериодных схем к двухполупериодным (мостовым) характеризуется качественным скачком энергетических показателей преобразовательного узла. Физическая природа данного улучшения кроется в увеличении плотности распределения нагрузки: в каждый дискретный момент времени в процессе энергообмена участвует большее число фазных обмоток.

Качественные показатели напряжения (пульсации) в двухполупериодном режиме значительно выше, чем в однополупериодном, причем для топологий «звезда» и «кольцо» коэффициенты пульсаций идентичны. Ключевым сдерживающим фактором внедрения мостовых схем является усложнение аппаратной части: количество силовых полупроводниковых приборов (диодов) возрастает ровно в 2 раза.

Представленные в работе расчетные данные, систематизированные по типам выпрямительных схем и числу фаз, могут служить надежным инструментарием в инженерной практике при проектировании и оптимизации систем малой гидроэнергетики. Однако для обеспечения валидности сравнительного анализа необходимо строгое соблюдение критериев подобия. Стоит признать, что достижение абсолютной идентичности объектов исследования является актуальной задачей [12].

Выводы

Проведенное исследование комплексных систем «многофазный генератор -выпрямитель» позволило сформулировать следующие ключевые выводы:

1. Выявлено, что схемы с однополупериодным выпрямлением значительно уступают двухполупериодным и мостовым аналогам по всем базовым критериям: уровням действующего и среднего напряжений, а также коэффициенту пульсаций. Данный вариант характеризуется низкой энергетической плотностью и не рекомендуется для использования в современных генерирующих установках.

2. В рамках анализа двухполупериодного выпрямления выявлено, что наиболее рациональной топологией является соединение фазных обмоток в кольцо (многоугольник). Данная конфигурация обеспечивает прирост выходных энергетических показателей при сохранении идентичного со схемой «звезда» уровня пульсаций, что делает её оптимальным решением по критерию «эффективность — сложность».

3. Перспективность последовательных полномостовых схем: максимальные значения среднего и среднеквадратичного напряжений при минимальном уровне высокочастотных пульсаций достигаются при последовательном соединении мостовых групп.

Рецензент: Абдуллозода Р.П. — к.т.н., доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергетических систем» ПЭИУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Davlatov, A.M. Development of reliability model for a multiphase synchronous generator with an uncontrolled rectifier / A.M. Davlatov, N. Kh. Odinaev, A.Z. Rakhmatulloev // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies. – 2024. – No. 4(68). – P. 63-71. – EDN HMJYRA.

2. Сравнительная оценка схем соединения обмоток синхронных генераторов в составе источников постоянного тока / С. Г. Воронин, Н. В. Клиначев, А.М. Давлатов, Д. В. Пауков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 110-118. – DOI 10.14529/power200311. – EDN XYIDHD.

3. Воронин, С.Г. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана / С.Г. Воронин, А.М. Давлатов, О.О. Султонов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 100–107. DOI: 10.14529/power190311
4. Efficiency of power supply systems in remote and mountainous areas of the Republic of Tajikistan / D. Yu. Gulov, Kh. D. Boboev, A. M. Davlatov [et al.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – No. 1(61). – P. 34-41. – EDN ANOJWA.
5. Давлатов, А. М. Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса мини-ГЭС на базе многофазного вентильного генератора: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Давлатов Азамджон Махмадиевич, 2022. – 169 с. – EDN XWLGHX.
6. Voronin, S. Comparative evaluation of connection schemes of synchronous generator windings as part of Dc sources / S. Voronin, A. Davlatov, B. Kosimov // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112072. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112072. – EDN PZKKUV.
7. Воронин, С. Г. Мостовой инвертор как преобразователь напряжения для автономных трёхфазных сетей малой мощности / С. Г. Воронин, О. О. Султонов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 11. – С. 408-416. – EDN ADPWGI.
8. Анализ эффективности мини-ГЭС систем электроснабжения горных районов Республики Таджикистан / А. М. Давлатов, Х. Д. Бобоев, Д. Ю. Гулов, Р. Т. Абдуллозода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 120-126. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-12-120-127. – EDN MAGEIN.
9. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов / Д.А. Бут. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
10. Research of field magnetic motive force of non-salient pole synchronous generator with field windings inter-turn short circuit / Hou, J., Li, H., Li, J., Hu, J. // Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering - 2010. 30(SUPPL.), P. 220-225.
11. Development of a data glove with reducing sensors based on magnetic induction / Fahn, C.-S., Sun, H. // IEEE Transactions on Industrial Electronics -2005-no 52(2), P. 585-594.
12. Comparison of two types of dual layer generator in field assisted mode utilizing 3D-FEM and experimental verification / Afjei, E., Torkaman, H. // Progress In Electromagnetics Research – 2010. - no 23, P. 293-309.
13. Бобоев, Х. Д. Оценка вероятности возникновения электроопасной ситуации в сетях 6-10 КВ / Х. Д. Бобоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 2(62). – С. 13-17. – EDN TVGYBW.
14. Джураев, Ш. Д. Обеспечение качества электрической энергии в энергосистемах, содержащих нелинейную нагрузку / Ш. Д. Джураев, Ш. М. Султонов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – № 1(41). – С. 20-34. – EDN XSBYYR.
15. Экспериментальное исследование, анализ и оценка показателей качества электроэнергии в электрической сети 0,4кВ образовательного учреждения / С. А. Абдулкеримов, Х. Б. Назиров, М. М. Камолов [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – № 3(43). – С. 16-20. – EDN VNQAKJ.
16. Эффективность выработки электроэнергии посредством преобразования солнечной энергии в условиях Южного Таджикистана / А. Я. Абдурахмонов, Н. Х. Одинаев, Б. Т. Абдуллоев, Р. Т. Абдуллозода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 3(47). – С. 10-14. – EDN JBJFDJ.
17. Фишов, А. Г. Анализ состояния и направление развития малой гидроэнергетики таджикистана / А. Г. Фишов, А. Х. Гуломзода, Л. С. Касобов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 1(45). – С. 13-22. – EDN VJUIVK.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ – МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ – INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Давлатов Азамжон Махмадиевич	Давлатов Азамджон Махмадиевич	Davlatov Azamjon Mahmadievich
н.и.т.	к.т.н.	Ph.D.
Донишкадаи энергетикаи Тоҷикистон	Институт энергетикаи Тоҷикистона	Institute of Power Engineering of Tajikistan
E-mail: davlatov_azam@bk.ru		
https://orcid.org/0009-0008-5095-6939		