

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Г. А. Сипайлов, А. Б. Цукублин

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Замена коллекторных генераторов постоянного тока системами с полупроводниковыми устройствами требует разрешения проблемы получения качественного постоянного напряжения при ограниченном числе выпрямительных элементов. В связи с этим необходимо произвести оценку влияния схемы выпрямления и числа фаз генератора при различных нагрузках на выходе выпрямителя по величине и типу (активная, емкостная, индуктивная) на величину переменной составляющей выпрямленного напряжения.

Из известных в настоящее время в теории выпрямительных устройств способов оценки переменной составляющей выпрямленного напряжения [1, 2, 3, 4] авторами использовались для анализа два метода: оценка величины пульсации по амплитудному значению [1] и по эффективному значению [4]. Анализ переменной составляющей выпрямленного напряжения целесообразнее всего провести на примере мостовой схемы выпрямления, показанной на рис. 1. Известно, что выпрямленное напряжение является суммой потенциалов положительного и отрица-

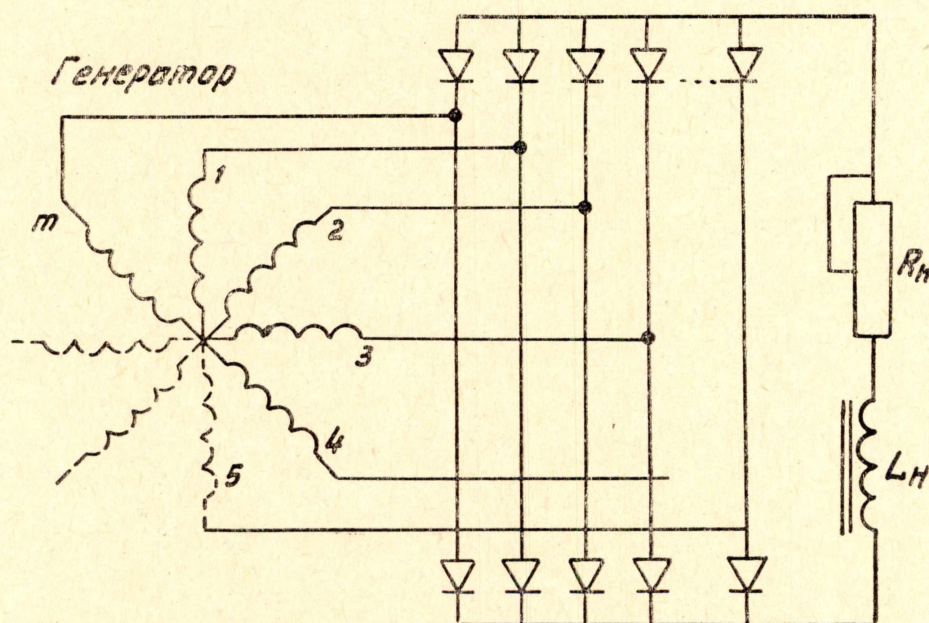


Рис. 1. Принципиальная схема генератора.

тельного полюсов. Однако для получения аналитического выражения величины пульсации необходимо совместить во времени потенциалы полюсов, учитывая фазовый сдвиг. При этом величина пульсации, как и среднее значение, зависит от четности или нечетности числа фаз (рис. 2а, б). Если считать, что генератор обеспечивает синусоидальную систему фазных эдс.

$$e_k = E_m \sin \left[ \nu - (k - 1) \frac{2\pi}{m} \right] \quad k = 1, 2, 3 \dots m$$

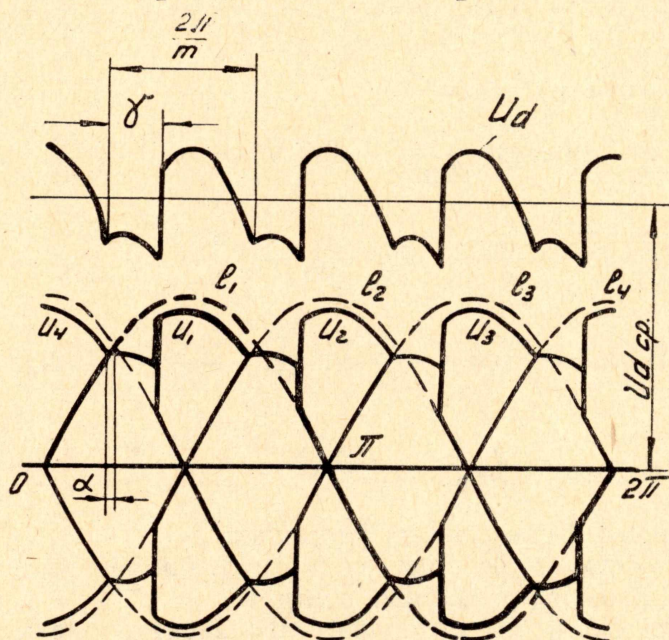
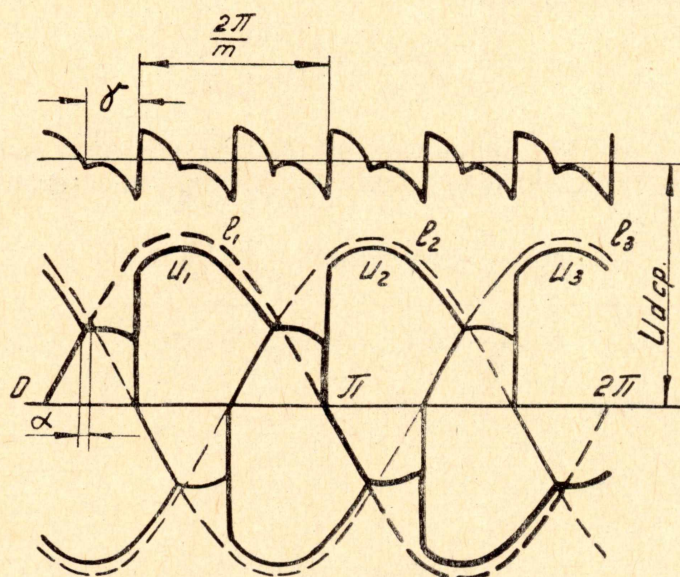


Рис. 2. Выпрямленное и фазные напряжения генератора. а)  $m$ —нечетному числу ( $m=3$ )



б)  $m$ —четному числу ( $m=4$ )

(в качестве эдс  $e_k$  следует принимать эдс в зазоре синхронного генератора), то с учетом угла коммутации и естественного угла зажигания [5] выпрямленное напряжение может быть определено за период изменения следующими выражениями:

при  $m = \text{четному числу}$

$$U_d(\nu) = 2E_m \cos \frac{\pi}{m} \sin \left( \nu + \frac{\pi}{m} \right) - I_d r'$$

$$\nu = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \alpha + \gamma$$
(1)

$$U_d(\nu) = 2E_m \sin \nu - 2I_d r' \quad \nu = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \alpha + \gamma + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} - \alpha$$

при  $m = \text{нечетному числу}$

$$U_d(\nu) = 2E_m \cos^2 \frac{\pi}{2m} \cdot \sin \left( \nu + \frac{\pi}{m} \right) - \frac{3}{2} I_d r'$$

$$\nu = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \alpha + \gamma$$
(2)

$$U_d(\nu) = 2E_m \cos \frac{\pi}{2m} \sin \left( \nu + \frac{\pi}{2m} \right) - 2I_d r'$$

$$\nu = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \alpha + \gamma + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} - \alpha,$$

где  $\nu = \omega t$  — время в синхронных радианах,  
 $r' = r_\phi + r_b$  — сумма активных сопротивлений генератора и прямого сопротивления вентиля.

Выражения (1) и (2) позволяют производить оценку числа фаз с точки зрения пульсаций выпрямленного напряжения как по амплитудным значениям, так и по гармоническим составляющим.

Амплитудное значение пульсации выпрямленного напряжения может быть представлено как

$$\varepsilon_M = \frac{U_d(\nu)_{\max} - U_d(\nu)_{\min}}{U_d(\nu)_{\max} + U_d(\nu)_{\min}}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражения максимального и минимального напряжений в соответствии с (1) и (2), получим, что при  $m = \text{четному числу}$

$$\varepsilon_M = \frac{1 - \cos \frac{\pi}{m} \cos(\gamma - \alpha) - \sin \alpha \sin \frac{\pi}{m}}{1 + \cos \frac{\pi}{m} \cos(\gamma - \alpha) - 3 \sin \alpha \sin \frac{\pi}{m}}, \quad (4)$$

а при  $m = \text{нечетному числу}$ , если

$$\gamma \leq \frac{\pi}{2m} + \alpha$$

$$\varepsilon_M = \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2m} \cos(\gamma - \alpha) - \sin \alpha \sin \frac{\pi}{2m}}{1 + \cos \frac{\pi}{2m} \cos(\gamma - \alpha) - 7 \sin \alpha \cdot \sin \frac{\pi}{2m}} \quad (5)$$

и если  $\gamma > \frac{\pi}{2m} + \alpha$ , то

$$\varepsilon_M = \frac{\sin(\gamma - \alpha) - \sin \alpha}{\sin(\gamma - \alpha) + 2 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2m} \cos(\gamma - \alpha) - 7 \sin \alpha} \quad (6)$$

Анализ выражений (4) ÷ (6) убедительно показывает, что при четном числе фаз амплитудное значение пульсации выпрямленного напряжения значительно больше, чем при нечетном, даже при относительно больших нагрузках генератора. Так, по величине абсолютного значения переменной составляющей при малых углах коммутации шестифазная мостовая схема эквивалентна трехфазной, а пятифазная система дает пульсации меньше восьмифазной даже при значительных относительных углах коммутации (рис. 3). Если к тому же учесть, что при увеличении числа фаз уменьшается коэффициент использования генератора [5], то при выполнении бесколлекторного генератора постоянного тока предпочтительнее выбор нечетного числа фаз.

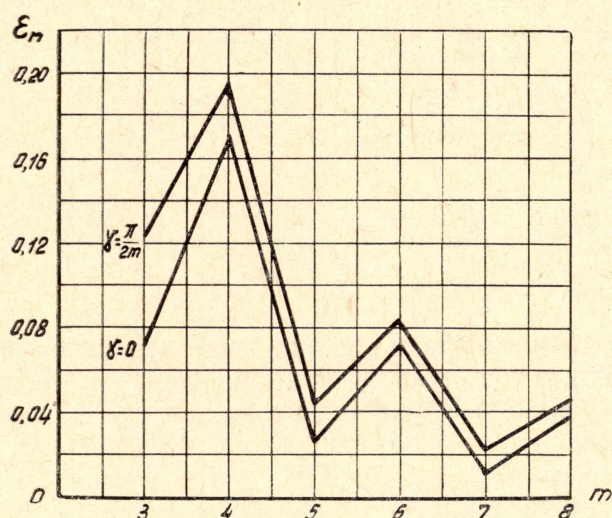


Рис. 3. Зависимость  $\varepsilon_M$  от числа фаз и угла коммутации

Оценивая влияние параметров генератора на амплитудное значение пульсации, необходимо отметить, что для маломощных источников, у которых отношение активного сопротивления фазы к индуктивному сопротивлению рассеяния близко к единице, величина пульсации практически не зависит от падения напряжения в активном сопротивлении, особенно при  $m > 5$ , и в сильной степени зависит от угла коммутации вентилей (индуктивность рассеяния).

Поэтому при расчетах можно пренебрегать активным падением напряжения в выражениях (1) и (2), что дает значительное упрощение расчетных формул.

Значение коэффициента пульсации по амплитудному значению, хотя и удобно для анализа применимости той или иной схемы выпрямления, но не дает возможности расчета пульсации тока или напряжения при изменении типа нагрузки на выходе генератора.

Одним из методов, позволяющих учесть тип нагрузки, является определение гармонических составляющих э.д.с. пульсаций. Последние могут быть найдены путем разложения функции, заданной уравнениями (1) или (2) в гармонический ряд. Расчеты показывают, что при анализе достаточно ограничиться лишь основной составляющей пульсации, изменяющейся с частотой  $f_{\Pi} = m'f_r$ , где  $m' = m$  при  $m =$  четному числу

и  $m' = 2m$  при  $m =$  нечетному числу. Неучет высших гармонических, как показывают расчеты, дает лишь  $(3 \div 5)\%$  погрешности при определении эдс пульсации. С учетом (1) и (2) эдс пульсации может быть представлена следующим выражением:

$$e_{\text{п}} = \frac{m'}{\pi} E_m \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{(m')^2 - 1} \sqrt{(m')^2 [\sin^2(\gamma - \alpha) - 2\cos m' \gamma \sin(\gamma - \alpha) \sin \alpha + \sin^2 \alpha] + 2m' \sin m' \gamma \sin \gamma + \cos^2(\gamma - \alpha) + 2\cos(\gamma - \alpha) \cos m' \gamma \cos \alpha + \cos^2 \alpha}. \quad (7)$$

С увеличением нагрузки генератора увеличивается как угол коммутации ( $\gamma$ ), так и естественный угол зажигания ( $\alpha$ ). При этом угол коммутации возрастает значительно быстрее [5], что приводит к увеличению эдс пульсаций с ростом тока нагрузки.

При индуктивной нагрузке на выходе выпрямителя  $L_{\text{н}} = \infty$  коэффициент пульсации может быть определен как отношение эдс пульсации к среднему значению выпрямленного напряжения, полученному в соответствии с выражениями (1) или (2)

$$\varepsilon = \frac{2}{(m')^2 - 1} \frac{\sqrt{(m')^2 [\sin^2(\gamma - \alpha) - 2\cos m' \gamma \sin(\gamma - \alpha) \sin \alpha + \sin^2 \alpha] + 2m' \sin m' \gamma \sin \gamma + \cos^2(\gamma - \alpha) + 2\cos(\gamma - \alpha) \cos m' \gamma \cos \alpha + \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha + \cos(\gamma - \alpha) + \gamma \sin \alpha - \frac{4\pi}{m} \sin \alpha}. \quad (8)$$

Поскольку с ростом нагрузки среднее значение выпрямленного напряжения уменьшается, а эдс пульсации возрастает, то это приводит к значительному увеличению коэффициента пульсации. Рис. 4 иллюстрирует эту зависимость для трехфазного мостового выпрямителя, работающего от

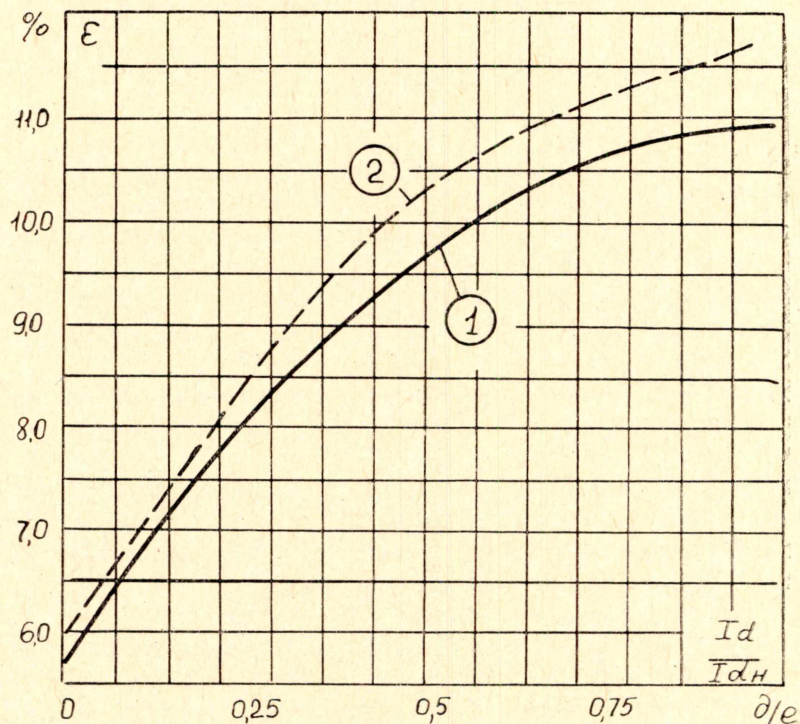


Рис. 4. Изменения коэффициента пульсации трехфазной схемы при  $L_{\text{н}} = \infty$ ; 1 — расчет, 2 — эксперимент

маломощного синхронного генератора. Увеличение пульсации с ростом нагрузки должно учитываться при выборе фильтрующей системы.

Для любых других нагрузок на выходе генератора как по типу, так и по величине переменная составляющая выпрямленного напряжения может быть определена по схеме замещения, показанной на рис. 5. Экви-

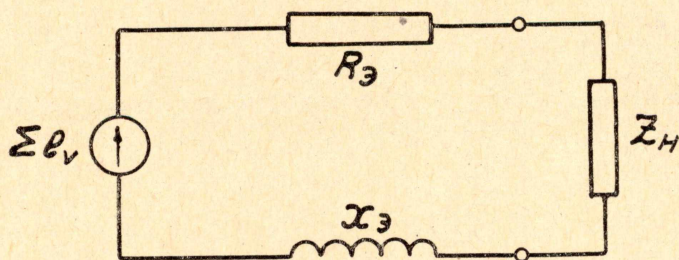


Рис. 5. Схема для расчета пульсации тока и напряжения

валентные параметры генератора для цепи постоянного тока выражаются, согласно [4], как средние значения за период изменения выпрямленного напряжения и для частоты соответствующей частоты пульсации. Для мостовой схемы эквивалентные сопротивления могут быть определены

$$x_э = x_{\Phi} m' \left( 2 - \frac{3\gamma}{2\pi} \right), \quad r_э = r' \left( 2 - \frac{3\gamma}{2\pi} \right). \quad (9)$$

При известных параметрах генератора и нагрузки пульсации тока и напряжения генератора могут быть определены

$$\dot{I}_{\Pi} = \frac{\dot{E}_{\Pi}}{z_{\Gamma} + z_H}, \quad \dot{U}_{\Pi} = \dot{I}_{\Pi} z_H, \quad (10)$$

где  $z_{\Gamma} = r_э + ix_э$ .

Экспериментальные исследования, проведенные авторами (рис. 4), показали, что предложенная методика расчета пульсации выпрямленного напряжения дает удовлетворительную для инженерных расчетов точность.

Таким образом проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Для уменьшения переменной составляющей выпрямленного напряжения в бесколлекторных генераторах постоянного тока необходимо применение нечетного числа фаз. При этом для генераторов малой мощности число фаз  $m = 5, 7$  является предельно возможным по технологической выполнимости и коэффициенту использования источника питания.

2. Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения может быть с достаточной для практики точностью определен путем расчета эдс пульсации при идеально сглаженном токе с последующим пересчетом на реальную нагрузку.

3. Во всех случаях для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения необходимо выполнение источников питания с малым индуктивным сопротивлением рассеяния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, Г. Н. Бладзевич. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Изд. АН СССР, 1964.
2. В. Н. Аксенов. Выпрямители и трансформаторные подстанции. Связьиздат, 1962.
3. Г. Г. Федосеев. Выпрямители и стабилизаторы. Госиздат, «Искусство», 1960.
4. А. М. Пинцов. Расчет гармоник выпрямленного тока и напряжения. «Электричество», № 12, 1956.
5. Г. А. Сипайлов, В. А. Зорин, Т. В. Кузнецова, А. Б. Цукублин. Некоторые вопросы работы маломощного синхронного генератора на выпрямительную нагрузку. «Известия ТПИ», т. 145, 1966.