

Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока с несимметричной якорной обмоткой

ГРИДИН В.М.

Рассмотрены бесконтактные тахогенераторы постоянного тока (ТПТ), содержащие синхронный генератор (СГ) и полупроводниковый преобразователь выходных напряжений СГ, выполненного с трёхсекционной и несимметричной четырёхсекционной якорной обмоткой (ЯО). Установлено, что пульсация выходного напряжения ТПТ с несимметричной ЯО примерно в 3 раза меньше, чем у аналогичных тахогенераторов с трёхсекционной ЯО, и не зависит от частоты вращения вала ТПТ.

Ключевые слова: бесконтактные тахогенераторы постоянного тока, несимметричная якорная обмотка, пульсация выходного напряжения

Тахогенераторы применяют в схемах автоматики с целью измерения частоты вращения, осуществления обратной связи по скорости, демпфирования, электрического дифференцирования и интегрирования. Они могут быть выполнены в виде асинхронных генераторов с полым немагнитным ротором, синхронных генераторов (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов, обычных генераторов постоянного тока и бесконтактных генераторов постоянного тока. Последние состоят из СГ и полупроводникового преобразователя выходных напряжений генератора и являются наиболее перспективными благодаря компактности, надёжности, линейности выходной характеристики. Кроме того, напряжение постоянного тока более удобно для использования в схемах автоматики, чем переменное напряжение асинхронных и синхронных генераторов, и должно иметь незначительную пульсацию (не более 3%). Исследованию тахогенераторов посвящен ряд работ, например [1–4].

В статье рассматриваются бесконтактные тахогенераторы постоянного тока (ТПТ), у которых полупроводниковый преобразователь выполнен в виде выпрямителя или в виде перемножителей и сумматора напряжений. Бесконтактные ТПТ с транзисторным коммутатором и датчиком положения ротора (ДПР), как у бесконтактных двигателей постоянного тока, сложнее рассматриваемых ТПТ, так как ДПР и преобразователь его сигналов в сигналы управления транзисторами коммутатора сложнее диодного выпрямителя или перемножителей и сумматора напряжений, а пульсация выход-

Contactless DC tachogenerators (DCTGs) containing a synchronous generator and a semiconductor converter of the synchronous generator output voltages are considered. The synchronous generators used in the DCTGs may have a three-section or a nonsymmetrical four-section armature winding. It is found that the pulsation of the voltage at the output of a DCTG fitted with a nonsymmetrical armature winding is approximately a factor of 3 smaller than in similar tachogenerators fitted with a three-section armature winding and does not depend on the DCTG shaft rotation frequency.

Key words: contactless DC tachogenerators, nonsymmetrical armature winding, pulsation of output voltage

ного напряжения ТПТ с коммутатором и ДПР не меньше, чем у обычных ТПТ с СГ и диодным выпрямителем его напряжений.

Якорная обмотка (ЯО) СГ у рассматриваемых ТПТ выполнена симметричной трёхсекционной или несимметричной четырёхсекционной. У несимметричной ЯО, предложенной автором статьи, вторая, третья и четвертая секции смещены относительно первой, соответственно, на 90, 135 и 225° [5]; все секции соединены в звезду. Поскольку ТПТ с несимметричной ЯО имеет большее число секций, чем традиционный ТПТ с трёхсекционной ЯО, пульсация его выходного напряжения должна быть меньше. Покажем, что это может быть достигнуто благодаря применению не одного, а двух индукторов с различным числом полюсов или четырех перемножителей и сумматора напряжений.

На рис. 1 изображены поперечные сечения ЯО двухполюсного СГ, его вала и индуктора в виде постоянного магнита с полюсами NS . Постоянный магнит условно не заштрихован и вращается со скоростью n . Здесь 1 и 1ϕ, 2 и 2ϕ, 3 и 3ϕ, 4 и 4ϕ – стороны соответствующих секций; ЯО изображена диаметральной сосредоточенной, но может быть выполнена укороченной распределенной. Если ЯО уложена в пазы магнитопровода (рис. 1), то они должны быть скошены на одно пазовое деление магнитопровода с целью уменьшения зубцовых пульсаций напряжений СГ; с той же целью ЯО укладывают на внутренней гладкой цилиндрической поверхности магнитопровода. Напряжения на секциях ЯО практически равны ЭДС, так как ТПТ

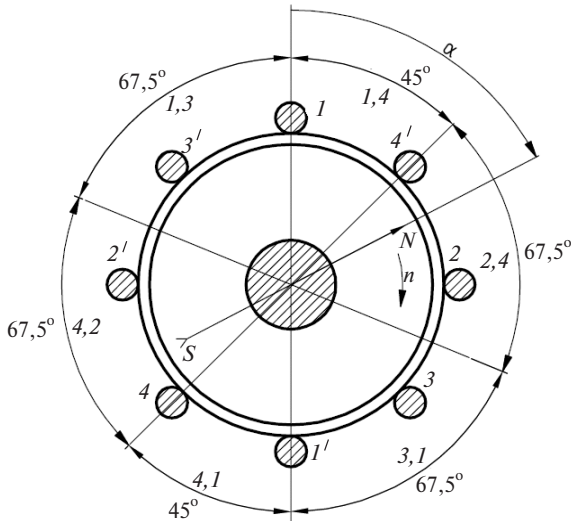


Рис. 1. Поперечные сечения якорной обмотки двухполюсного синхронного генератора, его вала и индуктора

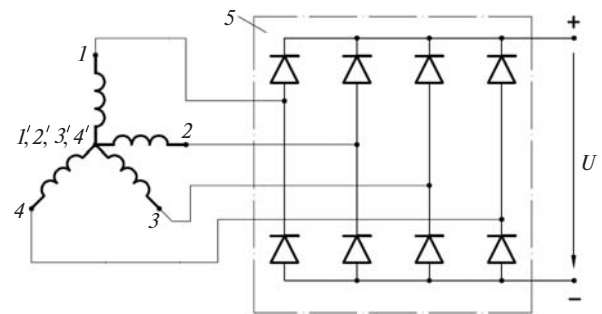


Рис. 2. Схема бесконтактного тахогенератора постоянного тока: 1–4 – начала секций якорной обмотки; 1ϕ– 4ϕ – концы секций якорной обмотки; 5 – выпрямитель

обычно работают в режиме, близком к холостому ходу. Нагрузка ТПТ практически не влияет на пульсации его выходного напряжения.

Вначале рассмотрим ТПТ (см. схему на рис. 2), который содержит СГ с несимметричной ЯО и выпрямитель. Для него на рис. 1 показаны угловые интервалы и соответствующие две секции ЯО, напряжения которых использует выпрямитель на этих интервалах, например 45° и 1, 4 секции, 67,5° и 2, 4 секции и т.д. В начале и конце каждого интервала ось NS постоянного магнита совпадает с прямыми, ограничивающими соответствующие угловые интервалы.

Из рис. 1 и 2 видно, что выходное напряжение ТПТ U максимально при положениях оси NS магнита строго между смежными сторонами двух секций, например 2 и 4ϕ и минимально при положении оси NS между двумя угловыми интервалами в 67,5°, поэтому

$$\bar{U}_{\max} = 2 \cos 22,5^\circ = 1,8478;$$

$$\bar{U}_{\min} = \cos 22,5^\circ + \cos 67,5^\circ = 1,3066,$$

где \bar{U}_{\max} , \bar{U}_{\min} – отношения максимального и минимального значений выходного (выпрямленного) напряжения ТПТ к амплитуде напряжений на секциях ЯО.

Пульсацию выходного напряжения ТПТ можно определить по формуле

$$\epsilon = \frac{\bar{U}_{\max} - \bar{U}_{\min}}{\bar{U}_{\max} + \bar{U}_{\min}}. \quad (1)$$

Здесь $\epsilon = \frac{1,8478 - 1,3066}{1,8478 + 1,3066} = 0,1716$ или $\epsilon = 17,16\%$, т.е.

такое значение пульсации неприемлемо.

Однако пульсацию выходного напряжения можно значительно уменьшить, если применить не один, а два индуктора с разным числом полюсов. На рис. 3 показано продольное, а на рис. 4 поперечное сечения СГ с двумя индукторами.

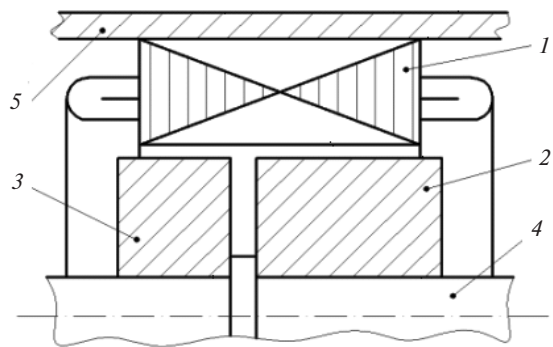


Рис. 3. Продольное сечение синхронного генератора: 1 – якорь (магнитопровод с якорной обмоткой); 2 – основной индуктор; 3 – дополнительный индуктор; 4 – вал; 5 – наружный корпус

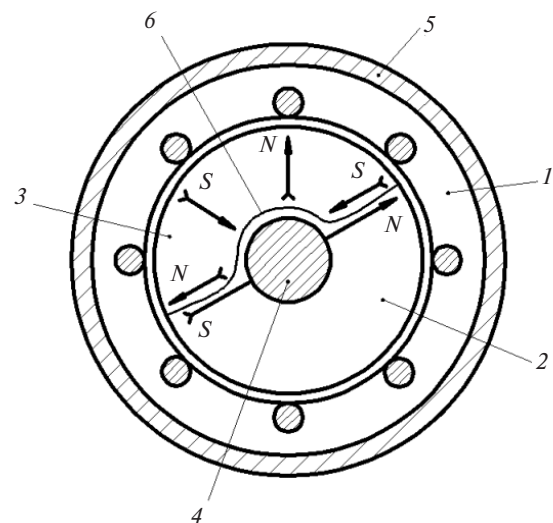


Рис. 4. Поперечное сечение синхронного генератора: 1 – якорь (магнитопровод с якорной обмоткой); 2 – основной индуктор; 3 – дополнительный индуктор; 4 – вал; 5 – наружный корпус; 6 – линия вырыва

На рис. 4 как бы удалена часть основного индуктора (линия вырыва б), что позволяет увидеть часть дополнительного индуктора, распложенного за основным. Индуктор 3 имеет втрое большее число полюсов, чем индуктор 2. При вращении вала в каждой секции ЯО возникают две примерно синусоидальные ЭДС основной и утроенной частот от воздействия индукторов 2 и 3 и результирующая примерно трапецеидальная ЭДС, обеспечивающая значительное уменьшение пульсации выходного напряжения ТПТ. Корректировка формы одного напряжения с помощью другого предложена автором статьи в [6]. Отношение g активной длины индуктора 3 к длине индуктора 2 влияет на пульсацию выходного напряжения ТПТ. Передвигая вдоль вала индуктор 3, можно изменять отношение g и тем самым уменьшать пульсацию.

Относительные значения напряжений \bar{u}_2 и \bar{u}_4 на второй и четвертой секциях ЯО можно выразить так (см. рис. 1 и 2):

$$\bar{u}_2 = \frac{u_2}{U_m} = \sin a + c \sin 3a;$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_4 &= \frac{u_4}{U_m} = \sin(a - 135^\circ) + c \sin[3(a - 135^\circ)] = \\ &= \sin(a - 135^\circ) + c \sin(3a - 45^\circ), \end{aligned}$$

где U_m – амплитуда первой гармоники напряжений на секциях ЯО; a – угловое положение основного индуктора, причем нулевому значению угла a соответствует вертикальное положение оси магнита NS (см. рис. 1); c – отношение амплитуд третьей и первой гармоник напряжения. Значение c тем больше, чем больше отношение g .

Определим оптимальное значение отношения c , обеспечивающее минимальную пульсацию выходного напряжения ТПТ.

На угловом интервале $a = 45^\circ, 112,5^\circ$ размером $67,5^\circ$ (см. рис. 1) выпрямитель использует разность напряжений u_2 и u_4 (u_{24}), поэтому можно записать выражение

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{u_{24}}{U_m} = \frac{u_2 - u_4}{U_m} = \sin a - \sin(a - 135^\circ) + \\ &+ c \sin 3a - c \sin(3a - 45^\circ) = 1,8478 \sin(a + 22,5^\circ) + \\ &+ 0,7654c \sin(3a + 67,5^\circ). \end{aligned} \quad (2)$$

Функция $\bar{u}(a)$ принимает экстремальные значения при значениях аргумента a , которые можно определить из уравнения

$$\frac{d\bar{u}}{da} = 1,8478 \cos(a + 22,5^\circ) + 2,2961c \cos(3a + 67,5^\circ) = 0. \quad (3)$$

Если считать, что должно быть $\bar{u}(67,5^\circ) = \bar{u}(112,5^\circ)$ то, применяя (2), получаем $c = 0,4142$, а из (3) для углового интервала $a = 45^\circ, 112,5^\circ$ находим $a = 67,5^\circ$ и $a = 98,4^\circ$. Следовательно,

$$\bar{u}(67,5^\circ) = \bar{u}(112,5^\circ) = 1,5307 = \bar{U}_{\min};$$

$$\bar{u}(98,4^\circ) = 1,6004 = \bar{U}_{\max};$$

из (1) значение $\epsilon = 0,0223$ или 2,23%.

Действуя аналогично для других случаев, получаем следующие результаты.

Если $\bar{u}(45^\circ) = \bar{u}(67,5^\circ) = \bar{u}(90^\circ)$, то $c = 0,2978$; $\bar{U}_{\min} = \bar{u}(112,5^\circ) = 1,4678$; $\bar{U}_{\max} = \bar{u}(56,3^\circ) = \bar{u}(78,8^\circ) = 1,6228$; $\epsilon = 0,0502$ или 5,02%.

Если $\bar{u}(45^\circ) = \bar{u}(90^\circ) = \bar{u}(112,5^\circ)$, то $c = 0,4802$; $\bar{U}_{\min} = \bar{u}(67,5^\circ) = 1,4803$; $\bar{U}_{\max} = \bar{u}(101,3^\circ) = 1,6081$; $\epsilon = 0,0414$ или 4,14%.

Пульсация выходного напряжения ТПТ, равная 2,23% (см. выше), является незначительной и не зависит от частоты вращения вала благодаря применению второго индуктора, который выполняет роль «механического безынерционного фильтра».

Для традиционного ТПТ с трехфазным СГ и выпрямителем известны следующие значения:

$$\bar{U}_{\max} = 2 \cos 30^\circ = 1,7321; \quad \bar{U}_{\min} = 1 + \cos 60^\circ = 1,500;$$

$\epsilon = 0,0718$ или 7,18%.

Такое значение пульсации неприемлемо.

Применение второго индуктора с утроенным числом полюсов не уменьшает пульсацию выходного напряжения, так как в линейных напряжениях трёхфазных СГ отсутствуют гармоники, кратные трём. Следовательно, пульсация выходного напряжения у ТПТ с несимметричной ЯО и выпрямителем в 3,2 раза меньше, чем у ТПТ с трехсекционной ЯО и выпрямителем.

Теперь рассмотрим ТПТ (см. схему на рис. 5), который содержит СГ с несимметричной ЯО, перемножители и сумматор напряжений. Перемножители возводят в квадрат значения напряжений на секциях ЯО, а сумматор суммирует напряжения на выходе перемножителей. Если u_1, u_2, u_3, u_4 – напряжения на секциях ЯО, то выходное напряжение ТПТ можно описать выражением

$$u = K(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2),$$

где K – произведение коэффициентов усиления перемножителя и сумматора.

Обозначим

$$\bar{u} = \frac{u}{KU_m} = \bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2 + \bar{u}_3^2 + \bar{u}_4^2. \quad (4)$$

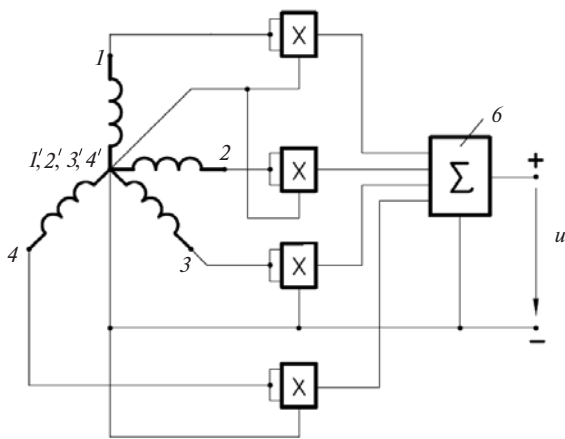


Рис. 5. Схема бесконтактного тахогенератора постоянного тока: 1—4 — начала секций якорной обмотки; 1φ 4φ — концы секций якорной обмотки; 5 — перемножители напряжений; 6 — сумматор напряжений

При отсутствии высших гармоник в напряжениях u_1, u_4 можно записать:

$$\bar{u}_1 = \sin a; \quad \bar{u}_2 = \sin(a - 90^\circ); \quad \bar{u}_3 = \sin(a - 135^\circ); \\ \bar{u}_4 = \sin(a + 135^\circ).$$

В этом случае по (4) получим $\bar{u} = 2$.

Для ТПТ с трехсекционной ЯО, перемножителями и сумматором напряжений при отсутствии высших гармоник в напряжениях $u_1 - u_3$

$$\bar{u} = \bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2 + \bar{u}_3^2 = 1,5.$$

Однако реально напряжения на секциях ЯО и соответствующие относительные значения напряжений содержат высшие нечетные гармоники. Например, возможна запись выражения, заимствованного из справочников по высшей математике:

$$\bar{u}_1 = \sin a + \frac{1}{9} \sin 3a + \frac{1}{25} \sin 5a + \frac{1}{49} \sin 7a + \frac{1}{81} \sin 9a + \dots \quad (5)$$

В общем случае

$$\bar{u}_1 = \sin a + C_3 \sin 3a + C_5 \sin 5a + C_7 \sin 7a + C_9 \sin 9a + \dots; \\ \bar{u}_2 = \sin(a - 90^\circ) + C_3 \sin(3a + 90^\circ) + C_5 \sin(5a - 90^\circ) + \\ + C_7 \sin(7a + 90^\circ) + C_9 \sin(9a - 90^\circ) + \dots; \\ \bar{u}_3 = \sin(a - 135^\circ) + C_3 \sin(3a - 45^\circ) + C_5 \sin(5a + 45^\circ) + \\ + C_7 \sin(7a + 135^\circ) + C_9 \sin(9a - 135^\circ) + \dots; \\ \bar{u}_4 = \sin(a + 135^\circ) + C_3 \sin(3a + 45^\circ) + C_5 \sin(5a - 45^\circ) + \\ + C_7 \sin(7a - 135^\circ) + C_9 \sin(9a + 135^\circ) + \dots$$

Если применить последние четыре формулы, учесть только 1, 3, 5, 7, 9-ю гармоники и пренебречь произведениями выражений для высших гармоник как малыми членами, то можно получить выражение

$$\bar{u} = \bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2 + \bar{u}_3^2 + \bar{u}_4^2 \gg$$

$$\gg 2(1 + C_3^2 + C_5^2 + C_7^2 + C_9^2) - 4(C_7 - C_9) \cos 8a. \quad (6)$$

Если, например, справедлива формула (5), т.е. $C_3 = \frac{1}{9}, C_5 = \frac{1}{25}, C_7 = \frac{1}{49}, C_9 = \frac{1}{81}$, то по (6) получим

$$\bar{u} \gg 2,029(1 - 0,016 \cos 8a),$$

следовательно, в этом случае пульсация выходного напряжения равна 0,016 или 1,6%.

Если, например, значения коэффициентов C_3, C_9 вдвое больше предыдущих значений, то по (6) найдем

$$\bar{u} \gg 2,116(1 - 0,031 \cos 8a).$$

В этом случае пульсация равна 0,031 или 3,1%.

Такие небольшие значения пульсации являются приемлемыми.

Для ТПТ с трехсекционной ЯО, перемножителями и сумматором напряжений:

$$\bar{u}_1 = \sin a + C_3 \sin 3a + C_5 \sin 5a + C_7 \sin 7a + C_9 \sin 9a + \dots; \\ \bar{u}_2 = \sin(a - 120^\circ) + C_3 \sin 3a + C_5 \sin(5a + 120^\circ) + \\ + C_7 \sin(7a - 120^\circ) + C_9 \sin 9a + \dots; \\ \bar{u}_3 = \sin(a + 120^\circ) + C_3 \sin 3a + C_5 \sin(5a - 120^\circ) + \\ + C_7 \sin(7a + 120^\circ) + C_9 \sin 9a + \dots$$

Действуя как для ТПТ с несимметричной ЯО, получим

$$\bar{u} = \bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2 + \bar{u}_3^2 \gg 1,5(1 + C_5^2 + C_7^2) - 3(C_5 - C_7) \cdot \\ \cdot \cos 6a + 3(C_3^2 \sin^2 3a + C_9^2 \sin^2 9a).$$

Малым членом $C_9^2 \sin^2 9a$ можно пренебречь.

Минимальное и максимальное значения функции $\bar{u}(a)$ можно найти, предварительно определив соответствующие значения аргумента a из уравнения

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial a} \gg [18(C_5 - C_7) + 9C_3^2] \sin 6a = 0,$$

решением которого являются такие значения угла: $a = 0; a = \pm 180^\circ; a = \pm 30^\circ$.

Если справедлива формула (5), то

$$\bar{u} \gg 1,503(1 - 0,039 \cos 6a + 0,025 \sin^2 3a).$$

Обозначим выражение в скобках через x , тогда при $a = 0$ и $a = \pm 180^\circ$ значение $x = x_{\min} = 0,961$, а при $a = 30^\circ$ — $x = x_{\max} = 1,064$, следовательно,

$$e = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max} + x_{\min}} = 0,051 \text{ или } 5,1\%.$$

Если коэффициенты C_3, C_9 вдвое больше, чем в формуле (5), то

$$x(0) = x(\pm 180^\circ) = x_{\min} = 0,922;$$

$$x(30^\circ) = x_{\max} = 1,176,$$

следовательно, $\epsilon = 0,121$ или 12,1%. Такие значения пульсаций неприемлемы.

Таким образом, можно установить, что у ТПТ с несимметричной ЯО пульсация меньше, чем у ТПТ с трехсекционной ЯО, в 3,2 и 3,9 раз. У всех предложенных ТПТ пульсация выходного напряжения не зависит от частоты вращения вала, поскольку дополнительный индуктор, перемножитель и сумматор напряжений являются «безынерционными фильтрами».

Вывод о том, что у предложенных ТПТ пульсация выходного напряжения меньше примерно в 3 раза, чем у сопоставляемых тахогенераторов, был подтверждён результатами имитационного моделирования с использованием программы Multisim.

Бесконтактные ТПТ с несимметричной ЯО могут и должны найти достойное применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. — М.: Высшая школа, 1976.
2. Путников В.В., Рыбаков В.С., Слесарев А.В. Реверсивные бесконтактные тахогенераторы постоянного тока — М.: Информэлектро, 1970.
3. Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбаков Ю.П. Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока. — М.: Энергоиздат, 1982.
4. Тун А.Я. Системы контроля скорости электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. А.с. (СССР) № 1270846. Вентильный электродвигатель/В.М. Гридин. — БИ, 1986, 42.
6. А.с. (СССР) № 1684870. Вентильный генератор/В.М. Гридин. — БИ, 1991, № 38.

[09.01.13]

Автор: Гридин Владимир Михайлович окончил в 1963 г. электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ). В 1979 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией». Доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.