

## Бесконтактный тахогенератор постоянного тока с удвоенным числом фазных напряжений

ГРИДИН В.М.

*Рассмотрен тахогенератор (ТГ), содержащий синхронный генератор с трехфазной якорной обмоткой, резистивный удвоитель фазных напряжений, два мостовых выпрямителя трехфазных напряжений и резистивный сумматор выходных напряжений двух выпрямителей. Определены требования к удвоителю и сумматору. Получены выражения для выпрямленного дополнительного трехфазного напряжения и значения коэффициента увеличения этого напряжения. Представлены выражения для определения суммы двух выпрямленных трехфазных напряжений и предельных значений этой суммы. В результате установлено, что у рассмотренного ТГ пульсация выходного напряжения не превышает 1,5%, что значительно меньше, чем у известных ТГ (3,5–4)%.*

*Ключевые слова: тахогенератор, удвоитель фазных напряжений, выпрямители, сумматор напряжений выпрямителей, пульсация выходного напряжения*

Тахогенераторы применяют в схемах автоматики для 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 с возбуждением от постоянных магнитов, генераторов постоянного тока [1]. Однако наиболее перспективными являются бесконтактные тахогенераторы постоянного тока (далее ТГ) благодаря компактности, надежности, линейности выходной характеристики. Кроме того, напряжение постоянного тока более удобно для использования в схемах автоматики, чем выходное напряжение переменного тока асинхронных и синхронных генераторов.

Тахогенератор — это синхронный генератор (СГ) и полупроводниковый преобразователь его выходных напряжений. Основными характеристиками ТГ являются выходное напряжение и пульсация этого напряжения, которая зависит от числа фаз якорной обмотки (ЯО) СГ и устройства преобразователя выходных напряжений СГ. Исследованию ТГ посвящен ряд работ, например [2–7].

Обычно СГ выполняют с трехфазной ЯО, а преобразователь напряжений СГ — в виде мостового выпрямителя из шести диодов. Пульсация выходного напряжения ТГ составляет не менее 3,5% из-за синусообразного (не трапецеидального) распределения магнитной индукции по окружности рабочего воздушного зазора и ограниченного числа фаз ЯО. Возможные RC-фильтры не могут эффективно фильтровать выпрямленное напряжение СГ для всех возможных значений частоты вращения

вала ТГ (особенно для малых значений). Кроме того, RC-фильтры из-за наличия конденсатора являются инерционными устройствами. Во многих случаях пульсация выходного напряжения ТГ не должна превышать 2%.

В настоящей статье рассматривается возможность уменьшения пульсации выходного напряжения ТГ до 1,5%. С этой целью исследуется ТГ, содержащий СГ с трехфазной ЯО, удвоитель числа фазных напряжений в виде резисторов с разными значениями сопротивлений, два мостовых выпрямителя двух трехфазных напряжений и сумматор выходных напряжений двух выпрямителей.

Индуктор должен быть составным, состоящим из внутреннего магнитомягкого основания и наружных полюсов-магнитов, а ЯО — диаметральной сосредоточенной с целью приближения формы (осциллограммы) напряжений на секциях ЯО к желаемой трапецеидальной.

Для удвоения числа фазных напряжений можно применить вторую трехфазную ЯО, смещенную относительно первой на 30°. При этом удваивается число пазов якоря, его конструкция значительно усложняется, размеры увеличиваются. Однако это неприемлемо или нежелательно для миниатюрных и малогабаритных ТГ, применяемых, например, в летательных аппаратах.

Будем пренебрегать сопротивлением секций ЯО, падением напряжения на диодах выпрямителя и считать, что на каждом угловом интервале 60° выпрямленное трехфазное напряжение ТГ  $u_B$  является универсальной функцией от углового положения вала и ротора  $\alpha$ :

$$u_B = a + b \sin \alpha.$$

Будем применять относительное значение

$$\bar{u}_B = u_B / b = c + \sin \alpha,$$

где отношение  $c = a / b$  зависит от конструкции индуктора, конфигурации его полюсов.

У ТГ с трехфазной ЯО и мостовым выпрямителем напряжение  $u_B$  является выходным напряжением ТГ  $u$ . Для минимального и максимального значений относительного напряжения  $\bar{u}_B$  справедливы выражения:

$$\bar{u}_{B \min} = c + \sin 60^\circ; \quad \bar{u}_{B \max} = c + \sin 90^\circ.$$

Пульсацию  $\varepsilon$  выходного напряжения ТГ  $u$  будем определять по формуле

$$\varepsilon = 100(\bar{u}_{B \min} - \bar{u}_{B \max}) / (\bar{u}_{B \min} + \bar{u}_{B \max}), \%$$

откуда получаем выражение

$$\varepsilon = \frac{13,4}{2c + 1,866}, \%$$

При  $c = 0; 0,75; 1,0$  значение пульсации  $\varepsilon$  равно 7,18; 4; 3,5%.

На рис. 1,а изображены электрическая схема, содержащая трехфазную ЯО и удвоитель числа фазных напряжений в виде резисторов с сопротив-

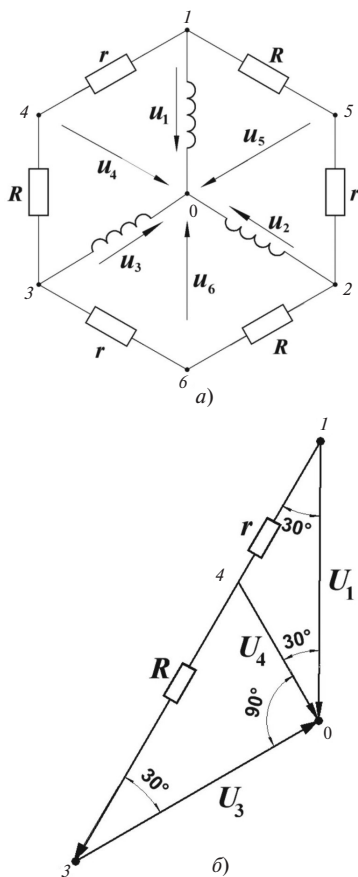


Рис. 1. Электрическая схема синхронного генератора и удвоителя числа фазных напряжений (а) и векторная диаграмма для синусоидальных составляющих напряжений  $u_1, u_3, u_4$  (б)

лениями  $R$  и  $r$ , которые, как и сопротивления сумматора и нагрузки ТГ, должны быть намного больше сопротивлений фаз ЯО. На рис. 1,б показана векторная диаграмма для синусоидальных составляющих напряжений  $u_1, u_3, u_4$ .

Согласно векторной диаграмме дополнительное напряжение  $u_4$  опережает напряжение  $u_1$  на требуемый угол  $30^\circ$ . На диаграмме указаны также углы между другими векторами. Из диаграммы следует, что амплитуды напряжения  $u_4$  и напряжения на резисторе с сопротивлением  $r$  меньше амплитуды напряжения  $u_1$  в  $\sqrt{3}$  раз, а амплитуда напряжения на резисторе с сопротивлением  $R$  больше амплитуды напряжения  $u_1$  в  $2/\sqrt{3}$  раз, следовательно, должно быть  $R = 2r$ . Постоянную составляющую  $d$  для относительного выпрямленного дополнительного трехфазного напряжения из  $u_4, u_5, u_6$  определим по формуле, вытекающей из рис. 1:

$$d = 2 \left( c - \frac{2c}{R+r} r \right) = 2c/3.$$

На схеме рис. 2, содержащей два мостовых выпрямителя двух трехфазных напряжений и сумматор выходных напряжений двух выпрямителей, сумматор выполнен в виде трех резисторов с сопротивлениями  $r_1, r_2, r_3$ , а может быть выполнен на основе операционного усилителя.

Выходное напряжение ТГ  $u$  является выходным напряжением сумматора, на первый вход которого подается выпрямленное напряжение  $u_{B1}$ , на второй – напряжение  $u_{B2}$ . Для относительных значений напряжений справедливы выражения:

$$\bar{u}_{B1} = c + \sin \alpha; \quad \bar{u}_{B2} = 2c/3 + 0,577 \sin(\alpha + 30^\circ).$$

Для уменьшения пульсации выходного напряжения ТГ  $u$  необходимо уровнять амплитуды на-

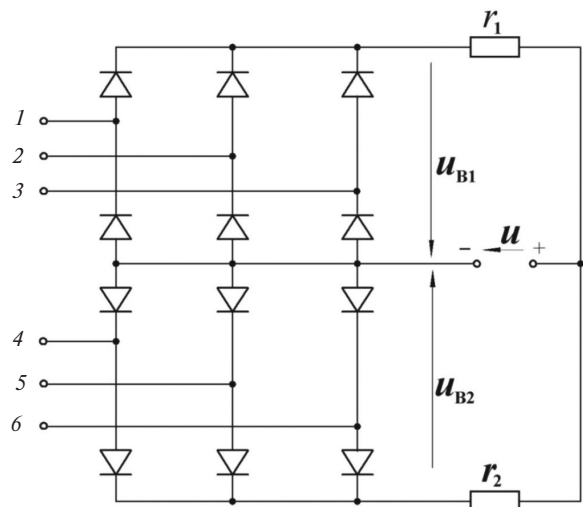


Рис. 2. Схема двух выпрямителей и сумматора напряжений выпрямителей

пряжений  $u_{B1}$  и  $u_{B2}$ , увеличив напряжения  $u_{B2}$  в  $K$  раз. Выражение для коэффициента  $K$  найдем из условия:

$$c + \sin 90^\circ = K(2c/3 + 0,577 \sin 90^\circ);$$

$$K = \frac{c+1}{2c/3 + 0,577}$$

Амплитуды напряжений  $u_{B1}$  и  $u_{B2}$  выравняются с помощью сумматора, для его выходного напряжения легко получить выражение

$$u = \frac{u_{B1}r_2 + u_{B2}r_1}{r_1 + r_2 + r_1r_2/r_3} = \frac{(u_{B1} + u'_{B2})}{1 + r_1/r_2 + r_1/r_3},$$

где  $u'_{B2} = \frac{r_1}{r_2} u_{B2}$ .

Для выравнивания амплитуд напряжений  $u_{B1}$  и  $u_{B2}$  необходимо, чтобы  $r_1/r_2 = K > 1$ .

На рис. 3,а показаны напряжения  $u_{B1}$  и  $u'_{B2}$ , а на рис. 3,б — сумма  $u_B$  этих напряжений.

Для суммарного относительного напряжения  $\bar{u}_B$  справедливо выражение

$$\bar{u}_B = \bar{u}_{B1} + \bar{u}'_{B2} = c + \sin \alpha + K[2c/3 + 0,577 \sin(\alpha + 30^\circ)] = p + \sin \alpha + s \sin(\alpha + 30^\circ),$$

где  $p = c(1 + 2K/3) = c(2c + 1,866)/(c + 0,866)$ ;  
 $s = 0,577K = (1 + c)/(1 + 1,155c)$ .

Из рис. 3 видно, что для  $\bar{u}_{B \min}$  и  $\bar{u}_{B \max}$  справедливы выражения:

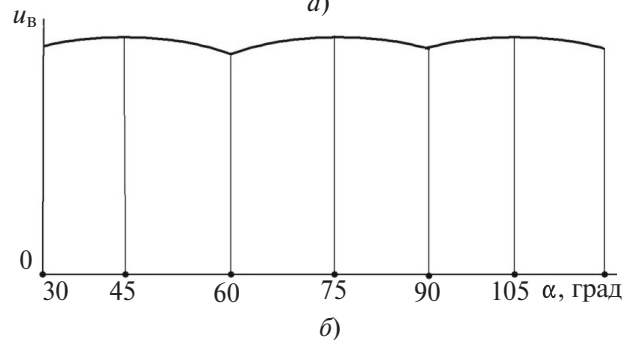
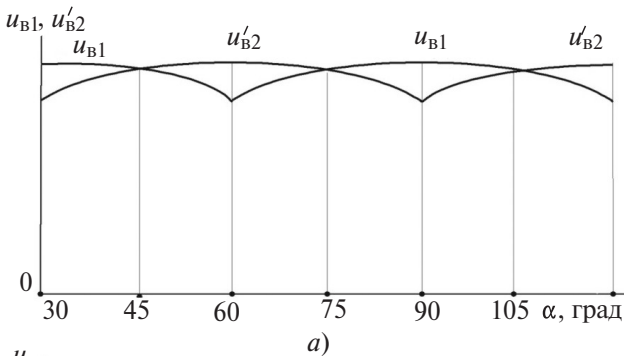


Рис. 3. Кривые напряжений  $u_{B1}$  и  $u'_{B2}$  (а) и сумма этих напряжений  $u_B$  (б)

$$\bar{u}_{B \min} = p + 1 + s \sin 60^\circ; \bar{u}'_{B \min} = p + s + \sin 60^\circ;$$

$$\bar{u}_{B \max} = p + \sin \alpha_m + s \sin(\alpha_m + 30^\circ).$$

Угол  $\alpha_m$  найдем из уравнения

$$\frac{d\bar{u}_B}{d\alpha} = 0,$$

решив которое, получим

$$\alpha = \alpha_m = \arctg\left(\sqrt{3} + 2 \frac{1 + 1,155c}{1 + c}\right).$$

С учетом приведенных выше выражений получим следующие значения различных функций для  $c=0; 0,75; 1,0$ :

$K = \sqrt{3}; 1,624; 1,608; p=0; 1,562; 2,072; s=1,0; 0,938; 0,928;$

$\alpha_m = 75^\circ; 75,5^\circ; 75,6^\circ; \bar{u}_{B \min} = 1,866; 3,366; 3,866;$

$\bar{u}_{B \max} = 1,932; 3,434; 3,934; \varepsilon = 1,732; 1,00; 0,877\%.$

Пульсации выходного напряжения  $u$  ТГ соответствует пульсации  $\varepsilon$  напряжения  $u_B$ , поэтому при  $c=0; 0,75; 1,0$  она также равна 1,732; 1,00; 0,877%, т.е. весьма незначительна. Если пульсация не должна превышать 2%, то можно выполнять индуктор не составным, а простым цилиндрическим с радиальными полюсами ( $c=0, \varepsilon=1,732\%$ ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебное пос. для вузов. — М.: Изд-во Московского энергетического института, 2003, 424 с.
- Путников В.В., Рыбаков В.С., Слесарев А.В. Реверсивные бесконтактные тахогенераторы постоянного тока — М.: Информэлектро, 1970, 32 с.
- Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока. — М.: Энергоатомиздат, 1982, 128 с.
- Тун А.А. Системы контроля скорости электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1984, 169 с.
- Гридин В.М. Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока с несимметричной якорной обмоткой. — Электричество, 2013, № 6, с. 42–46.
- Гридин В.М. Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока с безынерционным фильтром выпрямленного напряжения. — Электричество, 2014, № 5, с. 34–38.
- Гридин В.М. Способы уменьшения пульсации момента и выходного напряжения бесконтактных моментных двигателей и тахогенераторов постоянного тока. — Электричество, 2016, № 4, с. 56–61.

[12.04.2017]

А в т о р: **Гридин Владимир Михайлович** окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1963 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией» в 1979 г. Доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## A Contactless DC Tachogenerator with the Doubled Number of Phase Voltages

**GRIDIN Vladimir M.** (*Moscow State Technical University named N.E. Bauman, Moscow, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article considers a tachogenerator containing a synchronous generator with a three-phase armature winding, a resistive doubler of the number of phase voltages, two bridge rectifiers of two three-phase voltages, and a resistive adder of the output voltages from two rectifiers. The requirements for the doubler and adder are defined. Expressions for the additional rectified three-phase voltage and for its increasing factor are obtained. Expressions for determining the sum of two rectified three-phase voltages and for the limit values of this sum are given. It has been found that the ripple of output voltage produced by the considered tachogenerator does not exceed 1,5%, which is significantly lower than in the known tachogenerators (3,5–4)%.

**Key words:** tachogenerator, phase voltage doubler, rectifiers, adder of rectifier voltages, output voltage ripple

### REFERENCES

1. **Osin I.L., Yuferov F.M.** *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv* (Electrical machines of automatic devices). Moscow, Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 2003, 424 p.
2. **Putnikov V.V., Rybakov V.S., Slesarev A.V.** *Reversivnye beskontaktnye takhogenery postoyannogo toka* (Reversible contactless DC tachogenerators). Moscow, Publ. «Informelektro», 1970, 32 p.
3. **Brodovskii V.N., Karzhavov B.N., Bybkin Yu.P.** *Beskontaktnye takhogenery postoyannogo toka* (Contactless DC tachogenerators). Moscow, Energoatomizdat, 1982, 128 p.
4. **Tun A.Ya.** *Sistemy kontrolya skorosti elektroprivoda* (Electric speed control systems). Moscow, Energoatomizdat, 1984, 169 p.
5. **Gridin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 6, pp. 42–46.
6. **Gridin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 5, pp. 34–38.
7. **Gridin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 4, pp. 56–61.

[12.04.2017]