

Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока с безынерционным фильтром выпрямленного напряжения

ГРИДИН В.М.

Рассмотрены бесконтактные тахогенераторы постоянного тока, содержащие синхронный генератор, выпрямитель его выходных напряжений, датчик положения ротора (ДПР), преобразователь его сигналов, перемножитель напряжений преобразователя и выпрямленного напряжения. Генератор выполнен с двух- или трёхсекционной якорной обмоткой, выпрямитель – по мостовой схеме. Предложены четыре зависимости выходного напряжения преобразователя от углового положения ротора, устройство ДПР и схемы преобразования его сигналов. У рассмотренных тахогенераторов пульсация выходного напряжения значительно меньше, чем у обычных тахогенераторов постоянного тока, не превышает 2% и не зависит от частоты вращения вала.

Ключевые слова: бесконтактный тахогенератор постоянного тока, синхронный генератор, датчик положения ротора, перемножитель напряжений, пульсация выходного напряжения

Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока перспективны для применения в системах автоматики благодаря компактности, надёжности, линейности выходной характеристики. Кроме того, напряжение постоянного тока более удобно для использования в схемах автоматических устройств, чем напряжение переменного тока асинхронных и синхронных тахогенераторов.

Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока (далее – ТГ) состоят из синхронного генератора (СГ) и полупроводникового преобразователя его выходных напряжений. Пульсация выходного напряжения ТГ зависит от числа секций якорной обмотки (ЯО) генератора и устройства преобразователя. Чаще всего применяют СГ с трехсекционной ЯО, а преобразователь напряжений выполняют в виде мостового выпрямителя из шести диодов. Исследованию ТГ посвящены, например, работы [1–4]. С целью уменьшения пульсации выходного напряжения ТГ могут быть снабжены электрическим фильтром выпрямленного напряжения – обычным RC -фильтром или активным RC -фильтром нижних частот. Однако такие или иные фильтры пропускают, кроме постоянной составляющей выпрямленного напряжения, значительный спектр частот (до частоты среза) [5]. Поэтому не могут эффективно фильтровать (отделять) постоянную составляющую выпрямленного напряжения от переменной составляющей для всех возможных значений частоты вращения вала ТГ, особенно при малых скоростях. Из-за наличия конденсаторов RC -фильтры являются инерционными устройствами, что вносит дополнительную погрешность в качество преобразования «частота вращения–напряжение».

Вместо RC -фильтров предлагается применять датчик положения ротора (ДПР) и перемножители напряжений. На рис. 1 изображены две блок-схемы

ТГ с ДПР и перемножителями (без выпрямителя напряжений СГ и с выпрямителем).

Тахогенератор на рис. 1,а подобен рассмотренному в [4] и отличается от него наличием ДПР. Последний при вращении вала ТГ создает m -фазное синусоидальное напряжение ($u_{д1}, u_{д2}, u_{д3}, \dots$), подобное m -фазному синусоидальному напряжению СГ (u_1, u_2, u_3, \dots). Для выходного напряжения ТГ справедливо выражение

$$u = K_{\Pi} K_{\Sigma} \sum_1^m u_i u_{дi},$$

где K_{Π} , K_{Σ} – коэффициенты усиления перемножителей и сумматора напряжений.

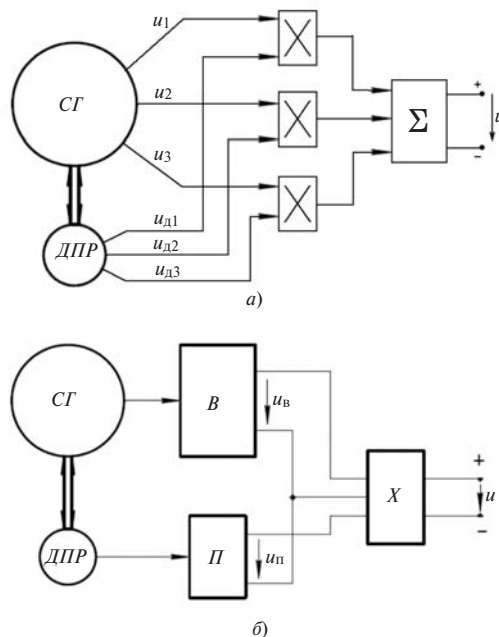


Рис. 1. Блок-схемы тахогенераторов постоянного тока: а – без выпрямителя напряжений СГ; б – с выпрямителем напряжений СГ; СГ – синхронный генератор; В – выпрямитель; ДПР – датчик положения ротора; П – преобразователь; Х – перемножитель напряжений; Σ – сумматор

Если напряжения СГ и ДПР строго синусоидальны с амплитудами U_m и U_{dm} , то нетрудно установить, что

$$u = \frac{m}{2} K_{\Pi} K_S U_m U_{dm},$$

т.е. напряжение не зависит от углового положения вала ТГ. Так как U_{dm} не зависит от частоты вращения вала ТГ n , а значение U_m пропорционально n , то выходное напряжение вала ТГ u также пропорционально частоте вращения n .

Здесь рассматриваются предложенные в [6] ТГ, блок-схема которых показана на рис. 1,б. Синхронный генератор имеет двух- или трехсекционную ЯО, выпрямитель выполнен по мостовой схеме, соответственно, из восьми или шести диодов. Преобразователь сигналов ДПР должен реализовывать одну из предложенных (или иную аналогичную) зависимость выходного напряжения от углового положения вала и ротора ТГ. Устройство ДПР и преобразователей будет рассмотрено ниже.

На рис. 2,а-в изображены на межкоммутационном интервале (МКИ) зависимости выпрямленного напряжения u_B , выходного напряжения пре-

образователя u_{Π} и выходного напряжения ТГ u от углового положения его вала и ротора а.

Под МКИ будем понимать время протекания тока через каждую пару диодов выпрямителя (по-другому, период повторения выпрямленного напряжения). Началу МКИ соответствует угол α_0 , середине – 90° , а концу – $180^\circ - \alpha_0$. Для ТГ с двухсекционной ЯО значение $\alpha_0 = 45^\circ$, а для ТГ с трёхсекционной ЯО $\alpha_0 = 60^\circ$.

Согласно рис. 2,а и б зависимость $u_B(a)$ – выпуклая кривая относительно оси абсцисс, а $u_{\Pi}(a)$ – вогнутая. Поэтому выходное напряжение ТГ u как пропорциональное произведению напряжений u_B и u_{Π} должно изменяться со значительно меньшей пульсацией, чем u_B (см. рис. 2, а и в). Это возможно при обеспечении надлежащей зависимости выходного напряжения преобразователя u_{Π} от углового положения вала а, т.е. $u_{\Pi}(a)$.

Будем считать, что на каждом МКИ напряжение на выходе выпрямителя u_B является универсальной функцией от угла а:

$$u_B = (a + b \sin a)n,$$

где a, b зависят от формы осциллограмм напряжений СГ и схемы их выпрямления; n – частота вращения вала ТГ.

Будем оперировать относительными значениями напряжений:

$$\bar{u}_B = \frac{u_B}{bn} = c + \sin a; \tag{1}$$

$$\bar{u}_{\Pi} = u_{\Pi} / U_{\Pi \max}; \quad \bar{u} = \bar{u}_B \bar{u}_{\Pi},$$

где $c = a/b$; $U_{\Pi \max}$ – максимальное значение напряжения u_{Π} , которое не является функцией от n . Значение c зависит от конфигурации полюсов индуктора. Чем больше a и c , тем меньше изменяется при повороте вала ТГ выпрямленное напряжение u_B . При $c = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ отношение $u_B(45^\circ)/u_B(90^\circ)$ равно соответственно 0,707; 0,805; 0,854; 0,893; 0,902.

Для напряжения на выходе ТГ справедливо выражение:

$$u = K_{\Pi} u_B u_{\Pi} = b U_{\Pi \max} \bar{u}_B \bar{u}_{\Pi} n.$$

Как видно из этой формулы, напряжение u на выходе ТГ линейно зависит от n , поскольку напряжение u_B пропорционально частоте вращения n , а напряжение u_{Π} не зависит от нее. Пульсацию выходного напряжения рассчитаем по формуле

$$\epsilon = \frac{\bar{u}_{\max} - \bar{u}_{\min}}{\bar{u}_{\max} + \bar{u}_{\min}} 100, \%, \tag{2}$$

где $\bar{u}_{\max}, \bar{u}_{\min}$ – максимальное и минимальное относительные значения напряжения \bar{u} .

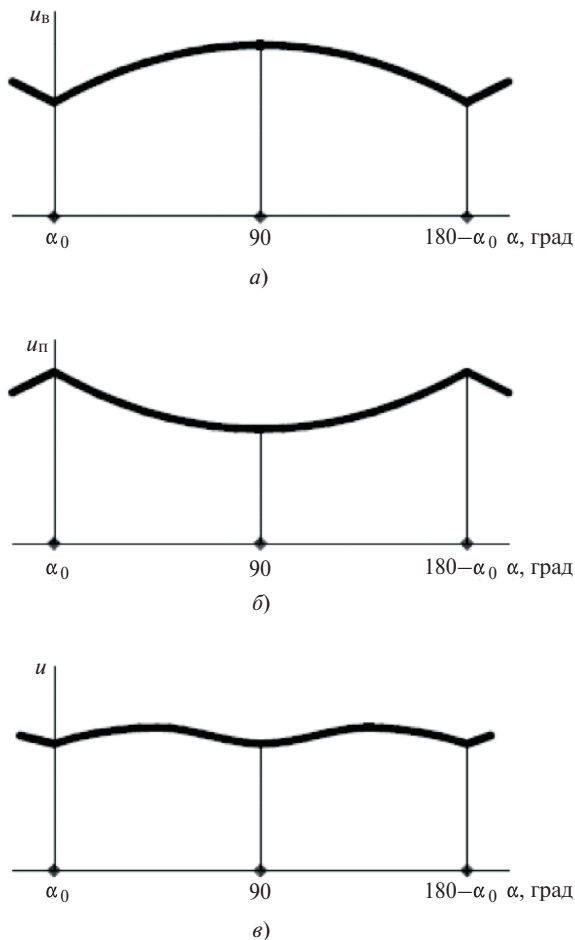


Рис. 2. Напряжения тахогенератора: а – на выходе выпрямителя; б – на выходе преобразователя; в – на выходе тахогенератора

Считаем, что при $\alpha = \alpha_0$, $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ значение функции $\bar{u}(\alpha)$ должно быть минимальным (см. рис. 2,в), т.е.

$$\bar{u}_{\min} = \bar{u}(\alpha_0) = \bar{u}(90^\circ). \quad (3)$$

Максимальное значение функции $\bar{u}(\alpha)$, т.е. \bar{u}_{\max} , будем определять из условия

$$d\bar{u}/d\alpha = 0. \quad (4)$$

Решив уравнение (4), найдем значение его корня $\alpha = \alpha_m$, а затем — значение \bar{u}_{\max} как $\bar{u}(\alpha_m)$ и пульсацию ϵ по (2).

Вначале рассмотрим ТГ с двухсекционной ЯО. Если ТГ содержит только СГ и выпрямитель (при этом $\bar{u} = \bar{u}_B$), то согласно рис. 2,а и формулам (1), (2)

$$\epsilon = \frac{\bar{u}(90^\circ) - \bar{u}(45^\circ)}{\bar{u}(90^\circ) + \bar{u}(45^\circ)} 100 = \frac{29,29}{2c + 1,7071} \%.$$

В частном случае при $c = 0$, т.е. $\bar{u} = \bar{u}_B = \sin \alpha$, значение $\epsilon = 17,16\%$.

Для ТГ по рис. 1,б с двухсекционной ЯО предлагаются следующие зависимости $\bar{u}_{\Pi}(\alpha)$, изображенные на рис. 2,б:

$$\bar{u}_{\Pi} = 1 + 0,7071r - r \sin \alpha; \quad (5)$$

$$\bar{u}_{\Pi} = 1 + q \cos 2\alpha. \quad (6)$$

При $\alpha = \alpha_0 = 45^\circ$ и $\alpha = 135^\circ$ значение $\bar{u}_{\Pi} = 1$; при $\alpha = 90^\circ$ значение $\bar{u}_{\Pi} = 1 - 0,2929r$ и $\bar{u}_{\Pi} = 1 - q$.

Если \bar{u}_{Π} изменяется по (5), то относительное значение выходного напряжения ТГ изменяется по формуле

$$\bar{u} = \bar{u}_B \bar{u}_{\Pi} = (c + \sin \alpha)(1 + 0,7071r - r \sin \alpha). \quad (7)$$

Согласно (3) и (7)

$$\bar{u}_{\min} = (c + 0,7071) \times (c + 1)(1 - 0,2929r),$$

отсюда $r = \frac{1}{1+c}$; $\bar{u}_{\Pi \min} = 1 - \frac{0,2929}{1+c}$; $\bar{u}_{\min} = c + 0,7071$.

Применив (4), получим

$$\alpha_m = \arcsin \frac{1 + r(0,7071 - c)}{2r} = 58,6^\circ.$$

При $c = 0$: $r = 1$; $\bar{u} = \sin \alpha(1,7071 - \sin \alpha)$; $\bar{u}_{\min} = \bar{u}_{\Pi \min} = 0,7071$; $\bar{u}_{\max} = 0,7285$; $\epsilon = 1,49\%$; $17,16/1,49 = 11,5$.

Если \bar{u}_{Π} изменяется по (6), то

$$\bar{u} = (c + \sin \alpha)(1 + q \cos 2\alpha). \quad (8)$$

Согласно (3) и (8):

$$\bar{u}_{\min} = (c + 0,7071) \times (c + 1)(1 - q),$$

отсюда $q = \frac{0,2929}{1+c}$; $\bar{u}_{\Pi \min} = 1 - \frac{0,2929}{1+c}$; $\bar{u}_{\min} = c + 0,7071$.

Применив (4), получим уравнение

$$(1 - q/2) \cos \alpha_m - 2cq \sin 2\alpha_m + 3q(\cos 3\alpha_m)/2 = 0.$$

При $c = 0$: $q = 0,2929$; $\bar{u} = \sin \alpha(1 + 0,2929 \cos 2\alpha)$;

$\bar{u}_{\min} = \bar{u}_{\Pi \min} = 0,7071$; $1,9428 \cos \alpha_m + \cos 3\alpha_m = 0$; $\alpha_m = 59,1^\circ$; $\bar{u}_{\max} = 0,7393$; $\epsilon = 2,23\%$; $17,16/2,23 = 7,70$.

Рассмотрим ТГ с трехсекционной ЯО. Если ТГ содержит только СГ и выпрямитель (при этом $\bar{u} = \bar{u}_B$), то согласно рис. 2,а и формулам (1) и (2)

$$\epsilon = \frac{\bar{u}(90^\circ) - \bar{u}(60^\circ)}{\bar{u}(90^\circ) + \bar{u}(60^\circ)} 100 = \frac{13,4}{2c + 1,866} \% ,$$

в частном случае при $c = 0$, т.е. $\bar{u} = \bar{u}_B = \sin \alpha$, значение $\epsilon = 7,18\%$.

Для ТГ по рис. 1,б с трёхсекционной ЯО предлагаются следующие зависимости $\bar{u}_{\Pi}(\alpha)$, изображенные на рис. 2,б:

$$\bar{u}_{\Pi} = 1 + 0,866s - s \sin \alpha; \quad (9)$$

$$\bar{u}_{\Pi} = 1 + v \sin 3\alpha. \quad (10)$$

При $\alpha = \alpha_0 = 60^\circ$ и $\alpha = 120^\circ$ значение $\bar{u}_{\Pi} = 1$; при $\alpha = 90^\circ$ значение $\bar{u}_{\Pi} = 1 - 0,13s$ и $\bar{u}_{\Pi} = 1 - v$.

Если \bar{u}_{Π} изменяется по (9), то для относительного значения выходного напряжения ТГ можно записать:

$$\bar{u} = (c + \sin \alpha)(1 + 0,866s - s \sin \alpha). \quad (11)$$

Согласно (3) и (11)

$$\bar{u}_{\min} = (c + 0,866) \times (c + 1)(1 - 0,134s),$$

отсюда $s = \frac{1}{1+c}$; $\bar{u}_{\Pi \min} = 1 - \frac{0,134}{1+c}$; $\bar{u}_{\min} = c + 0,866$.

Применив (4), получим

$$\alpha_m = \arcsin \frac{1 + s(0,866 - c)}{2s} = 68,9^\circ.$$

При $c = 0$: $s = 1$; $\bar{u} = \sin \alpha(1,866 - \sin \alpha)$; $\bar{u}_{\min} = \bar{u}_{\Pi \min} = 0,866$; $\bar{u}_{\max} = 0,8705$; $\epsilon = 0,26\%$; $7,18/0,26 = 27,6$.

Если \bar{u}_{Π} изменяется по (10), то

$$\bar{u} = (c + \sin \alpha)(1 + v \sin 3\alpha). \quad (12)$$

Согласно (3) и (12)

$$\bar{u}_{\min} = (c + 0,866) \times (c + 1)(1 - v),$$

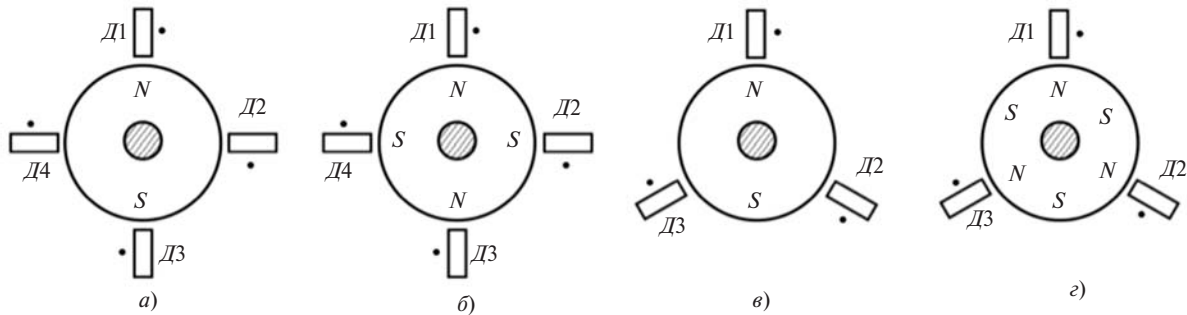


Рис. 3. К устройству датчика положения ротора: а- $s = 2, p_d = p = 1$; б- $s = 2, p_d = 2p = 2$; в- $s = 3; p_d = p = 1$; г- $s = 3, p_d = 3p = 3$

отсюда $v = \frac{0,134}{1+c}$; $\bar{u}_{\text{п min}} = 1 - \frac{0,134}{1+c}$; $\bar{u}_{\text{min}} = c + 0,866$.

Применив (4), получим уравнение

$$\cos a_m + 3vc\cos 3a_m + v(2\sin 4a_m - \sin 2a_m) = 0.$$

При $c = 0$: $v = 0,134$; $\bar{u} = \sin a(1 + 0,134\sin 3a)$;

$$\bar{u}_{\text{min}} = \bar{u}_{\text{pmin}} = 0,866;$$

$$7,463\cos a_m + 2\sin 4a_m - \sin 2a_m = 0; a_m = 69,2^\circ;$$

$\bar{u}_{\text{max}} = 0,8768$; $\epsilon = 0,62\%$; $7,18 / 0,62 = 11,6$, чем больше значение c , тем меньше значение пульсаций ϵ

Рассмотрим устройство и работу ДПР и преобразователя сигналов ДПР, обеспечивающих зависимости $\bar{u}_{\text{п}}$ (а) по (5), (6) для ТГ с двухсекционной ЯО и по (9), (10) для ТГ с трехсекционной ЯО.

На рис. 3 изображены ДПР в виде датчиков Д1, Д4 на статоре и кольцевого постоянного магнита на роторе для различного числа секций s якорной обмотки и пар полюсов p генератора и p_d датчика.

Датчики Д1, Д4 могут представлять собой, например, элемент Холла или интегральную микро-

схему с элементом Холла и линейным ускорителем. Датчики установлены в обойме, которая может поворачиваться относительно якоря для определения и фиксирования согласованного с якорем положения. Точками обозначены начальные сигнальные выходы датчиков.

На рис. 4 изображены схемы преобразования сигналов ДПР для ТГ с двухсекционной ЯО и различного числа пар полюсов p и p_d .

На рис. 5 изображены схемы преобразования сигналов ДПР для ТГ с трехсекционной ЯО и различных чисел пар полюсов СГ p и ДПР p_d .

Преобразователь сигналов ДПР состоит из выпрямителя В1, В2 или В3 и сумматора-вычитателя С и работает следующим образом. Выпрямители выпрямляют напряжение датчиков Д1, Д4, соединенных между собой, как показано на рис. 4 и 5. Напряжение $u_{\text{вп}}$ на выходе выпрямителей по форме подобно напряжению $u_{\text{в}}$ на выходе выпрямителя напряжений СГ (см. рис. 2,а); оно поступает на вход 1 сумматора-вычитателя С, состоя-

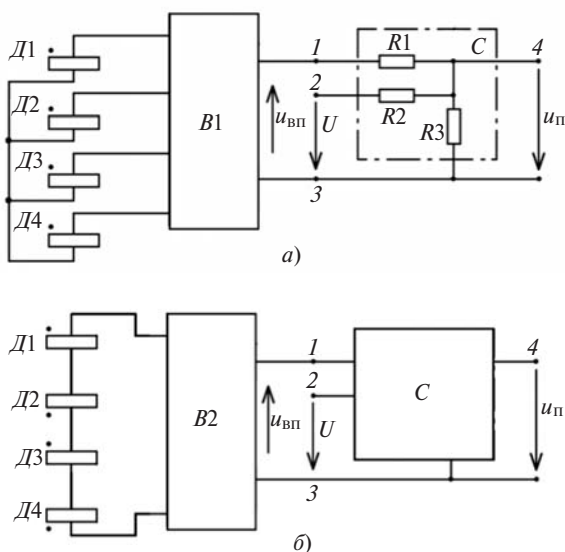


Рис. 4. Схемы преобразования сигналов датчика положения ротора для тахогенератора с двухсекционной якорной обмоткой: а - $p_d = p$; б - $p_d = 2p$; В1 – мостовой выпрямитель из 8 диодов; В2 – мостовой выпрямитель из 4 диодов; С – сумматор-вычитатель

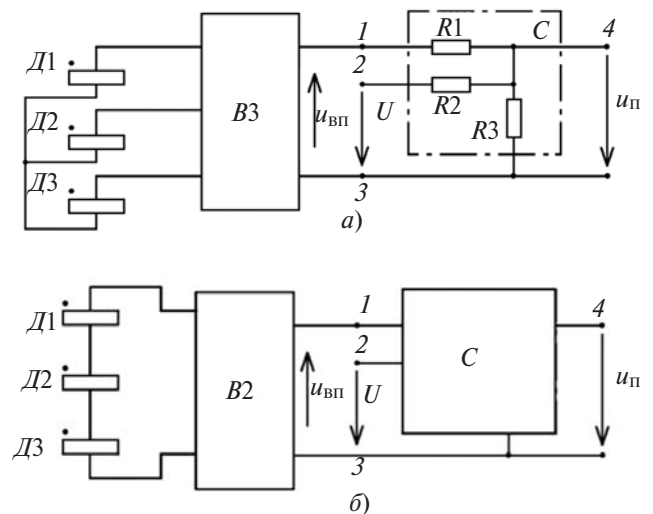


Рис. 5. Схемы преобразования сигналов датчика положения ротора для тахогенератора с трехсекционной якорной обмоткой: а - $p_d = p$; б - $p_d = 3p$; В2 – мостовой выпрямитель из 6 диодов; В3 – мостовой выпрямитель из 4 диодов; С – сумматор-вычитатель

шего из резисторов R_1 , R_2 и R_3 . На вход 2 подается постоянное напряжение U . Для напряжения u_{Π} на выходе преобразователя нетрудно получить формулу

$$u_{\Pi} = \frac{UR_1 - u_{\text{вп}} R_2}{R_1 + R_2 + R_1 R_2 / R_3}$$

В начале и конце каждого МКИ напряжение $u_{\text{вп}}$ минимально, поэтому напряжение u_{Π} максимально. В середине каждого МКИ напряжение $u_{\text{вп}}$ максимально, а u_{Π} минимально. Поэтому напряжение u_{Π} преобразователей по рис. 4 и 5 изменяется на МКИ так, как показано на рис. 2,б, а напряжение ТГ u — как показано на рис. 2,в.

Изменяя значение сопротивления резистора R_2 , можно изменять значения коэффициентов r , q , s или ν в (5)–(12) и тем самым минимизировать пульсации e выходного напряжения ТГ.

Выводы. Предложенные фильтры благодаря безынерционности эффективно сглаживают выпрямленное напряжение ТГ с различным числом секций ЯО, причем одинаково для всех возможных, в том числе малых, значений частоты вращения вала ТГ. Даже при значительных отклонениях от предложенных зависимостей \bar{u}_{Π} (а), но при соблюдении условий $\bar{u}_{\Pi \min} \gg 1 - 0,2929/(1+c)$ для ТГ с двух-

секционной ЯО и $\bar{u}_{\Pi \min} \gg 1 - 0,134/(1+c)$ для ТГ с трехсекционной ЯО, значение пульсаций выходного напряжения не будет превышать 2%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. — М.: Высшая школа, 1976, 416 с.
2. Путников В.В., Рыбаков В.С., Слесарев А.В. Реверсивные бесконтактные тахогенераторы постоянного тока. — М.: Информэлектро, 1970, 32 с.
3. Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока. — М.: Энергоатомиздат, 1982, 128 с.
4. Гридин В.М. Бесконтактные тахогенераторы постоянного тока с несимметричной якорной обмоткой. — Электричество, 2013, № 6, с. 42–46.
5. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 2000, 575 с.
6. А.с. № 1684870 (РФ). Вентильный генератор/В.М. Гридин. — БИ, 1991, № 38.

[31.10.13]

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.

Contact less DC Tachogenerators Fitted with an Inertialess Filter of Rectified Voltage

V. M. GRIDIN

Contact less DC tachogenerator containing asynchronous generator, a rectifier of its output voltages, a rotor position sensor, (RPS), a converter of its signals, and a device for multiplying the converter voltage by the rectified voltage are considered. The generator is made with a two- or three-section armature winding, and the rectifier is made according to the bridge circuit arrangement.

Four dependences of the converter output voltage on the rotor angular position are proposed together with the RPS design and a circuit for converting its signals. The considered tachogenerators have the output voltage ripple considerably smaller than usual DC tachogenerators; it does not exceed 2% and does not depend on the shaft rotation frequency.

Key words: contact less DC tachogenerator, synchronous generator, rotor position sensor, multiplier of voltages, output voltage ripple

REFERENCES

1. Yufarov F.M. *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv* (Electrical Machines of Automatic Devices). Moscow. Publ. «Vysshaya shkola» (Higher School), 1976, 416 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., Rybkin Yu.P. *Beskontaktnye takhogenery postoyannogo toka* (Contactless DC tachogenerators with an unbalanced armature winding). Moscow. Energoatomizdat, 1982, 128 p.
4. Gridin V.M. *Elektrichstvo* (Electricity), 2013, № 6, pp. 42–46.
5. Popov V.P. *Osnovy teorii tsepei*. (Basis of the Circuit Theory). Moscow. Publ. «Vysshaya shkola» (Higher School), 2000, 575 p.
6. A.s. № 1684870 (RF). *Ventil'nyi generator* (Valve generator)/V.M. Gridin. Byull. Izobretenii (Byull. for Inventions), 1991, № 38.

Author: Vladimir Mikhailovich Gridin graduated from the Electromechanical Department of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI) in 1963. In 1979 he received the degree of Cand. Techn. Sci. from the MPEI. He is a Lecturer in the Chair for Electrical Engineering and Industrial Electronics at the Bauman Moscow State Technical University.

