

УДК 51-74; 62-768.3

О. И. Козырева, Ю. Н. Журавлев, И. В. Плохов, А. В. Ильин

ДИАГРАММЫ АЙНСА — СТРЕТТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГИТНОГО КОНТУРА УЗЛА СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЕМА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Разработан аналитический метод определения зон параметрической неустойчивости электромагнитной колебательной системы узла скользящего токосъёма с использованием уравнения Матье II порядка для диссипативной системы с одной степенью свободы. Приводятся результаты вычислительного эксперимента и рекомендации.

Ключевые слова: *скользящий электрический контакт, зоны параметрической неустойчивости, демпфирующее устройство.*

Энергетические турбогенераторы имеют конструктивный узел, носящий название щеточно-контактный аппарат (ЩКА) или узел скользящего токосъёма (УСТ). Надёжность работы турбогенератора определяется, в том числе, надёжностью функционирования данного узла. На щетки, контактирующие с вращающимся токосъёмником, действуют значительные динамические усилия, которые приводят к механическим нарушениям контакта и процесса токопередачи [1, 2]. Кроме того в электрических цепях ЩКА возникают электромагнитные резонансные явления, обусловленные параметрической модуляцией переходного сопротивления и ёмкости в зоне контакта [3–6]. Описанные явления вызывают повышенное искрение [7–10] и износ контактирующих деталей. Одним из важных способов снижения уровня искрения является устранение параметрических резонансных процессов в электромагнитных контурах ЩКА. Для этого необходимо исследовать области параметрической неустойчивости данной колебательной системы [11–15] и установить соответствующие ограничения на конструктивные параметры узла, а также определить характеристики внешних демпфирующих устройств, позволяющих избежать указанных параметрических резонансов. Описанные задачи являются актуальными, т. к. их решение позволит повысить надёжность ЩКА и турбогенератора в целом.

В данной статье аналитически решим задачу построения зон параметрической неустойчивости электромагнитной колебательной системы ЩКА турбогенератора, а так же приведем методику подбора параметров демпфирующего устройства для макета данной системы.

Рассмотрим электрические процессы в контуре независимого одиночного СК. Схема замещения представлена на рис. 2.

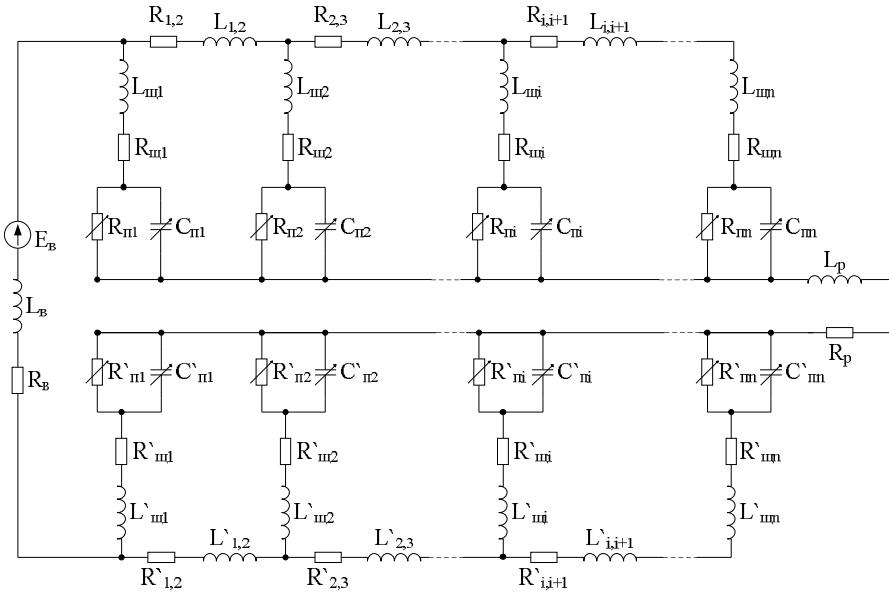


Рис. 1. Электромагнитная схема замещения узла токосъема турбогенератора

$L_{щ1}, L_{щ2} \dots L_{щn}; R_{щ1}, R_{щ2} \dots R_{щn}$ — индуктивность и электрическое сопротивление отдельного щеточного контакта на первом токосъемном кольце;

$L'_{щ1}, L'_{щ2} \dots L'_{щn}; R'_{щ1}, R'_{щ2} \dots R'_{щn}$ — индуктивность и электрическое сопротивление отдельного щеточного контакта на втором токосъемном кольце;

$R_{п1}, R_{п2} \dots R_{пn}; C_{п1}, C_{п2} \dots C_{пn}$ — электрическое сопротивление и ёмкость переходного слоя отдельного щеточного контакта на первом токосъемном кольце (периодические коэффициенты);

$R'_{п1}, R'_{п2} \dots R'_{пn}; C'_{п1}, C'_{п2} \dots C'_{пn}$ — электрическое сопротивление и ёмкость переходного слоя отдельного щеточного контакта на втором токосъемном кольце (периодические коэффициенты);

L_B, R_B, E_B — индуктивность, электрическое сопротивление и ЭДС источника питания обмотки возбуждения ТГ

L_p, R_p — индуктивность и электрическое сопротивление обмотки ротора;

$L_{1,2}, L_{2,3} \dots L_{i,i+1}; R_{1,2}, R_{2,3} \dots R_{i,i+1}$ — индуктивность и электрическое сопротивление между двумя щеточными контактами на первом токосъемном кольце;

$L'_{1,2}, L'_{2,3} \dots L'_{i,i+1}; R'_{1,2}, R'_{2,3} \dots R'_{i,i+1}$ — индуктивность и электрическое сопротивление между двумя щеточными контактами на втором токосъемном кольце.

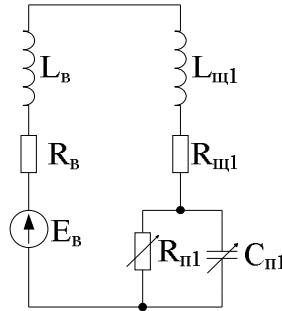


Рис. 2. Схема замещения одиночного скользящего контакта

Данный контур имеет операторное сопротивление:

$$Z_1(p) = L \cdot p + R + \frac{R_{n1}}{1 + R_{n1}C_{n1}p}.$$

Тогда, операторное уравнение цепи имеет вид:

$$[LR_{n1}C_{n1}p^2 + (L + RR_{n1}C_{n1})p + (R + R_{n1})]I_1 = (1 + R_{n1}C_{n1}p) \cdot E_B,$$

где $R = R_{щ1} + R_г$, $L = L_{щ1} + L_г$.

Линейное дифференциальное уравнение II порядка с периодическими коэффициентами получается путем обратного преобразования Лапласа. Напряжение обмотки возбуждения задаем постоянным $E_г = const$:

$$I'' + \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_{n1}C_{n1}}\right)I' + \frac{1}{LC_{n1}}\left(1 + \frac{R}{R_{n1}}\right)I = \frac{1}{LR_{n1}C_{n1}}E_г. \quad (1)$$

Проведем исследование устойчивости электромагнитной системы, описываемой данным уравнением.

Дифференциальное уравнение вида $A(t)\frac{d^2q}{dt^2} + B(t)\frac{dq}{dt} + C(t)q = 0$, в общем случае описывает параметрические колебания линейной системы. Коэффициенты в этом уравнении зависят от некоторых параметров, характеризующих свойства параметрического воздействия. При определенных значениях параметров, решение уравнения может оказаться неустойчивым. Множество точек, соответствующих неустойчивости, формируют (образуют) в пространстве параметров области динамической неустойчивости [11, 16, 17]. В случае если варьируемыми параметрами являются частоты периодического параметрического воздействия, наибольший интерес представляет частотное соотношение, называемое параметрическим резонансом [11–17].

В нашем случае внешними параметрами воздействия на систему являются кинематические возмущения, передаваемые на щетку со стороны контактной поверхности вращающегося токосъемника. Эти возмущения влекут за собой периодические колебания сопротивления [3, 4, 9, 10] и ёмкости переходного слоя скользящего контакта. При большой глубине модуляции параметров переходного слоя, система может оказаться в зоне параметрического резонанса.

Для нахождения параметрических резонансов системы, будем строить границы областей неустойчивости, пользуясь уравнением колебаний Матье II порядка для диссипативной системы с одной степенью свободы [11].

Уравнение Матъе имеет вид:

$$I'' + 2\varepsilon I' + \omega_0^2(1 + 2\mu \cdot \cos\omega t)I = 0, \quad (2)$$

Приведем уравнение (1) к форме уравнения Матъе.

Примем $R = const$, $L = const$, и будем считать, что сопротивление переходного слоя одного щеточного контакта R_{n1} [3–5] и его ёмкость C_{n1} изменяются гармонически с частотой ω , амплитудами a_R и a_C и постоянными составляющими R_0 и C_0 :

$$R_{n1}(t) = R_0(1 \pm \varepsilon_R \cos\omega t); C_{n1}(t) = C_0(1 \pm \varepsilon_C \cos\omega t), \quad (3)$$

где $\varepsilon_R = \frac{a_R}{R_0}$, $\varepsilon_C = \frac{a_C}{C_0}$ — параметры глубины модуляции, $\varepsilon_R, \varepsilon_C \ll 0$.

Определим, приближенно, коэффициенты для уравнения Матъе [11, 16, 17]: ω_0 — собственная частота электромагнитных колебаний в рассматриваемом контуре,

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC_0} \left(1 + \frac{R}{R_0}\right);$$

μ — совокупная глубина модуляции параметров колебательного контура (коэффициент возбуждения),

$$2\mu = \varepsilon_C + \varepsilon_R \frac{R}{R+R_0}; \quad (4)$$

ε — параметр затухания электромагнитных колебаний (диссипация),

$$2\varepsilon = \frac{R}{L} + \frac{1}{R_0 C_0}; \quad (5)$$

ω — частота параметрического возбуждения (частота модуляции).

Построим границу неустойчивости для диссипативной системы на плоскости $\mu, \eta = \frac{\omega}{2\omega_0}$, [6]. Для границ расчета неустойчивости используем следующие формулы. Для первой области неустойчивости (главного параметрического резонанса):

$$\omega \approx 2\omega_0 \sqrt{1 \pm \sqrt{\mu^2 - \left(\frac{\vartheta}{\pi}\right)^2}};$$

Для второй области неустойчивости:

$$\omega \approx \omega_0 \sqrt{1 - \mu^2 \pm \sqrt{\mu^4 - \left(\frac{\vartheta}{\pi}\right)^2 \cdot (1 - \mu^2)}},$$

где $\vartheta = 2\pi\varepsilon/\omega_0$ — декремент свободных колебаний.

Расчет для построения областей проводим, используя параметры [18–20] экспериментальной установки ЩКА. Т. к. R_{n1} и C_{n1} — модулируемые параметры, проведем расчет для нескольких значений R_0 и C_0 .

Параметры областей неустойчивости

Параметры модели									Расчетные параметры		
№ области	$R_0, \text{Ом}$	$C_0, \text{нФ}$	$R_0, \text{Ом}$	$L_0, \text{мГн}$	ε_R	ε_C	$R_{ц1}, \text{Ом}$	$L_{ц1}, \text{Гн}$	$\varepsilon, \text{ед.}$	$\omega_0, \text{рад/с}$	$\vartheta, \text{ед.}$
1	40	200	1,3	0,3	0,5	0,5	$8 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	$5,217 \cdot 10^4$	$1,308 \cdot 10^5$	2,507
2	70								$3,788 \cdot 10^4$	$1,303 \cdot 10^5$	1,827
3	90								$2,995 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$	1,447
4	200								$1,467 \cdot 10^4$	$1,295 \cdot 10^5$	0,712

По расчетным данным построим графики, рис. 3.

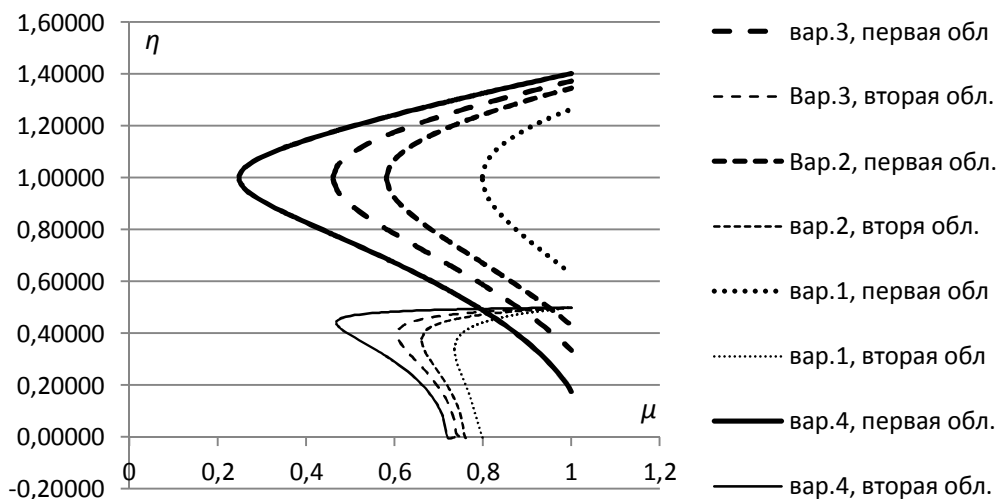


Рис. 3. Области электромагнитной неустойчивости для макета ЩКА, при нескольких значениях переходного сопротивления

Как видно из графиков, области неустойчивости появляются при достаточно высоком значении сопротивления R_0 . С ростом R_0 , зоны неустойчивости смещаются в сторону более низких значений коэффициента модуляции.

Аналогичный расчет для нескольких значений переходной ёмкости C_0 показывает, что наблюдается обратная зависимость: при росте C_0 , границы областей неустойчивости смещаются в направлении высоких значений коэффициента модуляции.

Имея построенные зоны, можно увидеть по графику будут ли ЭМ процессы в контуре устойчивыми, при коэффициенте модуляции рассчитанным по формуле (4).

Коэффициент модуляции, для ЭМ контура $\mu=0,256$. Таким образом, ЭМ контур попадает в зону параметрического резонанса при $R_0 = 180 \text{ Ом}$, см. рис.4.

По графику 4 определим значения $\eta = \frac{\omega}{2\omega_0}$, при которых контур будет неустойчив.

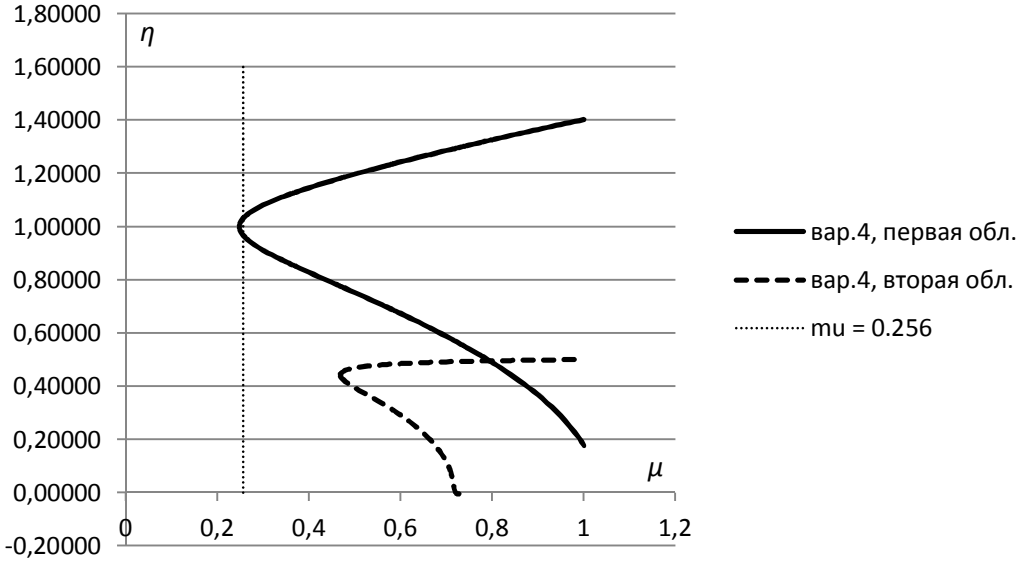


Рис. 4. Области электромагнитной неустойчивости в сравнении с величиной коэффициента модуляции μ в электромагнитном контуре ЩКА

Значения, определенные по рис. 4, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Границы зоны неустойчивости при $\mu=0,256$

	η	ω (резонансные частоты), рад/с	f , кГц
от	1,0577	2,739e5	43,6
до	0,9387	2,431e5	38,69

Т. о. если частота внешнего воздействия будет находиться в диапазоне от 43,6 кГц до 38,69 кГц исследуемый ЭМ контур будет неустойчив.

Таким образом, нами найдены возможные зоны параметрической неустойчивости по частоте модуляции ω для электромагнитного контура одной изолированной щетки, при заданных значениях совокупной глубины модуляции μ , собственной частоте электромагнитных колебаний ω_0 и диссипации ε .

Для исключения параметрического резонанса в рассматриваемой системе следует избегать режимов работы ЩКА, при которых средняя величина переходного сопротивления скользящего контакта превышает допустимое значение. В случае, когда избежать этого не удастся, нами предлагается введение в ЭМ контур демфирующего устройства [21], основным элементом которого является добавочная ёмкость, установленная между рабочей щеткой и контактной поверхностью вращающегося токосъемника.

Приведем расчет ЭМ цепи с добавочной ёмкостью для уединенного скользящего контакта.

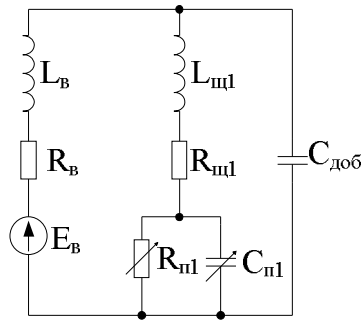


Рис. 5. Схема замещения одиночного скользящего контакта с добавочной ёмкостью

Составим уравнения в соответствии с данной схемой и, приведём их к форме уравнения Матъе ($C_{add} \equiv C_{доб}$).

$$I'' + \left(\frac{R_v}{L_v} + \frac{1}{R_{n1}(C_{add} + C_{n1})} \right) I' + \frac{1}{L_v(C_{add} + C_{n1})} \left(1 + \frac{R_v}{R_{n1}} \right) I = \frac{1}{L_v R_{n1} (C_{add} + C_{n1})} E_s$$

Тогда, коэффициенты для уравнения Матъе:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_v(C_{add} + C_{n1})} \left(1 + \frac{R_v}{R_{n1}} \right);$$

$$2\varepsilon = \frac{R_v}{L_v} + \frac{1}{R_{n1}(C_{add} + C_{n1})}.$$

Проведем расчет областей неустойчивости для макетной установки ЩКА с демпфирующим устройством, используя параметры [18–20], приведённые в таблице 3.

Таблица 3

Параметры электромагнитного контура ЩКА

Параметры модели										Расчетные параметры		
№	R ₀ , Ом	C ₀ , нФ	R _в , Ом	L _в , мГн	ε _R	ε _C	R _{щ1} , Ом	C _{add} , мкФ	L _{щ1} , Гн	ε, ед	ω ₀ , рад/с	θ, ед.
4	200	200	1,3	0,3	0,5	0,5	8 · 10 ⁻⁴	150	7,5 · 10 ⁻⁸	1,467 · 10 ⁴	1,295 · 10 ⁵	0,712

Графики строим для случая с переходным сопротивлением R₀, при котором возможно попадание ЭМ контура в зону неустойчивости.

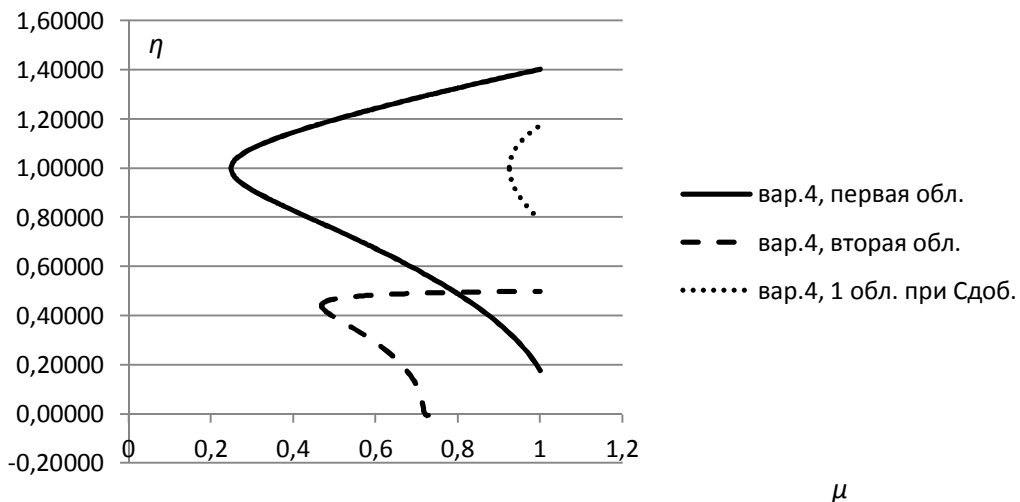


Рис. 6. Области ЭМ неустойчивости для макета ЩКА: 1 — при отсутствии добавочной ёмкости C_{add} ; 2 — при наличии добавочной ёмкости C_{add}

Как видно из рис. 6, при введении добавочной емкости $C = 150 \mu\text{кФ}$, неустойчивая область смещается в направлении высоких значений коэффициента модуляции. Расчетный коэффициент модуляции контура $\mu = 0,256$, не пересекает область, следовательно в контуре резонансные явления не наблюдаются. При увеличении добавочной ёмкости, области неустойчивости вообще исчезают. Т. е. при данном значении входных параметров, минимальное значение емкости для внешнего демпфирующего устройства около $150 \mu\text{кФ}$.

Для практического использования описанной методики необходимо исследовать области параметрической неустойчивости конкретной колебательной системы ЩКА и установить соответствующие ограничения на конструктивные параметры узла, а также определить характеристики внешних демпфирующих устройств, позволяющих избежать указанных параметрических резонансов. Описанные задачи являются актуальными, т. к. их решение позволит повысить надёжность ЩКА и турбогенератора в целом.

Выводы

Таким образом, мы нашли возможные зоны параметрической неустойчивости по частоте модуляции ω для электромагнитного контура одной изолированной щетки, при заданных значениях совокупной глубины модуляции μ и собственной частоте электромагнитных колебаний ω_0 , при наличии диссипации ϵ . Также, подобрали параметры внешнего демпфирующего устройства для устранения неустойчивости электромагнитных колебаний при нестабильных режимах работы щеточно-контактного аппарата.

Кинематическое возмущающее воздействие на щётку носит полигармонический характер и в нём присутствуют гармоники от 50 Гц до сотен тысяч. При этом

резонансные частоты механической колебательной системы «щётка — контактная поверхность» с учётом контактной жесткости ($C = 15\text{--}40$ МН/м) и массы щетки ($m = 0,01\text{--}0,15$ кг) будут, ориентировочно, находится в интервале от 1,5 кГц до 10 кГц. Следовательно, можно констатировать, что частоты параметрического возбуждения могут совпадать с зонами неустойчивости по уравнению Матье как для высокочастотного, так и для низкочастотного контуров, но наибольшая вероятность развития параметрического резонанса имеется у низкочастотного контура. Возможность данного совпадения необходимо учитывать при конструировании УСТ ТГ.

Литература

1. Механика скользящего контакта / В. И. Нэллин, Н. Я. Богатырев, Л. В. Ложкин и др. М.: Транспорт. 1966.
2. Кончиц В. В., Мешков В. В., Мышкин В. В. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника. 1986.
3. Плохов И. В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъёма турбогенераторов. Диссертация доктора технических наук. СПб.: СПбГПУ, 2001.
4. Плохов И. В. Модель динамики токопередачи через скользящий контакт // Электротехника. М., 2005. № 2. С. 28–33.
5. Ильин А. В., Плохов И. В., Козырева О. И. Моделирование процессов электрофрикционного взаимодействия в узлах скользящего токосъёма. // Научно-технический вестник Поволжья. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. № 4. С. 166–173.
6. Ильин А. В., Плохов И. В., Козырева О. И. Моделирование микрорельефа поверхностей контактирующих деталей. // Научно-технический вестник Поволжья. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. № 5. С. 180–183.
7. Holm P. Theory of the sparking during communication on dynames // IEEE Transactions on Power Apparatus and System. 1962. № 63. P. 588–590.
8. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Иностранная литература. 1961.
9. Greenwood J. A. Constriction resistance and the real area of contact. British Journal of appl. Physics. 1966. V. 17. P. 1621–1631.
10. Yip F. C., Venart J. E. S. Surface topography effects in the estimation of thermal and electrical contact resistance. In: Proc. Inst. Mech. Eng., 1968. V. 182. Pt. 3K. P. 81.
11. Вибрации в технике, Т. 1, М.: «Машиностроение», 1978., С. 121.
12. Мандельштам Л. И. Лекции по теории колебаний, М., 1972.
13. Мандельштам Л. И. Основы теории колебаний, 2 изд., М., 1988.
14. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. М., 1984.
15. Мэтьюс Дж., Уокер Р. Математические методы в физике. Пер. с англ. М.: Атомиздат. 1972. 392 с.
16. Паровик Р. И. Диаграммы Стретга-Айнса для обобщенного уравнения матье. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2012. № 1(4). С. 29–30. ISSN 2079-6641.
17. McLachlan, N. W., Theory and Application of Mathieu Functions, Clarendon Press, Oxford, 1947.
18. Лившиц П. С. Справочник по щеткам электрических машин. М.: Энергоатомиздат. 1983.
19. Веселовский В. С. Угольные и графитовые конструкционные материалы. М., 1966.
20. Шулепов С. В., Физика углеграфитовых материалов, М., 1972.
21. Устройство для уменьшения искрообразования в узле скользящего токосъёма / Плохов И. В., Ильин А. В., Исаков А. Н., Козырева О. И. // Патент на полезную модель RU132630, опубл. 2013.09.20.

Об авторах

Козырева Оксана Игоревна — старший лаборант кафедры «Электропривод и системы автоматизации», аспирант, электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: ks_33n@rambler.ru

Журавлёв Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики, инженерно-строительный факультет, Псковский государственный университет, Россия.

Плохов Игорь Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и системы автоматизации», электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: igor_plohov@list.ru

Ильин Александр Викторович — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации», электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: al.ilyin@yandex.ru

O. I. Kozyreva, Yu. N. Zhuravlev, I. V. Plohov, A. V. Iliin

CHART FOR INCE-STRUTT OF ELECTRIC CIRCUITS OF THE BRUSH-CONTACT DEVICES TURBOGENERATOR

The problem of determination of the analytical solution of the problem of parametric instabilities of electromagnetic vibratory system node sliding contact with the Mathieu equation II order for a dissipative system with one degree of freedom are seen. The results of computational experiments and recommendations are considered.

Key words: elektrofriktsionnoe interaction, sliding electrical contact simulation.

About the author(s)

Kozyreva Oksana Igorevna, Assistant of the Department of Electric Drive and Systems of Automation, Faculty of Electromechanics, Pskov State University, Russia.

E-mail: ks_33n@rambler.ru

Zhuravlev Yuri Nikolaevich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Structural mechanics, Civil Engineering Department, Pskov State University, Russia.

Plohov Igor Vladimirovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Drive and Systems of Automation, Faculty of Electromechanics, Pskov State University, Russia.

E-mail: igor_plohov@list.ru

Ilyin Alexander Viktorovich, Senior Lecturer of the Department of Electric Drive and Systems of Automation, Faculty of Electromechanics, Pskov State University, Russia.

E-mail: al.ilyin@yandex.ru