

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Б. И. КОСТЫЛЕВ, Р. Ф. БЕКИШЕВ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Аналитическое исследование коммутации проводится, как правило, со значительными допущениями в отношении учета свойств скользящего контакта и неидентичности коммутационных циклов. В практике расчетов коммутации широко используются статические вольтамперные характеристики, причем часто полученные путем усреднения характеристик анодно- и катодно-поляризованной щеток, что не может не сказаться на точности проводимых расчетов [1, 2].

С другой стороны, коммутационный процесс по своему существу является динамическим. В этих условиях фактически происходит формирование скользящего контакта. Поэтому вполне естественно стремление при аналитических исследованиях коммутации учитывать реальные динамические вольтамперные характеристики как с целью уточнения расчетов, так и ведения их на основе правильных физических представлений коммутационного процесса [3].

В настоящей статье приводятся результаты аналитического исследования коммутации в ЭМУ поперечного поля на основе использования динамических вольтамперных характеристик, полученных отдельно для щеток обеих полярностей, а при учете свойств скользящего контакта учитывалось влияние емкости между коллекторной пластиной и щеткой в процессе контактирования.

Характеристики получены по кривым коммутации тока и падения напряжения между щеткой и коллекторной пластиной при использовании щеток марки ЭГ-8.

Известно, что структура эмпирической формулы должна соответствовать физической сущности рассматриваемого процесса, поэтому аппроксимация вольтамперных характеристик должна быть произведена с учетом этого требования.

Анализ полученных динамических вольтамперных характеристик скользящего контакта позволил установить зависимость падения напряжения от свойств контакта и условий его формирования в виде

$$\Delta U = \Delta U_0 + K \cdot j. \quad (1)$$

Величина падения напряжения ΔU_0 в выражении (1), соответствующая нулевой плотности тока, обусловлена наличием реактивности скользящего контакта, при этом емкостный характер контакта наиболее сильно выражен при максимальной площади перекрытия пластины щеткой. Например, при значительном ускорении коммутации ток ламели достигает нулевого значения в момент времени, соответствующий

максимальной площади перекрытия коллекторной пластины щеткой. Таким образом, величина ΔU_0 является переменной, зависящей от степени ускорения коммутации [4]. Поэтому падение напряжения для щеток обеих полярностей можно представить в виде

$$\Delta U_0 = \Delta U_0' \left[1 - \left(\frac{T_\partial}{T_\lambda} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где T_∂ — время, в течение которого ток ламели достигает нулевого значения;

T_λ — расчетное время контактирования ламели со щеткой;

$\Delta U_0'$ — наибольшее значение падения напряжения в контакте при нулевой плотности тока.

Применяя способ равных сумм при обработке экспериментальных данных, получены значения $\Delta U'_{ок} = 1,5$ в для катодно-поляризованной щетки и $\Delta U'_{оА} = 1,1$ в для анодно-поляризованной. Если бы ток ламели достигал нулевого значения в тот момент, когда пластина покидает щетку, ΔU_0 было бы равно нулю, так как в этом случае $\frac{T_\partial}{T_\lambda} = 1$, однако такого соответствия практически не обнаруживается.

Наклон вольтамперной характеристики определяется коэффициентом K , который зависит от свойств щеток и условий формирования скользящего контакта. Показателем условий формирования контакта принята величина скорости изменения плотности тока

$$\frac{j_0 - j_t}{\Delta t} = \frac{dj}{dt}, \quad (3)$$

где j_0 — плотность тока в контакте в момент времени t ;

j_t — плотность тока в контакте в момент времени $t + \Delta t$;

Δt — время, соответствующее расчетному шагу при аналитическом исследовании.

Таким образом, коэффициент K для щеток обеих полярностей определяется:

$$K = \left[C - C_1 \left(\frac{j_0 - j_t}{\Delta t} \right) \right]. \quad (4)$$

При аппроксимации приняты коэффициенты C и C_1 , отражающие свойства щеток, величины которых после соответствующей обработки определены: $C_K = 0,042$, $C_{K1} = 0,013 \cdot 10^{-6}$ для катодно-поляризованной щетки и $C_A = 0,033$, $C_{A1} = 0,01 \cdot 10^{-6}$ для анодно-поляризованной. Тогда динамическая вольтамперная характеристика скользящего контакта соответственно для катодно- и анодно-поляризованной щеток может быть записана следующим образом

$$\begin{aligned} \Delta U_K &= \Delta U'_{ок} \left[1 - \left(\frac{T_\partial}{T_\lambda} \right)_K^4 \right] + \left[C_K - C_{K1} \left(\frac{j_0 - j_t}{\Delta t} \right) \right] \cdot j, \\ \Delta U_A &= \Delta U'_{оА} \left[1 - \left(\frac{T_\partial}{T_\lambda} \right)_A^4 \right] + \left[C_A - C_{A1} \left(\frac{j_0 - j_t}{\Delta t} \right) \right] \cdot j. \end{aligned} \quad (5)$$

Данные выражения характеризуют семейство динамических вольтамперных характеристик при широком изменении условий формирования скользящего контакта и характера коммутации. Это семейство свидетельствует о том, что коммутация секций, рядом лежащих в пазу, протекает неодинаково, даже при идеальных механических условиях работы контакта. Последние в пазу секции имеют замедленную коммутацию, тогда как предыдущие секции паза коммутируют ускоренно. Учитывая это обстоятельство, можно заключить, что условия формиро-

вания контактной проводимости изменяются в широких пределах при коммутации секций одного паза.

На рис. 1 представлены динамические вольтамперные характеристики скользящего контакта для первой и последней секций одного паза (сплошные линии), которые указывают на отличия в условиях формирования скользящего контакта различных ламелей коллектора, обусловленные причинами электромагнитного характера. Здесь же представлены вольтамперные характеристики, рассчитанные согласно аппроксимирующим выражениям (5) (штриховые линии), сравнение которых с экспериментальными подтверждает правильность принятой аппроксимации падения напряжения.

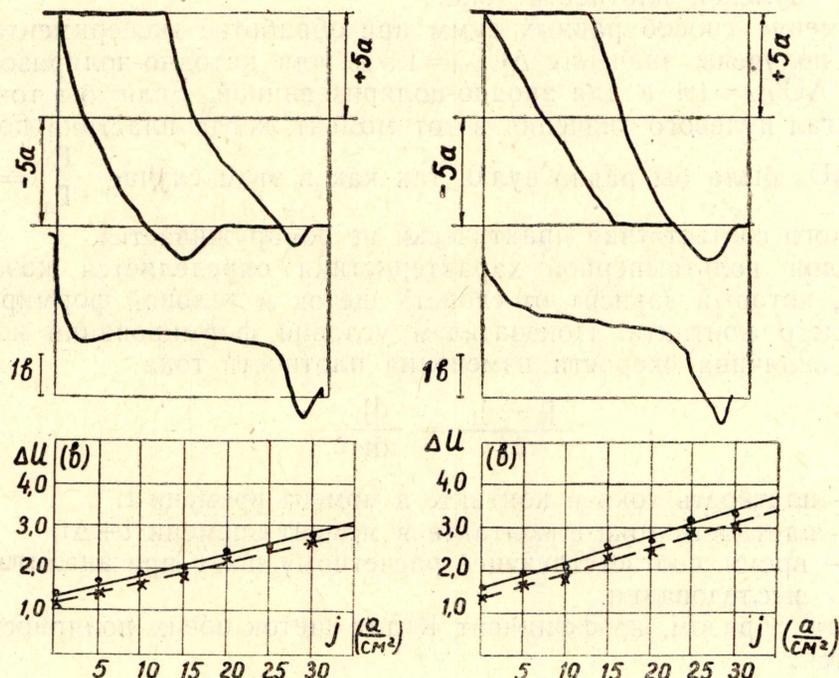


Рис. 1. Динамические вольтамперные характеристики скользящего контакта при коммутации различных секций одного паза катодно-поляризованной щеткой: опытные — сплошные линии, расчетные — штриховые линии

При аналитическом исследовании коммутации обмотка якоря условно разделяется на ряд групп, подобных друг другу в отношении условий коммутации. Такую группу представляют секции, расположенные в одном пазу якоря. Согласно методике составления дифференциальных уравнений, изложенной в [2], и временной диаграмме коммутации ЭМУ (рис. 2), расчетный период или цикл состоит из шести одинаковых участков, причем время каждого участка равно $0,5T_K$, то есть

$$T_{\text{ц}} = 3T_K.$$

В табл. 1 приведены токи секций паза, коммутируемых одновременно щетками катодной и анодной полярностей в течение расчетного периода по участкам,

где i_1, i_2, i_3 — токи секций, коммутируемых щетками катодной полярности,

i_1', i_2', i_3' — токи секций, коммутируемых щетками анодной полярности.

Расчет коммутации проводился для ЭМУ-12А, имеющего следующие данные: $P=1,2$ кВт, $U_H=115$ в, $I_q=3,4$ а, $I_a=10,4$ а, обмотка яко-

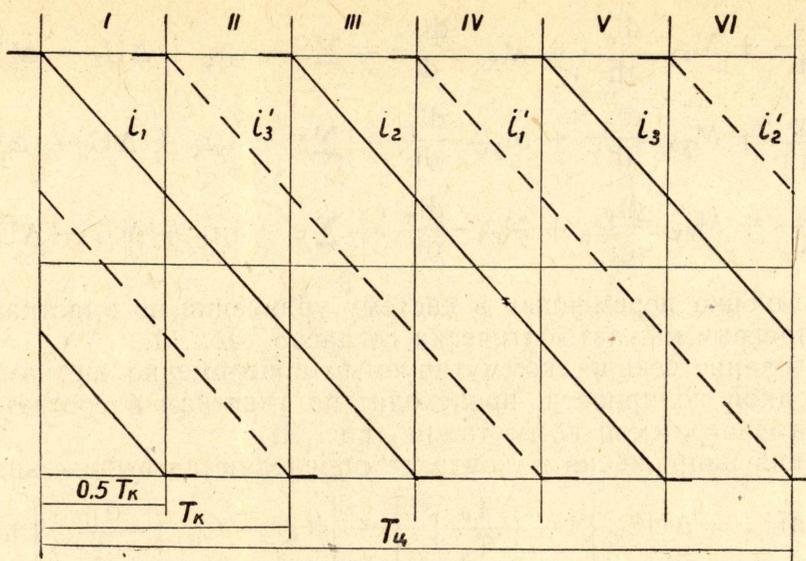


Рис. 2. Временная диаграмма коммутации ЭМУ

Таблица 1

Участки	$0 \div 0,5T_k$	$0,5T_k \div T_k$	$T_k \div 1,5T_k$	$1,5T_k \div 2T_k$	$2T_k \div 2,5T_k$	$2,5T_k \div 3T_k$
i_x	i_1	i_3'	i_2	i_1'	i_3	i_2'
i_y	i_2'	i_1	i_3'	i_2	i_1'	i_3
i_z	i_3	i_2'	i_1	i_3'	i_2	i_1'

ря — простая петлевая, число секций в пазу $p_s=3$, число коллекторных пластин $K=87$, щетки марки ЭГ-8, размером $2 \times 5 \times 15 \times 20$ мм, щеточное перекрытие $\beta=1,5$. Параметры коммутируемых секций следующие:

$$L_q = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ гн,}$$

$$L_d = 27 \cdot 10^{-6} \text{ гн,}$$

$$M_{xyq} = M_{yzq} = 6,9 \cdot 10^{-9} \text{ гн,}$$

$$M_{xyd} = M_{yzd} = 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ гн,}$$

$$M_{xzq} = 15,64 \cdot 10^{-6} \text{ гн,}$$

$$M_{xzd} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ гн,}$$

$$T_k = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ сек,}$$

$$r_c = 0,032 \text{ ома.}$$

Система дифференциальных уравнений контуров секций, коммутируемых щетками обеих полярностей за расчетный период, будет состоять из 18 уравнений. Однако в любой момент времени в течение расчетного периода под щетками обеих полярностей имеется не более 3-х одновременно коммутируемых секций, поэтому, применяя циклический метод расчета по участкам и предполагая одинаковость условий коммутации в отдельных группах обмотки, данная система может быть сведена к системе трех уравнений с тремя неизвестными.

Данная система представляет собой систему неоднородных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, решение которой в общем виде невозможно, поэтому необходимо использовать приближенные методы с применением ЭЦВМ.

$$\begin{aligned}
L \frac{di_x}{dt} + M_{xy} \frac{di_y}{dt} + M_{xz} \frac{di_z}{dt} &= \Sigma e - i_x r_c + \Delta U_2 - \Delta U_1, \\
L \frac{di_y}{dt} + M_{yx} \frac{di_x}{dt} + M_{yz} \frac{di_z}{dt} &= \Sigma e - i_y r_c + \Delta U_3 - \Delta U_4, \quad (6) \\
L \frac{di_z}{dt} + M_{zy} \frac{di_y}{dt} + M_{zx} \frac{di_x}{dt} &= \Sigma e - i_z r_c + \Delta U_1 - \Delta U_5.
\end{aligned}$$

Подстановка переменных в систему уравнений по участкам производится программой автоматически согласно табл. 1.

Чередование секций, коммутируемых попеременно щетками катодной и анодной полярности, происходит по участкам в соответствии с временной диаграммой коммутации (рис. 2).

Падения напряжения в контакте определяются выражением вида:

$$\Delta U_{ki} = \Delta U'_{ок} \left[1 - \left(\frac{T_{\partial}}{T_{л}} \right)_k^4 \right] + \left[C_k - C_{ki} \left(\frac{dj_i}{dt} \right) \right] j_i.$$

Выражения падений напряжения для анодно-поляризованной щетки составляются аналогично с использованием постоянных $\Delta U'_{оА}$; C_A ; $C_{А1}$.

Плотности тока определяются по току через контакт и площади перекрытия ламели щеткой в заданный момент времени.

$$\begin{aligned}
j_1 &= \frac{i_x - i_z}{S_{щ}/\beta}; \quad j_2 = \frac{i_n - i_x}{\frac{S_{щ}}{\beta} \cdot \frac{t}{T_k}}; \quad j_3 = \frac{i_y - i_k}{\frac{S_{щ}}{\beta} \cdot \left(1 - \frac{t}{T_k} \right)}; \\
j_4 &= \frac{i_n - i_y}{\frac{S_{щ}}{\beta} \left(0,5 + \frac{t}{T_k} \right)}; \quad j_5 = \frac{i_z - i_k}{\frac{S_{щ}}{\beta} \left(0,5 - \frac{t}{T_k} \right)};
\end{aligned}$$

Исходные значения i_x , i_y , i_z , для первого участка задаются из условия прямолинейной коммутации. Решение проводится по участкам с отсчетом времени от $t=0$ на каждом участке. Для каждого последующего участка начальными условиями служат конечные условия предыдущего участка. Решение производится методом последовательных итераций до уточнения входных данных, заданных приближенно. Для решения использовалась ЭЦВМ М-20.

Для первой итерации отношение $\frac{T_{\partial}}{T_{л}}$ принимается равным единице. Для последующих итераций величина T_{∂} определяется из расчета в соответствии с табл. 2 для каждой из шести ламелей.

В результате расчета определялись токи коммутирующих секций и падения напряжения между щеткой и ламелью коллектора на каждом участке.

Согласно табл. 2 по результатам расчета строятся кривые падения напряжения между различными ламелями коллектора и щетками обеих полярностей.

На рис. 3 приведены расчетные (штриховые линии) и опытные кривые тока трех коммутируемых секций продольной цепи ЭМУ, расположенных в одном пазу при коммутировании их катодно-поляризованной щеткой.

Сравнивая расчетные и опытные кривые, необходимо отметить достаточную сходимость кривых для всех секций паза. Как опытные, так и расчетные кривые обнаруживают существенную неидентичность коммутационных циклов, обусловленную причинами электромагнитного

Таблица 2

Участки № ламели	I	II	III	IV	V	VI	Примечание
ЛЗ _к	ΔU_5						$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{к3}$
Л1 _к	ΔU_1	ΔU_3	ΔU_5				$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{к1}$
Л2 _к	ΔU_2	ΔU_4	ΔU_1	ΔU_3	ΔU_5		$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{к2}$
ЛЗ _к			ΔU_2	ΔU_4	ΔU_1	ΔU_3	$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{к3}$
Л1 _к					ΔU_2	ΔU_4	$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{к1}$
Л2 _а	ΔU_3	ΔU_5					$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{а2}$
ЛЗ _а	ΔU_4	ΔU_1	ΔU_3	ΔU_5			$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{а3}$
Л1 _а		ΔU_2	ΔU_4	ΔU_1	ΔU_3	ΔU_5	$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{а1}$
Л2 _а				ΔU_2	ΔU_4	ΔU_1	$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{а2}$
ЛЗ _а						ΔU_2	$\left(\frac{T_d}{T_l}\right)_{а3}$

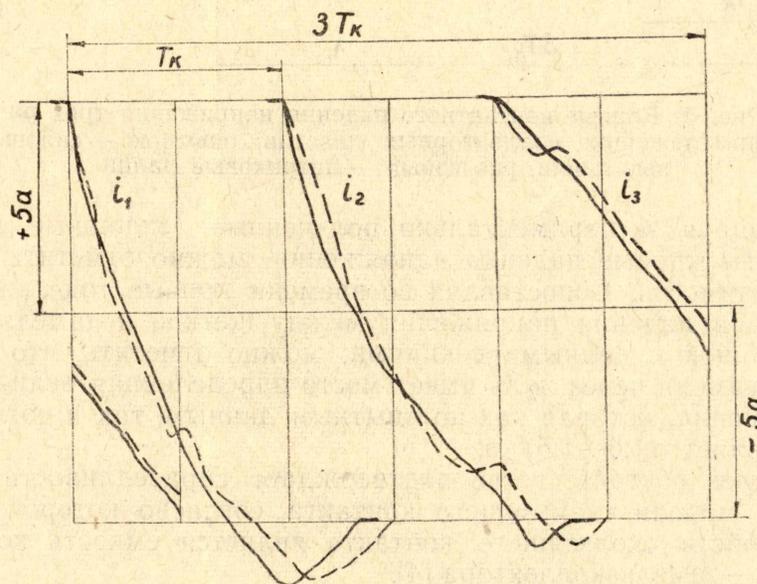


Рис. 3. Кривые тока коммутации трех секций паза: опытные — сплошные линии, расчетные — штриховые линии

характера, поэтому достаточная сходимость результатов может служить доказательством правильного учета условий формирования контактной проводимости и свойств контактной пары щетка—ламель коллектора.

Средняя квадратичная ошибка равна

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum x^2}{n}} = \pm 0,51 \text{ а,}$$

что составляет $\gamma \% = \pm \frac{m}{I_H} 100 = 10,2\%$.

Данная точность вполне достаточна для инженерных расчетов.

На рис. 4 представлены кривые падения напряжения между катодно-поляризованной щеткой и тремя коллекторными пластинами, присоединенными к секциям одного паза. Иными словами, каждая из представленных кривых падения напряжения непосредственно связана с током соответствующей ламели, что и определяет форму и очертание кривых падений напряжения.

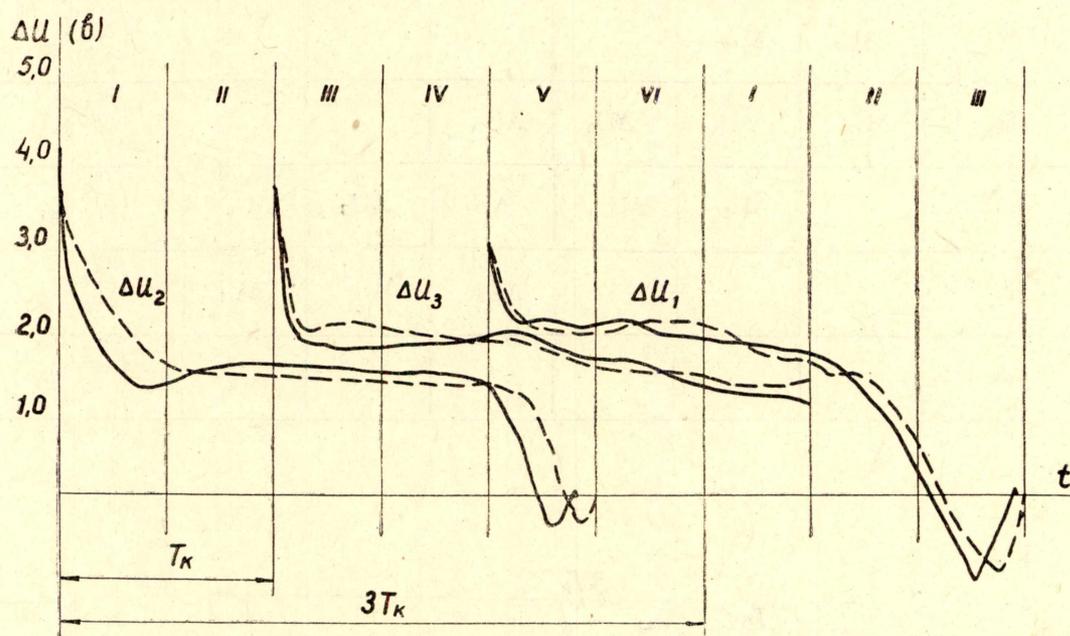


Рис. 4. Кривые контактного падения напряжения трех рядом лежащих коллекторных пластин: опытные — сплошные линии, расчетные — штриховые линии

Анализируя экспериментально полученные (сплошные линии) и рассчитанные кривые падения напряжения, можно отметить их достаточную сходимость. Сопоставляя во времени кривые тока коммутируемых секций и падения напряжения между щеткой и ламелью коллектора, связанной с данными секциями, можно отметить, что при переходе тока ламели через нуль имеет место определенная величина падения напряжения, которая как по опытным данным, так и согласно расчету составляет (1,0—1,5) в.

Последнее обстоятельство подтверждает справедливость принятой физической модели скользящего контакта, согласно которой одним из важных свойств скользящего контакта является емкость контактного слоя щетка—ламель коллектора [4].

Аналогичные результаты получены при коммутации секций анодно-поляризованной щеткой. Кривые токов секций в этом случае имеют

несколько большее ускорение, так как контактное падение напряжения для анодно-поляризованной щетки несколько ниже, чем для катодно-поляризованной.

Расчеты, проведенные по указанной методике для поперечной цепи усилителя ЭМУ-12А, обнаруживают достаточную сходимость с опытными кривыми токов секций и падений напряжения для щеток обеих полярностей.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная аппроксимация контактного падения напряжения позволяет учитывать свойства контактной пары щетка-ламель коллектора и условия формирования скользящего контакта.

2. Достаточная сходимость расчетных кривых токов и падений напряжения с экспериментально полученными как по продольной, так и по поперечной осям ЭМУ-12А подтверждает справедливость принятой физической модели скользящего контакта, учитывающей емкость контактного слоя щетка-ламель коллектора.

3. Указанный метод расчета коммутации по отдельным участкам при определенном чередовании неизвестных позволяет вдвое уменьшить количество дифференциальных уравнений контуров секций, подлежащих совместному решению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Синельников, А. Г. Назикян, В. В. Клейменов, Ф. И. Чернявский. Применение счетных машин непрерывного действия для исследования коммутации машин постоянного тока. ИВУЗ, Электромеханика, № 10, 1960.

2. А. И. Скороспешкин, Б. И. Костылев, Г. Г. Константинов. Аналитическое исследование коммутации коллекторных электрических машин с применением ЭЦВМ. Известия ТПИ, т. 160, 1966.

3. Ю. П. Галишников, А. И. Скороспешкин. Естественные вольт-амперные характеристики скользящего контакта угольная S щетка—коллектор. Известия ТПИ, т. 172, 1967.

4. А. И. Скороспешкин, Б. И. Костылев, Р. Ф. Бекишев. Электрические свойства скользящего контакта. Известия ТПИ, т. 190, 1968.