

## ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Л. Я. ЗИННЕР, А. И. СКОРОСПЕШКИН, А. И. ПРОШИН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Из практики настройки машин постоянного тока известно, что условия коммутации зависят от состояния рабочей поверхности коллектора [1, 2].

До последнего времени нет сколько-нибудь конкретных данных о степени влияния механических факторов на коммутацию. Это объясняется отсутствием достаточно точных приборов, позволяющих измерять весьма малые нарушения поверхности коллектора при работе на повышенных скоростях вращения.

В настоящей работе приводятся сведения, касающиеся разработанного нами полупроводникового профилометра [2, 3] и результаты исследований, проведенных на машинах серии «П».

Принципиальная схема профилометра приведена на рис. 1.

Основным элементом профилометра является измерительная ячейка, представляющая собой высокочастотный трансформаторный мост ТР1 с тесной индуктивной связью между двумя плечами отношения. Емкостный датчик, представляющий собой точечный щуп, включен между уравнивающей емкостью и индуктивным плечом. Измерительная ячейка питается высокочастотным напряжением 3 в, частотой 1 мгц от генератора, собранного на транзисторах  $T_1, T_2$  (П403) и включенного в диагональ моста. При изменении расстояния от поверхности коллектора до емкостного щупа происходит нарушение балансировки моста и в измерительной обмотке наводится э. д. с., пропорциональная изменению зазора.

Э. д. с. разбаланса через эмиттерный повторитель  $T_3$  (П403) поступает на вход измерительной схемы, состоящей из резонансного усилительного каскада  $T_4$  (П403), амплитудного детектора, фильтра несущей частоты и трехкаскадного видеоусилителя  $T_5, T_6, T_7$  (П403). Таким образом, несущая частота генератора, модулированная по амплитуде ламелями коллектора, испытывает в дальнейшем усиление на резонансном усилителе, детектируется, и на выходе видеоусилителя с помощью катодного осциллографа наблюдается характерная картина, отражающая состояние поверхности коллектора.

Для проверки режимов работы отдельных функциональных элементов схемы и контроля общего боя коллектора в статике в схему введен милливольтметр  $T_8-T_{11}$  (П403), М24, предназначенный для измерения синусоидальных напряжений в диапазоне 0,5—1,5 мгц и имеющий четыре предела измерения 0—10 мв, 0—100 мв, 0—300 мв, 0—3 в. Входное сопротивление милливольтметра не менее 100 ком, точность измерения на всех пределах не хуже 3%.

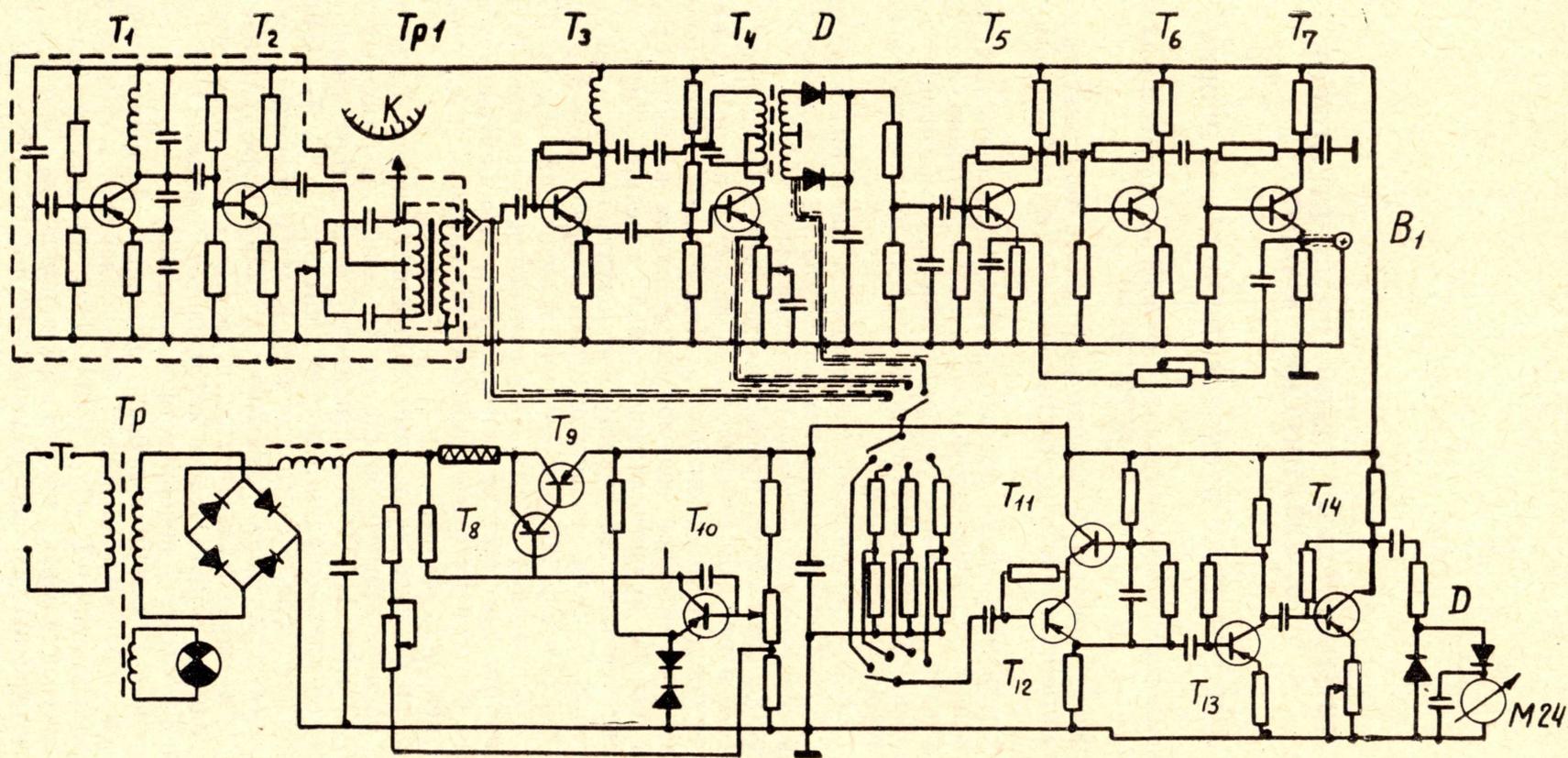


Рис. 1. Принципиальная схема профилометра.

Питание профилометра осуществляется напряжением — 15 в от полупроводникового стабилизатора  $T_{12}-T_{13}$  (П4Д, П13).

Профилометр выполнен в виде двух отдельных блоков. На рис. 2 изображен внешний вид прибора. Выносной блок, содержащий генератор высокой частоты, измерительный мост и емкостный щуп смонтированы на массивной текстолитовой плите.

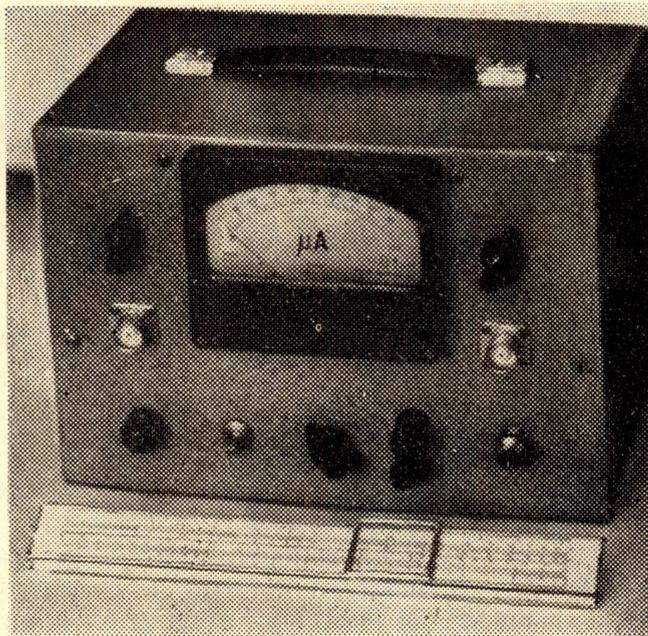


Рис. 2. Внешний вид профилометра.

При необходимости измерить профиль коллектора выносной блок крепится на окне машины, затем с помощью микрометра устанавливается нужный зазор и производится балансировка измерительного моста.

С целью уменьшения схемной погрешности все каскады охвачены обратными связями, что значительно уменьшает температурный дрейф.

В ходе испытания прибора в заводских условиях было установлено, что профилометр имеет:

1) высокую чувствительность к малым изменениям поверхности коллектора, что позволяет измерять выступание отдельных пластин или группы пластин до  $1 \text{ мк}$ ;

2) высокую разрешающую способность в отношении ширины ламели, что исключает погрешность при контроле коллекторов различного исполнения.

Таким образом, разработанный профилометр позволяет с достаточной точностью контролировать изменения формы поверхности коллекторов на любых скоростях вращения и может найти применение как при изучении влияния механических факторов на коммутацию, так и непосредственно в заводской практике при конструировании новых типов коллекторов.

В ходе экспериментального апробирования профилометра на ряде машин серии П авторами исследовалось поведение коллекторов в динамике. На основании полученных экспериментальных данных удалось установить характер и частотный диапазон возмущений, передаваемых щетке коллектором при динамическом взаимодействии.

В общем случае динамическое состояние поверхности коллектора определяется следующими взаимосвязанными факторами:

а) зазором в подшипниках и диаметральной разбросом размеров шариков;

- б) упругой деформацией вала;
- в) силой одностороннего магнитного притяжения;
- г) овальностью поверхности коллектора и начальным его эксцентриситетом;
- д) упругой деформацией коллектора на высоких скоростях вращения.

Рассмотрим влияние вышеперечисленных составляющих на поведение коллектора в динамике.

Зазор в подшипниках может оказать существенное влияние на увеличение общего боя коллектора в динамике при использовании подшипников скольжения, что имеет место в машинах большой мощности [4], где с увеличением скорости вращения якоря происходит выбор радиального зазора. В этом случае характер изменения эксцентриситета с увеличением скорости вращения описывается выражением:

$$\gamma = \sqrt{R^2 - \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \sin^2 \varphi} - R + \delta \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус наружной обоймы подшипника;

$\delta$  — радиальный зазор подшипника;

$\varphi$  — угол, определенный направлением равнодействующей веса якоря и центробежной силы небаланса.

Максимальное значение эксцентриситета  $e_{\max} = \delta$ , однако на практике  $e \ll \delta$ , так как зазор за счет гидростатического подпора масла в подшипнике всегда выбирается до вполне определенной величины и при дальнейшем увеличении скорости увеличение эксцентриситета не происходит. В случае хорошо сбалансированной машины изменение боя за счет выбора радиального зазора вообще не должно происходить.

Для машин малой мощности, использующих подшипники качения, изменение боя коллектора за счет выбора радиального зазора происходит в еще более узких пределах с частотой, равной частоте вращения вала, и амплитудой 5—10  $\mu\text{к}$ .

Исследования, проведенные на машинах 3—5-го габаритов, показали, что на развертку профиля коллектора налагаются синусоидальные колебания, имеющие квазислучайный характер как в отношении частоты, так и в отношении амплитуды. Частота этих колебаний определяется частотой вращения якоря и скоростью перемещения шариков в обойме подшипника. В интервале скоростей до 2000 об/мин. частота их для исследованных машин примерно на порядок выше скорости вращения вала, а максимальная амплитуда колебаний 1—2  $\mu\text{к}$  (рис. 3, а). С увеличением скорости вращения они затухают (рис. 3, б), что объясняется гасящим действием слоя смазки.

Упругая деформация вала, имеющая место практически в любой машине и вызванная весом якоря, несбалансированной массой якоря и силой одностороннего магнитного притяжения, может привести к значительному увеличению общего боя коллектора на высоких скоростях вращения. Последнее тем очевиднее, чем хуже сбалансирована машина. Однако даже и в случае идеальной балансировки наблюдается увеличение динамического боя коллектора за счет упругой деформации вала под действием веса якоря и силы одностороннего магнитного притяжения.

При наличии начального эксцентриситета за счет неуравновешенности якоря, начального прогиба вала от силы тяжести и силы одностороннего магнитного притяжения движение центра тяжести вала с сосредоточенной массой описывается следующими уравнениями [5]:

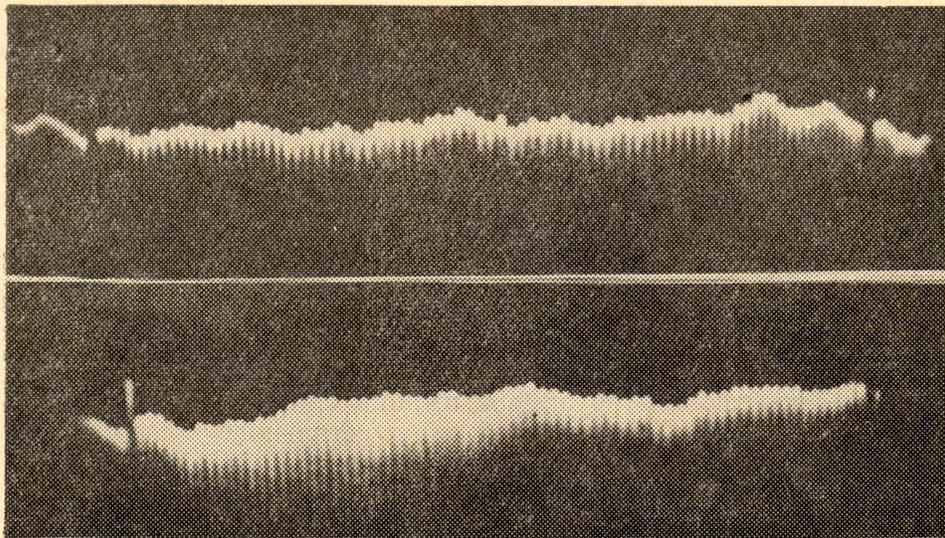


Рис. 3. Профилограммы коллектора машины П-51.

- а) 1500 об/мин.,  
б) 3000 об/мин.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + kx = ke \cos \varphi, \quad (2)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + \mu \frac{dy}{dt} + ky = ke \sin \varphi - (mg + P_\delta), \quad (3)$$

где

- $m$  — сосредоточенная масса якоря,  
 $k$  — коэффициент жесткости вала,  
 $x, y$  — координаты центра тяжести массы,  
 $\varphi$  — угол поворота вала,  
 $e$  — эксцентриситет массы,  
 $\mu$  — сила трения, пропорциональная скорости вращения вала,  
 $P_\delta$  — сила одностороннего магнитного притяжения.

Как нетрудно убедиться, сила  $(mg + P_\delta)$  создает прогиб, равный

$$y = \frac{mg + P_\delta}{k},$$

и координатой уравнений (2) и (3) будет

$$y_1 = y + \frac{mg + P_\delta}{k}.$$

Перенеся начало координат по оси  $y$  на величину  $\frac{mg + P_\delta}{k}$ , имеем

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + kx = ke \cos \varphi, \quad (4)$$

$$m \frac{d^2y_1}{dt^2} + \mu \frac{dy_1}{dt} + ky_1 = ke \sin \varphi. \quad (5)$$

Решение этих уравнений дает зависимости, описывающие движение коллектора в двух взаимноперпендикулярных плоскостях

$$x_k = \frac{b[ek \sin(\omega t - \alpha) - \frac{P_\delta}{k} \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \mu^2\omega^2} \sin \psi]}{a \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \mu^2\omega^2}}, \quad (6)$$

$$y_k = \frac{b [ek \cos(\omega t - \alpha) - \frac{1}{k}(mq + P_\delta) \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \mu^2 \omega^2} \cos \psi]}{a \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \mu^2 \omega^2}}, \quad (7)$$

где  $b$  — расстояние от измеряемой дорожки коллектора до левой опоры,

$a$  — расстояние от центра массы до левой опоры,

$\psi$  — угол, определяющий направление действия силы  $P_\delta$ ,

$$\alpha = \arctg \frac{\mu \omega}{k - m\omega^2} \quad (8)$$

Как видно из (6, 7), движение коллектора происходит по сложному закону, не поддающемуся аппроксимации синусоидой, как это принято в работах [6, 7]. Допущение о синусоидальности вынуждающей силы, приложенной к щетке со стороны коллектора, справедливо в том случае, когда якорь полностью сбалансирован, что практически не достигается ни в одной машине (рис. 4, 5).

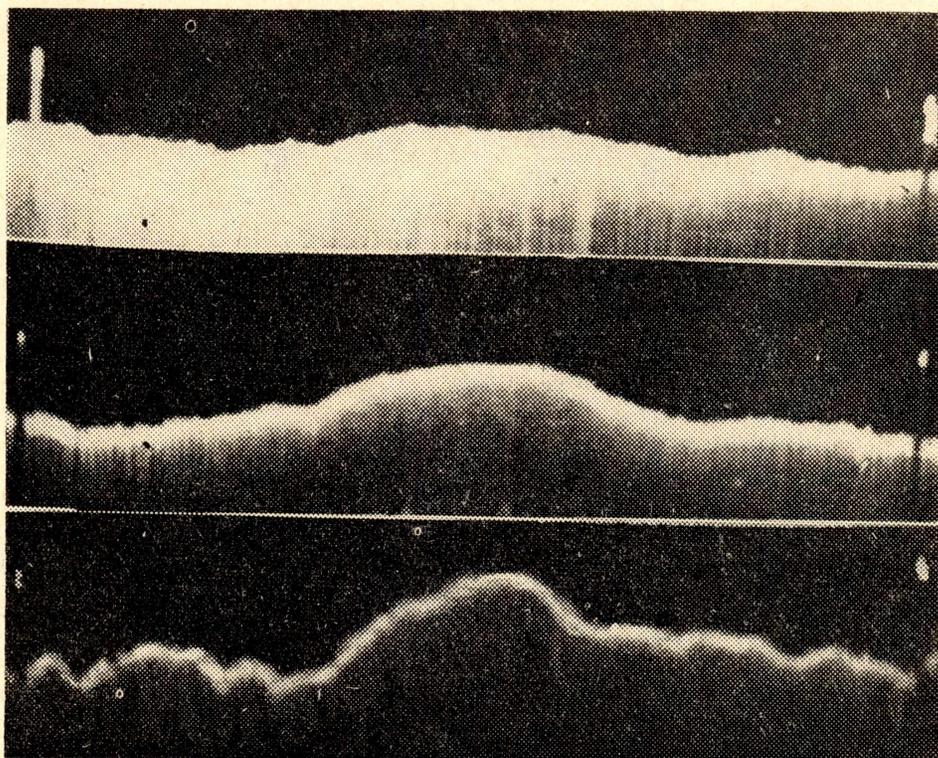


Рис. 4. Профилограммы коллектора машины П-42.

- а) 2000 об/мин,
- б) 3000 об/мин,
- в) 4000 об/мин.

Овальность и эксцентриситет коллектора, обусловленные нецилиндричностью поверхности и несоосностью коллектора, какого-либо существенного влияния на процесс токобъема не оказывают в силу их низкочастотного характера. Как нетрудно показать, в случае, когда овальность и эксцентриситет смещены по окружности коллектора на полпериода, частота возмущающей силы, действующей на щетки, равна двойной частоте вращения якоря, и щетка при нажатии  $250 \text{ г/см}^2$  успевает отработать изменения поверхности коллектора.

Последнее справедливо для машин, у которых общий бой коллектора не превышает  $25\text{--}30 \text{ мк}$ , и для машин, работающих при скоро-

стях, не превышающих 3—4 тыс. об/мин. Большие значения боя и скорости при всех прочих равных условиях приводят к резкому ухудшению коммутации.

Обобщая вышеизложенное, следует отметить, что при работе машины может иметь место случай, когда все составляющие действуют в одном направлении и общий бой, оставаясь низкочастотным, резко увеличивается по амплитуде, достигая величин 50—60  $\mu\text{к}$ , что влечет за собой ухудшение коммутации.

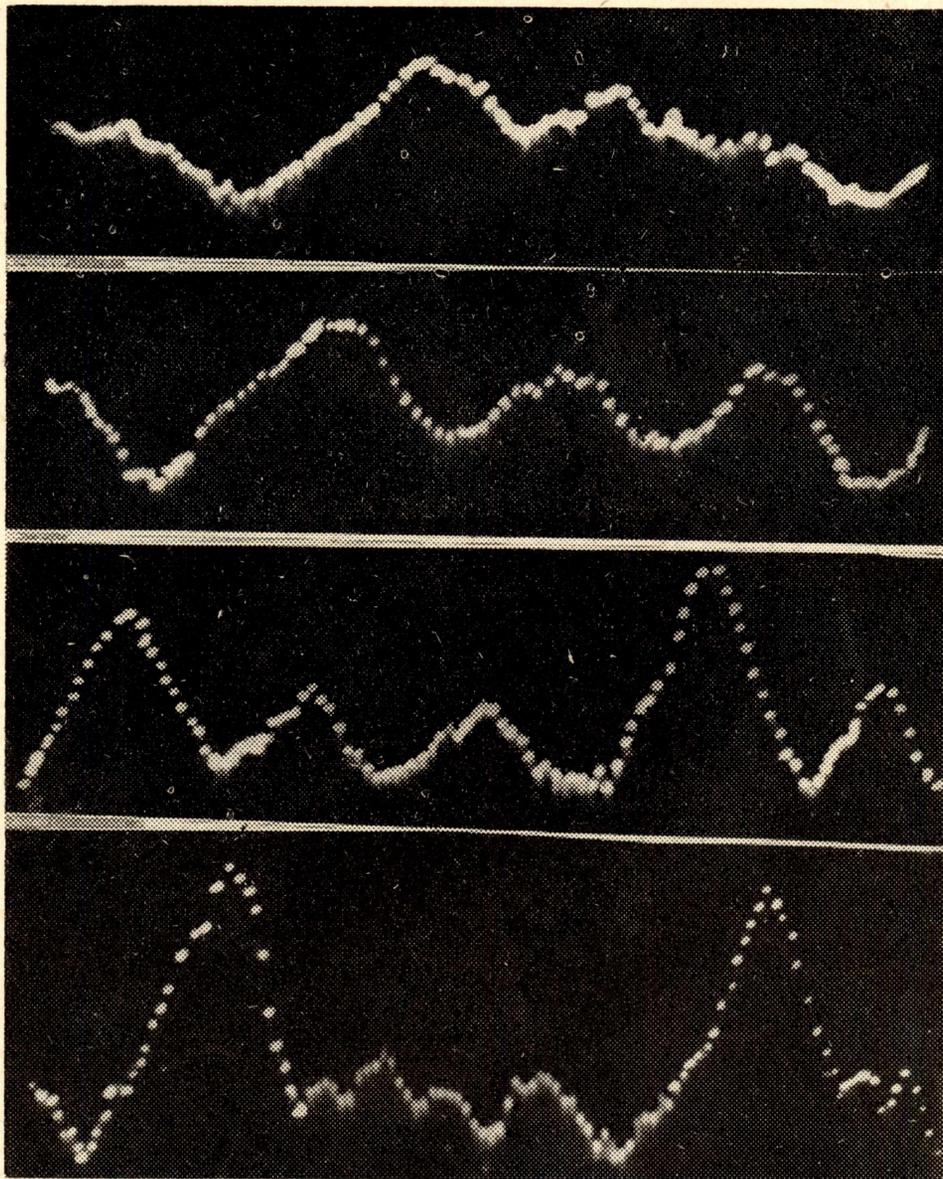


Рис. 5. Профилограммы коллектора машины ПБС-32.

- а) 2000 об/мин,
- б) 3000 об/мин,
- в) 4000 об/мин,
- г) 5000 об/мин.

В общем случае возмущения, передаваемые щеткам коллектором, имеют частоту в два-три раза выше частоты вращения вала, что нередко приводит к ухудшению коммутации особенно в тех случаях, когда амплитуды возмущений и скорость вращения высоки. Однако, как показывают исследования, проведенные на реальных машинах, при

хорошо сбалансированном якоре изменение общего боя коллектора происходит в сравнительно узких пределах и влияние его на коммутацию незначительно, за исключением тех предельных случаев, о которых говорилось выше.

Наибольшее влияние на процесс коммутации оказывают, на наш взгляд, упругая и неупругая деформации коллектора, которые, как известно, могут быть двоякого рода: упругий прогиб и растяжение коллектора, что проявляется в небольшом увеличении диаметра при увеличении скорости вращения; упругие нарушения из-за неоднородности усилий, удерживающих пластины, что может вызвать образование на поверхности коллектора постоянных ступенек. Последний вид нарушений наиболее вреден, так как во всех случаях нарушается непрерывность контакта щетка — коллектор.

С целью выявления степени влияния различных составляющих на поведение коллекторов в динамике нами был исследован ряд машин. На рис. 4 (а, б, в) приведены профилограммы коллектора машины П-42, снятые при скоростях 2, 3, 4 тыс. об/мин.

Для удобства обработки профилограмм и синхронизации осциллографа на одну из ламелей наклеивалась фольга толщиной 10 мк. Две крайние метки на осциллограммах рис. 4 соответствуют сигналу от фольги и являются масштабом смещений поверхности коллектора относительно обкладок датчика.

Как видно из рис. 4, а, поверхность коллектора при скоростях вращения до 2000 об/мин. не подвержена каким-либо изменениям, общий бой составляет 5 мк и характеризует собой начальный эксцентриситет коллектора. В этой стадии машина отличается удовлетворительной коммутацией с едва заметным искрением под щетками.

С увеличением скорости вращения рабочая поверхность коллектора резко нарушается (рис. 4, б, в) как в сторону увеличения общего боя, так и в сторону увеличения микрорельефа, что сопровождается ухудшением коммутации. На скорости 4000 об/мин. общий бой коллектора составляет 10 мк, а перепад между отдельными участками коллектора 2—3 мк.

Еще более наглядны в этом отношении осциллограммы поверхности коллектора машины ПБС-32 (рис. 5, а, б, в, г), снятые соответственно на 2, 3, 4, 5 тыс. об/мин. Статический бой коллектора составлял 20 мк, и измерения, проведенные с помощью миниметра и профилометра, дали хорошее совпадение результатов.

При плавном изменении скорости вращения якоря от 2 до 5 тыс. об/мин поверхность коллектора, как это видно из рис. 5, претерпевает заметные изменения, что одновременно сопровождается интенсивным увеличением искрения машины. Интересен тот факт, что изменение поверхности коллектора с увеличением скорости подчинено определенной закономерности, заключающейся в том, что с приращением скорости на каждые 1000 об/мин. происходит увеличение амплитудного значения боя на вполне определенную величину.

Последнее говорит о том, что коллектор на высоких скоростях вращения претерпевает значительную деформацию.

Для коллектора рис. 5 характер увеличения боя описывается числовым рядом

$$A_0 = B + 2B + 3B + \dots + nB, \quad (9)$$

где

$A_0$  — начальное значение боя,

$B$  — постоянная величина, характеризующая изменение боя между двумя соседними значениями скорости,

1, 2, 3 ...  $n$  — последовательные значения скорости.

При некотором значении  $n_{кр}$  происходит разрушение коллектора.

Из анализа полученных профилограмм становится очевидным, что нарушение коммутации в данном случае обусловлено исключительно упругой деформацией коллектора, которая приводит к образованию на его поверхности ступенек с амплитудой до 36—40 мк и длительностью переднего и заднего фронтов  $\tau_{п}=0,0012$  сек.,  $\tau_{з}=0,0009$  сек., которых щетка отработать не в состоянии.

Действительно, для того чтобы щетка, поднятая на высоту ступеньки, возвратилась на исходный уровень, потребуется время, равное 0,003 сек. За это время коллектор, вращающийся со скоростью 4000 об/мин., успевает повернуться на  $1/4$  оборота, и, следовательно, щетка в течение  $1/4$  оборота парит над поверхностью коллектора.

Исходя из вышеизложенного, взаимодействие щетки с коллектором при наличии деформации имеет характер кратковременного динамического удара, в результате которого щетка получает ускорение в радиальном направлении. Величина ускорения и радиального отскока могут быть определены, если известна форма ступеньки, ее высота и время взаимодействия из следующих выражений:

а) для случая, когда ступенька имеет форму полуволны синусоиды

$$a = \frac{2,46\lambda\omega^2 R^2}{l^2}, \quad (10)$$

$$h = \frac{2,46\lambda\omega^2 R^2 - a_1 l^2}{l^2} t^2; \quad (11)$$

б) для случая, когда ступенька имеет пилообразную форму

$$a = \frac{7,85\lambda\omega^2 R^2}{l^2}, \quad (12)$$

$$h = \frac{7,85\lambda\omega^2 R^2 - a_1 l^2}{l^2} t^2; \quad (13)$$

в) для случая, когда передний фронт ступеньки изменяется по экспоненциальному закону

$$a = \frac{19,7\lambda\omega^2 R^2}{l^2}, \quad (14)$$

$$h = \frac{19,7\lambda\omega^2 R^2 - a_1 l^2}{l^2} t_2, \quad (15)$$

где

$a$  — ускорение, сообщаемое щетке ступенькой на поверхности коллектора;

$h$  — высота отскока щетки;

$\lambda$  — максимальная высота ступеньки;

$\omega$  — скорость вращения коллектора;

$l$  — длина переднего фронта выступа;

$t$  — время взаимодействия щетки со ступенькой;

$a_1$  — ускорение щетки пружиной.

В общем случае характер динамического взаимодействия щетки с выступающей пластиной или группой пластин может быть описан уравнением [8]:

$$h(t) = N \sin \frac{\pi}{T} t \exp \left[ \frac{\pi}{T \operatorname{tg} \frac{\pi}{k_1}} \left( \frac{T}{k_1} - t \right) \right], \quad (16)$$

$$\text{где } N = \frac{h_{\max}}{\sin \frac{\pi}{k_1}},$$

$T$  — длительность воздействия,

$$k_1 = k_0 + 1,$$

$$k_0 = \frac{\tau_{\text{сп}}}{\tau_{\text{н}}},$$

$\tau_{\text{н}}$  — время нарастания функции от нуля до максимума,

$\tau_{\text{сп}}$  — время спада от максимума до нуля,

$t$  — текущая координата времени.

Поведение щеточного узла при динамическом воздействии со стороны коллектора наиболее просто может быть установлено моделированием процесса. Варьируя значениями  $h_{\max}$  и  $k$ , можно таким образом установить величину отскока, амплитуду и частоту колебаний щетки при соударении.

$$h = \psi [h_{\max}, k, V), \quad (17)$$

где  $V$  — линейная скорость выступа.

Имитация удара (15) может быть осуществлена с помощью генератора прямоугольных импульсов или LRC — генератором, дающим на нагрузку экспоненциальный сигнал.

Изменением параметров генератора легко удается варьировать условия эксперимента.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанный профилометр, обеспечивая высокую чувствительность и разрешающую способность, позволяет измерять изменения поверхности коллектора от  $1 \mu\text{к}$  и более.

2. Динамический бой коллектора имеет сложный характер, не поддающийся аппроксимации синусоидой, и может достигать величины  $50\text{—}60 \mu\text{к}$ .

3. Наибольшее влияние на процесс токосяема оказывает упругая деформация самого коллектора, имеющая высокочастотный характер с амплитудой до  $45\text{—}50 \mu\text{к}$ .

4. Взаимодействие щетки с коллектором в высокоскоростных машинах имеет характер кратковременного динамического удара.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ф. Карасев. Коммутация коллекторных машин постоянного тока, ГЭИ, 1961.
2. А. И. Скороспешкин, Л. Я. Зиннер, А. И. Прошин. Прибор для исследования механических факторов в коллекторных электрических машинах. Изв. ТПИ, т. 160, 1967.
3. Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. Мостовой прибор для исследования динамики коллекторов электрических машин. Изв. ТПИ, т. 160, 1967.
4. К. К. Намитков, В. Г. Брезинский, Б. Б. Кац. Эксцентриситет коллекторов электрических машин постоянного тока в динамике. Электротехника, № 4, 1965.
5. С. П. Тимошенко. Колебания в инженерном деле. Физматгиз, 1959.
6. Н. А. Павелко. О вибрации щеточного узла. Вестник электропромышленности, № 7, 1962.
7. А. В. Ложкин, Г. С. Жартовский. Вибрация щеточного узла коллекторных электрических машин. Электротехника, № 10, 1966.
8. Б. А. Глаговский, Э. С. Евсиевич, А. А. Хайт, В. А. Яшин. О генерировании функций, описывающих интенсивные кратковременные воздействия. Труды ВНИИ АШ, № 3, 1966.