

УДК 656.259.9

Т.Н. Сердюк

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр*

## МОНИТОРИНГ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

*В статье рассмотрены вопросы диагностики двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением стрелочных приводов с помощью гармонического анализа кривой рабочего тока в процессе эксплуатации. Выполнена экспериментальная и теоретическая оценка спектрального состава рабочего тока двигателя постоянного тока. Разработана математическая модель технического обслуживания стрелочных электроприводов на основе теории Марковских процессов. Применение предложенной методики эксплуатационной диагностики двигателей постоянного тока стрелочных приводов позволит повысить их надежность, а, следовательно, и безопасности движения на железных дорогах.*

**Ключевые слова:** стрелочный привод, диагностика, двигатель постоянного тока, гармоники.

### Введение

На сегодняшний день особое внимание уделяется проблеме безотказности и восстановления оборудования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Автоматизация перевозочного процесса, применение электрической и микропроцессорной централизации (ЭЦ и МПЦ), автоблокировки и других систем железнодорожной автоматики и телемеханики в значительной степени увеличили зависимость работы железных дорог от надежности отдельных ее устройств. В результате резко возросла показатель "цена отказа" – ущерб, вызванный отказами в работе технических средств, особенно на грузонапряженных участках.

Из всех видов отказов в устройствах сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) на стрелочные привода приходится около 28 %. Усовершенствовать эксплуатационно-технические характеристики стрелочных переводов в современных экономических условиях практически не представляется возможным, поскольку запас совершенствования их конструктивных возможностей исчерпан. Так, например, щеточно-коллекторный механизм двигателей постоянного тока типа МСП или ДП имеет определенные недостатки, которые заключаются в стирании (разрушении) щеток, загрязнении коллектора, подгорании и возникновении кругового тока по коллектору.

Более перспективными в настоящее время считаются трехфазные асинхронные двигатели типа МСТ. Но их применение предусматривает использование пятипроводной схемы управления вместо двухпроводной при моторах МСП и ДП. При этом увеличивается жильность кабельной сети станции. Кроме модернизации кабельной сети станции, при замене двигателей типа МСП на МСТ необходимо принимать моторы большей мощности, поскольку у двигателей постоянного тока крутящий момент

пропорционален току в квадрате, а в асинхронных – только квадрату напряжения.

Содержание СП, стрелочной гарнитуры и другого напольного оборудования в рабочем состоянии в условиях эксплуатации требует постоянных значительных затрат. В течение многих десятилетий используется и совершенствуется система плано-предупредительных осмотров и ремонтов устройств СЦБ (включая стрелочное оборудование), то есть система осмотров и ремонтов с нормативной периодичностью и регламентным составом основных видов работ.

В течение многих десятилетий используется и совершенствуется система плано-предупредительных осмотров и ремонтов устройств СЦБ (включая стрелочное оборудование), то есть система осмотров и ремонтов с нормативной периодичностью и регламентным составом основных видов работ. При этом используются единые технологии и организация выполнения технологического обслуживания. Такая система технического содержания напольного оборудования в рабочем состоянии сопровождается значительными трудовыми затратами. В данный момент практически полностью отсутствует автоматизированный контроль и техническая диагностика стрелочных приводов (за исключением уровня изоляции и контроля напряжения и тока фаз двигателя).

Таким образом, тема научных исследований, связанная с разработкой средств эксплуатационного диагностирования состояния стрелочных приводов является актуальной задачей. Это позволит своевременно выявить неисправности на ранней стадии их возникновения, минимизировать затраты на их ликвидацию, а также в дальнейшем осуществить переход от плано-предупредительного ремонта к обслуживанию по состоянию объекта.

**Цель** – повышение надежности элементов систем электрической и микропроцессорной централизации и

безопасности железных дорог за счет применения систем мониторинга и эксплуатационной диагностики двигателей постоянного тока стрелочных приводов, обеспечение выполнения работ по техническому обслуживанию с минимальными затратами.

### Научное обоснование диагностики двигателя путем гармонического анализа кривой рабочего тока

Машины постоянного тока нашли широкое применение как в отечественной и зарубежной промышленности, так и в железнодорожном транспорте, в частности в стрелочных электроприводах. Их главными недостатками по сравнению с другими типами электрических машин является низкая эксплуатационная надежность из-за наличия щеточно-коллекторного механизма.

Состояние и достижения науки и производства на современном этапе позволяют использовать другие принципы и структурные методы построения конструкции напольного оборудования системы электрической и микропроцессорной централизации, применять новые конструктивные решения, материалы, «безлюдные» (или малообслуживаемые) технологии, способствующие значительному повышению надежности, безопасности железнодорожного транспорта.

В нормальном режиме работы электродвигателя постоянного тока в рабочей цепи протекает кроме постоянного тока ряд гармонических составляющих. Переменные составляющие возникают по следующим причинам.

Во-первых, схемы выпрямления представляют собой своего рода генератор напряжения, содержащий гармонические составляющие частотой 100 Гц – при однофазной мостовой схеме выпрямления, 300 Гц – при трехфазной мостовой схеме выпрямления, в которой первая гармоника  $f_1 = 50m$ , где  $m$  – число последовательных кругов из вентилей и обмоток силового трансформатора. Так,  $m = 2$  – для однофазной мостовой схемы и  $m = 6$  – для трехфазной мостовой схемы.

Во-вторых, в токе присутствует гармоника пропорциональная скорости вращения якоря. Она возникает в результате того, что щетка коллектора является шире, чем его ламели. Это сопровождается закорачиванием одной или двух ламелей якоря и возникают гармоники, частота которых обусловлена скоростью якоря. Они являются высокочастотными (более 420 Гц).

Таким образом, в нормальном режиме работы возникают три гармонические составляющие:

$$\sum f_1 = f_{n1\phi} + f_{n3\phi} + f_c, \quad (1)$$

где  $f_{n1\phi}$  – частота гармоники, которая возникает в результате работы однофазной мостовой схемы;

$f_{n3\phi}$  – частота гармоники, возникает в результате работы трехфазной мостовой схемы,  $f_c$  – «скоростная» частота.

При отклонении режима работы электродвигателя от нормального спектр гармоник обогащается за счет, поскольку:

– за счет ухудшения условий коммутации возникает случайная аperiодическая гармоника вследствие эксцентриситета коллектора;

– за счет загрязнения коллектора графитовой пылью появляются токи утечки между ламелями коллектора;

– при обрывах или коротком замыкании в секциях якоря появляется гармоника, зависящая от скорости вращения. Так, для двигателя со скоростью вращения  $n = 1500$  об/мин = 25 об/с. Частота гармонической составляющей, которая в возникает в токе двигателя за один оборот якоря составит  $25 \cdot 2 = 50$  Гц.

Таким образом, в токе электродвигателя могут присутствовать шесть гармонических составляющих. Отсюда следует, что полную информацию о составе гармоник можно получить в результате разложения кривой рабочего тока перевода стрелки в ряд Фурье. Это и стало основой аналитического метода определения характера неисправностей стрелочного электродвигателя постоянного тока типа МСП.

Частоты гармоник, возникающих в результате работы двигателя и ранее названные «скоростными», определяются следующим образом.

$$f_c = N_{\text{л}} \cdot \frac{n}{60}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{л}}$  – число ламелей на коллекторе двигателя постоянного тока,  $n$  – скорость вращения ротора, об/мин, 60 – число, которое позволяет пересчитать минуты в секунды.

Так, при скорости вращения ротора (якоря) двигателя  $n = 1050$  об/мин. и числе ламелей  $N_{\text{л}} = 24$  скоростная частота составляет

$$f_c = 24 \cdot \frac{1050}{60} = 420 \text{ Гц}.$$

Как упоминалось выше, наибольшее число отказов в машинах постоянного тока приходится на щеточно-коллекторный механизм и в зависимости от условий эксплуатации они составляют 40...60 % от общего числа отказов машин [1].

К характерным повреждениям коллектора относятся: изменение его формы из-за неравномерного износа, нарушения качества поверхности коллектора, подгорания и оплавления пластин при неблагоприятной коммутации и кругового огня [2].

Причинами неблагоприятной коммутации и кругового огня на коллекторе является износ щеток, неправильная настройка щеточно-коллекторного узла,

засорение коллектора угольной и металлической пылью при разрушении материала щеток и коллектора.

Появление неисправности или дефекта электрической машины связано с изменением физических параметров отдельных узлов машины и их элементов. Эти параметры могут быть как механическими (изменение геометрической формы элементов) так и электрическими (изменение активного сопротивления проводников, индуктивности, сопротивления изоляции, емкости и др.).

Для оценки влияния изменения этих параметров на ток и напряжение якорной цепи машин постоянного тока было предложено использовать спектральный анализ рабочего тока двигателя стрелочного электропривода.

Так, низкочастотные гармоники в спектре рабочего тока двигателя кратные 50...60 Гц возникают в результате плохой притертости щеток к коллектору двигателя.

При наличии короткого замыкания (к.з.) в двигателе постоянного тока частота отказа  $f_0$  определяется следующим образом:

$$f_0 = \left(\frac{2n}{60}\right) \cdot N_{кз}, \quad (3)$$

где 2 – количество щеток в двигателе;  $N_{кз}$  – количество коротких замыканий в двигателе.

Так, при  $n=1050$  об/мин. и одном к.з.  $f_0 = \left(\frac{1050 \cdot 2}{60}\right) \cdot 1 = 35$  Гц, при двух к.з. –  $f_0 = 70$  Гц.

При двух, трех и более местах повреждения обмотки якоря частота отказа меняет свой закон образования. Образуется ряд спектральных линий с шагом  $f_b$  Гц, которые численно будут равны циклической частоте, и связаны с числом мест повреждений.

$$f_b = f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{bN}, \quad (4)$$

где  $f_{b1}$  – частота гармоники, которая возникает в

результате обрыва в обмотке и условно обозначена № 1,  $f_{b2}$  – частота гармоники, которая возникает в результате обрыва в другом месте обмотки и условно обозначена № 2 и т. д.

В спектре также присутствуют гармоники кратные по частоте числу повреждений обмотки и входящие в общий ряд гармоник отказа

$$f_b = \left(\frac{n}{60}\right) \cdot N_b, \quad (5)$$

где  $N_b$  – число повреждений.

То есть возникают низкочастотные гармоники кратные 17,5; 35; 52,5... Гц, поскольку

$$f_b = \left(\frac{1050}{60}\right) \cdot N_b = 17,5 \cdot N_b \text{ Гц.}$$

В общем случае, гармонический анализ рабочего тока и напряжения представляет собой амплитудные спектры, в которых присутствуют:

а) гармоники, кратные частоте вращения. Здесь основная частота  $f = pn / 60$ , где  $p$  – число пар полюсов машины;

б) гармоники, пульсирующие с зубцовой частотой; основная частота  $f_z = zn / 60$ , где  $z$  – число зубьев якоря;

в) гармоники, которые имеют, так называемую, коллекторную частоту; основная частота  $f_k = kn / 60$ , где  $k$  – количество коллекторных пластин [3].

Пример расчетов для двигателя типа МСП-0,1 со скоростью вращения  $n=1500$  об/мин, числом зубцов –  $z=25$  и количеством коллекторных пластин и секций –  $k=24$ . Число пар полюсов  $p = 1$ .

$$f = pn / 60 = 1 \cdot 1500 / 60 = 25 \text{ Гц};$$

$$f_z = zn / 60 = 25 \cdot 1500 / 60 = 600 \text{ Гц};$$

$$f_k = kn / 60 = 24 \cdot 1500 / 60 = 625 \text{ Гц.}$$

Результаты расчетов частоты гармоник, возникающих по указанным причинам, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Гармонический анализ рабочего тока стрелочных двигателей постоянного тока

Тип двигателя	Напряжение питания, В	Скорость вращения, об/мин	Частота гармоники, Гц		
			скоростная	Коллекторная	Зубцевая
МСП-0,1	30	1300	21,7	520	541,7
	100	1500	25	600	625
	160	1500	25	600	625
МСП-0,15	30	850	14,2	520	541,7
	110	850	14,2	600	625
	160	850	14,2	600	625
МСП-0,25	30	1460	24,3	520	541,7
	110/220	1700/3600	28,3/60	600	625
	160	1700	28,3	600	625

Итак, благодаря проведению эмпирических исследований были найдены наиболее рациональные параметры входной цепи в диапазоне частот от 10 до 4000 Гц, которые характерны для выявления не-

исправностей электродвигателя. У исправного двигателя постоянного тока типа МСП стрелочного электропривода в кривой тока присутствуют гармоники кратные 100 Гц в результате работы однофаз-

ной схемы выпрямления, а также – 300, 600,... Гц, связанные с работой трехфазного мостового выпрямителя, используемого на посту ЭЦ для питания потребителей постоянного тока.

Результаты моделирования распределения амплитуд гармонических составляющих в случае воз-

никновения короткого замыкания двух пластин коллектора дано на рис. 1, что совпадает с [3]. Исправному состоянию двигателя соответствует АЧХ, представленная на рис. 2.

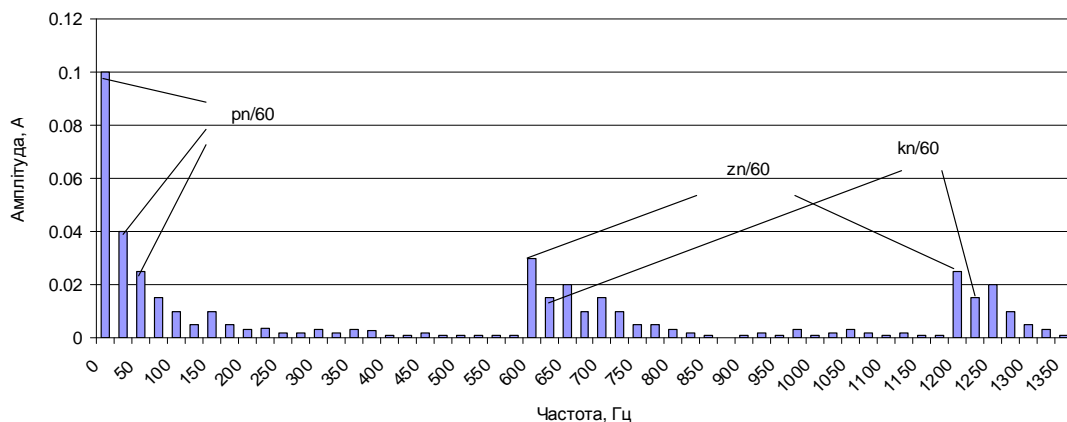


Рис. 1. Моделирование распределения амплитуд гармонических составляющих в случае возникновения короткого замыкания двух пластин коллектора

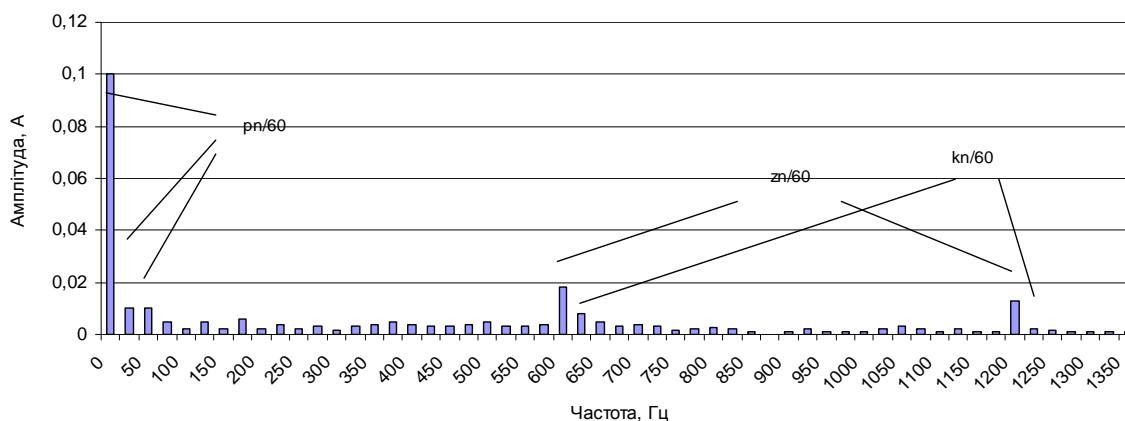


Рис. 2. Моделирование распределения амплитуд гармонических составляющих в случае, если двигатель исправен

### Экспериментальные исследования

Осциллограмма и спектральный состав рабочего тока якоря представлены на рис. 3, 4. Спектральный состав сигнала напряжения машины, снятого с сопротивления шунта включенного в рабочую цепь схему управления стрелочного привода, качественно идентичен спектральному составу рабочего тока якоря машины. Анализ зависимости амплитуд указанных гармоник от значения сопротивления короткого замыкания позволяет предложить использовать эти зависимости как диагностические параметры изменения состояния коллектора. Как показано на рис. 5, характер зависимостей – экспоненциальный:

$$A_{Nn}(r_k) = a \cdot e^{-b \cdot R_{k3}} + c, \quad (6)$$

где  $r_k$  – сопротивление между коллекторными пластинами;  $a, b, c$  – коэффициенты [10].

По результатам экспериментальных испытаний исследованы зависимости амплитуд основных групп гармоник спектров тока и напряжения якоря от сопротивления короткого замыкания (рис. 5, 6).

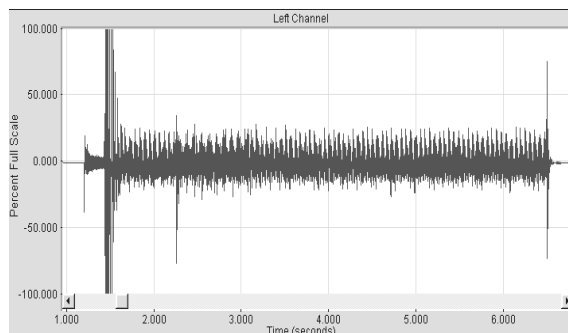


Рис. 3. Осциллограмма переменной составляющей в рабочем токе якоря двигателя МСП-0,15. Вид неисправности – короткое замыкание коллектора

Таким образом, с целью проверки результатов моделирования неисправностей щеточно-коллекторного механизма машины постоянного тока были проведены экспериментальные исследования, результаты которых качественно совпадают с результатами моделирования [4].

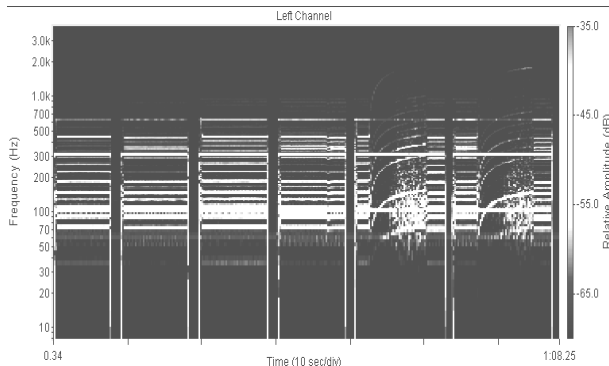


Рис. 4. Спектральный состав рабочего тока якоря с коротким замыканием коллектора

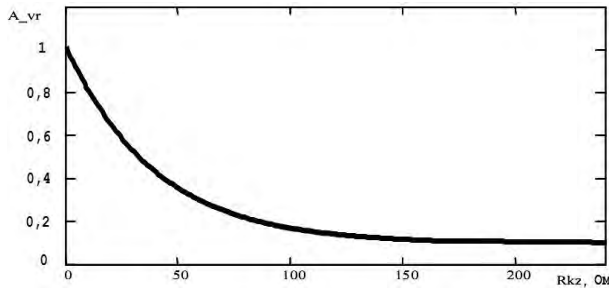


Рис. 5. Зависимость амплитуд скоростных гармоник рабочего тока от сопротивления короткого замыкания

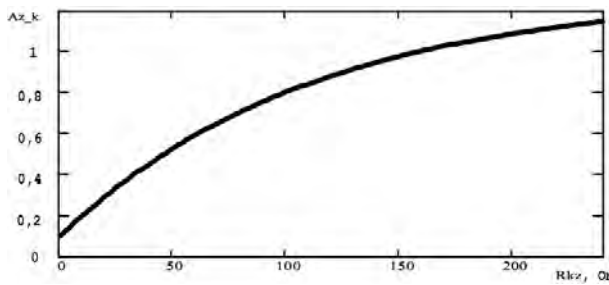


Рис. 6. Зависимость амплитуд зубцевых и коллекторных гармоник рабочего тока от сопротивления короткого замыкания

### Математическая модель технического обслуживания и работы стрелочного электропривода

Единственная периодичность профилактических работ по техническому обслуживанию устройств железнодорожной автоматики (ЖАТ) по всей сети дорог ведет к нерациональному использованию трудовых ресурсов. Шагом к дифференцировке сроков проведения работ по техническому обслужива-

нию устройств ЖАТ станет введение периодичности выполнения работ по техническому обслуживанию устройств и сроков проведения капитальных ремонтов с учетом категории железнодорожных линий по интенсивности движения поездов.

Одним из направлений совершенствования системы технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) устройств ЖАТ в современных условиях является обоснование рациональной периодичности проведения работ по регламентному обслуживанию и ремонту устройств при их технической эксплуатации.

Возможность оптимизации процесса ТО и Р устройств ЖАТ по технико-экономическим критериям показана с использованием аппарата цепей Маркова. Нелинейное преобразование вполне естественно для устройств ЖАТ, так как при их техническом обслуживании измеряются параметры, которые являются дискретными, и, как правило, они равноудалены во времени, что определяется периодичностью обслуживания. Марковские процессы описывают переходный режим некоторой системы на одинаковых интервалах времени.

Используем цепи Маркова для исследования "поведение" или изменения состояний стрелочного электропривода на всем промежутке времени его эксплуатации.

Разработанная Марковская модель процесса технического обслуживания и ремонта стрелочных электроприводов на интервале времени от пуска в эксплуатацию до момента замены для капитального ремонта или списания представлена на рис. 7.

Возможные состояния стрелочного электропривода (рис. 7) наглядно изображены вершинами графа состояний и обозначены буквами.

Н – новое состояние (n) – это работоспособное состояние, когда все контролируемые параметры находятся в пределах, соответствуют моменту пуска в эксплуатацию, в которую попадают устройства поступившие с завода или после капитального ремонта, проведенного в условиях дистанции. Данное состояние – это период приработки, во время которого проявляются скрытые дефекты.

С – стареющее состояние (s), при котором устройства (стрелочные привода) находятся в работоспособном состоянии, и все параметры, характеризующие способность объекта выполнять заданные функции, находятся в области допустимых значений. Данное состояние наступает после окончания периода приработки и включает в себя весь период нормальной эксплуатации.

П – предотказное состояние (работоспособное) (p), когда один или несколько из контролируемых параметров достигают области критических значений.

О – состояние отказа (защитное или опасное) (o), при котором устройства находятся в неработоспособном состоянии.

Р – состояние текущего ремонта (г), в которое попадают при устранении отказов, или при техниче-

ском обслуживании, когда производится замена или восстановление каких-либо узлов или деталей.

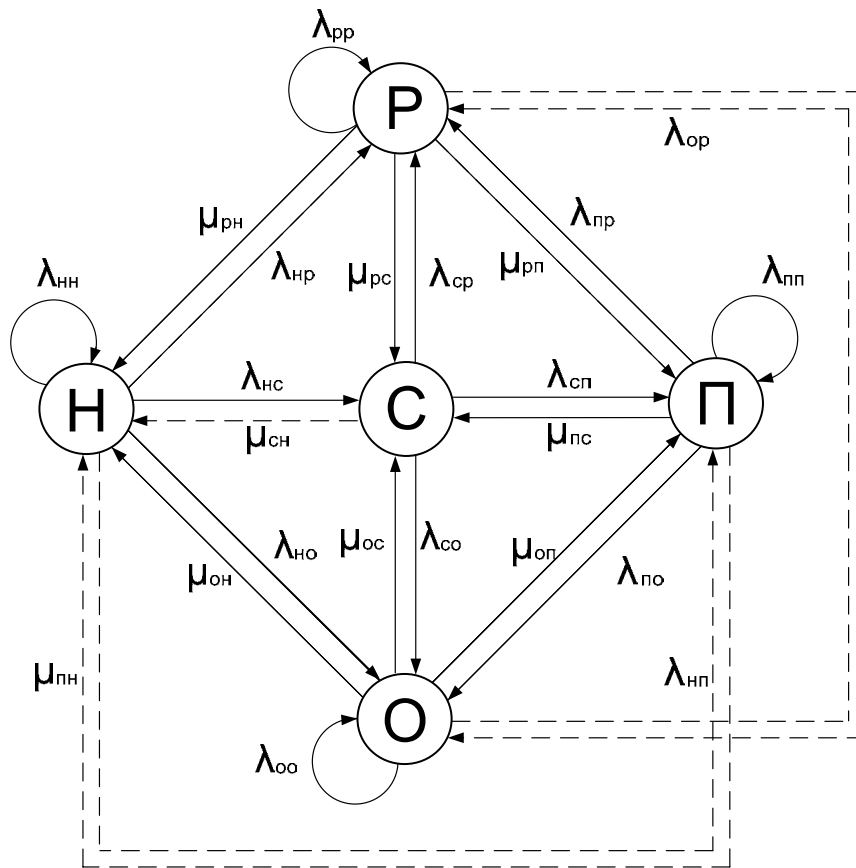


Рис. 7. Модель процесса технического обслуживания и ремонта стрелочных приводов

Переходы между возможными состояниями данной модели, обозначенные  $\lambda$  с индексами, составленными из обозначений начального и конечного состояний, является интенсивностями старения, отказов, предотказного состояния, проведение текущего и капитального ремонтов. Интенсивности отказов содержат в себе интенсивности всех возможных видов отказов как защитных, так и опасных – внезапных, постепенных, приработочных и послепрофилактических.

Обратные переходы между состояниями, обозначены  $\mu$ , является интенсивностями обновлений после отказов, работ при регламентном обслуживании и введение в эксплуатацию после капитального ремонта.

Дуги графа с возвращением в те же состояния соответствуют случаям, когда между очередными проверками контролируемых параметров объект остался в прежнем дискретном состоянии. Эти переходы обозначены  $\lambda_{HH}; \lambda_{OO}; \lambda_{PP}; \lambda_{PP}$ .

В данной модели учтены и маловероятные переходы, обозначенные пунктирными линиями. В дальнейшем для упрощения расчетных формул эти переходы не рассматриваются, то есть значения интенсивностей этих переходов принимаются равными нулю.

Математическая модель рассматриваемого процесса изменения состояний во времени включает в себя вектор-столбец  $P(0)$ , что задает вероятностное распределение состояний в нулевой момент времени, и стохастическую матрицу вероятностей переходов между состояниями  $\|P_{ij}\|$ .

Система дифференциальных уравнений данной модели имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_n}{dt} = P_n \cdot a_{11} + P_s \cdot a_{12} + P_p \cdot a_{13} + P_o \cdot a_{14} + P_r \cdot a_{15} \\ \frac{dP_s}{dt} = P_n \cdot a_{21} + P_s \cdot a_{22} + P_p \cdot a_{23} + P_o \cdot a_{24} + P_r \cdot a_{25}; \\ \frac{dP_p}{dt} = P_n \cdot a_{31} + P_s \cdot a_{32} + P_p \cdot a_{33} + P_o \cdot a_{34} + P_r \cdot a_{35}; \\ \frac{dP_o}{dt} = P_n \cdot a_{41} + P_s \cdot a_{42} + P_p \cdot a_{43} + P_o \cdot a_{44} + P_r \cdot a_{45}; \\ \frac{dP_r}{dt} = P_n \cdot a_{51} + P_s \cdot a_{52} + P_p \cdot a_{53} + P_o \cdot a_{54} + P_r \cdot a_{55}. \end{cases} \quad (7)$$

Рассмотренные состояния данного процесса образуют полную группу несовместных событий, поэтому сумма их вероятностей равна единице [17].

$$P_n + P_s + P_p + P_o + P_r = 1, \quad (8)$$

То есть можно записать

$$\begin{cases} 0 = P_n \cdot a_{11} + P_s \cdot a_{12} + P_p \cdot a_{13} + P_o \cdot a_{14} + P_r \cdot a_{15}; \\ 0 = P_n \cdot a_{21} + P_s \cdot a_{22} + P_p \cdot a_{23} + P_o \cdot a_{24} + P_r \cdot a_{25}; \\ 0 = P_n \cdot a_{41} + P_s \cdot a_{42} + P_p \cdot a_{43} + P_o \cdot a_{44} + P_r \cdot a_{45}; \\ 0 = P_n \cdot a_{51} + P_s \cdot a_{52} + P_p \cdot a_{53} + P_o \cdot a_{54} + P_r \cdot a_{55}; \\ 1 = P_n + P_s + P_p + P_o + P_r. \end{cases} \quad (9)$$

Составим матрицу С (матрицу коэффициентов а), дополненную единицами в последней строчке:

$$C = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Матрица В (матрица решений) равна:

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Матрица вероятностей состояний стрелочного привода

$$P = (P_n \quad P_s \quad P_p \quad P_o \quad P_r). \quad (12)$$

Коэффициенты  $a_{ij}$  зависят от переходов объекта в различные состояния и определяются следующим образом:  $a_{11} = -(\lambda_{ns} + \lambda_{no})$ ;  $a_{12} = 0$ ;  $a_{13} = 0$ ;

$$a_{14} = \mu_{on}; \quad a_{15} = \mu_{rn};$$

$$a_{21} = \lambda_{ns}; \quad a_{22} = -(\lambda_{sp} + \lambda_{so} + \lambda_{sr}); \quad a_{23} = \mu_{ps};$$

$$a_{24} = \mu_{os}; \quad a_{25} = \mu_{rs};$$

$$a_{31} = 0; \quad a_{32} = \lambda_{sp}; \quad a_{33} = -(\mu_{ps} + \lambda_{po} + \lambda_{pr});$$

$$a_{34} = \mu_{op}; \quad a_{35} = 0;$$

$$a_{41} = \lambda_{no}; \quad a_{42} = \lambda_{so}; \quad a_{43} = \lambda_{po};$$

$$a_{44} = -(\mu_{on} + \mu_{os} + \mu_{op} + \lambda_{or}); \quad a_{45} = 0;$$

$$a_{51} = 0; \quad a_{52} = \lambda_{sr}; \quad a_{53} = \lambda_{pr}; \quad a_{54} = \lambda_{or};$$

$$a_{55} = -(\mu_{rn} + \mu_{rs}). \quad (13)$$

Исходные данные для выполнения расчетов – интенсивности переходов состояний (получено по результатам статистических данных отказов стрелочных приводов):  $\lambda_{or} = 0,28$ ;  $\lambda_{ns} = 0,67$ ;  $\lambda_{no} = 0,34$ ;  $\lambda_{sr} = 0,39$ ;  $\lambda_{so} = 0,72$ ;  $\lambda_{po} = 0,32$ ;  $\lambda_{sp} = 0,64$ ;  $\lambda_{pr} = 0,12$ ;  $\mu_{nr} = 0,19$ ;  $\mu_{on} = 0,41$ ;  $\mu_{rs} = 0,26$ ;  $\mu_{os} = 0,36$ ;  $\mu_{op} = 0,15$ ;  $\lambda_{ps} = 0,78$ .

Расчет матриц выполнено с помощью Mathcad

$$\text{lsolve}(C, B) = \begin{pmatrix} 0,177 \\ 0,239 \\ 0,153 \\ 0,227 \\ 0,203 \end{pmatrix}.$$

В результате решения системы уравнений с учетом уравнения (7) при известных многочисленных значениях интенсивностей переходов между состояниями процесса стрелочных электроприводов определяются вероятности их нахождения в каждом из возможных дискретных состояний рассматриваемого процесса. Численные значения для решения системы дифференциальных уравнений были найдены по результатам анализа статистических данных, предоставленных службой Ш Приднепровской железной дороги.

Это позволило получить значения вероятностей пребывания стрелочных электроприводов в различных состояниях. Наиболее вероятными являются  $P_s$ ,  $P_o$ ,  $P_r$ . Но значение не превышают 0,25.

Таким образом, для заданных величин интенсивности потоков состояния электроприводов стационарного режима работы можно сделать следующий вывод.

Общее количество работающих приводов составляет  $(17,7+23,9+15,3=56,9\%)$ , что составляет около половины всего количества. Количество приводов, находящихся в ремонте и отказали составляет 43,1%.

Дальнейший анализ состояния показывает, что новых стрелочных приводов на станциях Приднепровской ж.д. – 23,9 %, приводов, находящихся в передаточном состоянии – 15,3 %. По имеющимся данным вероятностей состояний получается, что вероятность рабочего состояния приводов составляет 0,569, а 43,1 % стрелочных приводов находятся в критическом состоянии и требуют замены или капитального ремонта.

## Выводы

Анализ гармонического состава полученных при моделировании рабочего тока и напряжения якоря обнаруживает зависимость амплитудных значений основных гармоник (скоростной, зубцевой и коллекторной) от степени развития неисправности (изменения сопротивления короткого замыкания между двумя коллекторными пластинами). Общий характер зависимостей амплитуды гармонических составляющих от частоты – экспоненциальный, что подтверждено экспериментально.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее рациональными диагностическими параметрами для выявления неисправностей электродвигателя являются гармонические составляющие в цепи рабочего тока в диапазоне частот от 10 до 4000 Гц.

У исправного двигателя постоянного тока типа МСП стрелочного электропривода в кривой тока присутствуют гармоники кратные 100 Гц, которые возникают в результате работы однофазной схемы выпрямления, а также – 300, 600 Гц, связанные с

работой трехфазного мостового выпрямителя, используемого для питания потребителей постоянного тока на посту ЭЦ.

Установленные зависимости предлагается использовать в качестве диагностического параметра при эксплуатационной диагностике стрелочных двигателей постоянного тока.

Разработана математическая модель технического обслуживания стрелочных электроприводов на основе теории Марковских процессов. Общее количество работающих приводов составляет 56,9 %, что составляет около половины всего количества. Количество приводов на станциях Приднепровской железной дороги, находящихся в ремонте и предотказном состоянии – 43,1%.

Применение предложенной методики эксплуатационной диагностики двигателей постоянного тока стрелочных приводов позволит повысить их надежность, а, следовательно, и безопасности движения на железных дорогах.

### Список литературы

1. Классификация и каталог дефектов и поврежденных элементов электрических переводов железных дорог Украины. Днепропетровск: Арт-Прес, 2000. – 148 с.
2. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при после ремонтных испытаниях / Д.И. Родькин. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
3. Котеленец Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
4. Панкратов А.И. К вопросу усовершенствования систем диагностики машин постоянного тока / А.И. Панкратов, Н.В. Ивченко // Вестник трудов Кременчугского государственного политехнического университета: Научные труды КГПУ. – Кременчуг: КГПУ, 2006. – Вып. 3/2006 (38), часть 2. – С. 83-87.

5. Грила А.И. Осциллографический метод оценки состояния стрелочных электродвигателей постоянного тока / А.И. Грила // Автоматика, телемеханика и связь. – 1983. – № 12. – С. 28.

6. Сапожников В.В. Основы технической диагностики: учебное пособие для студентов вузов ж-д. транспорта / В.В. Сапожников, В.В. Сапожников. – М.: Маршрут, 2004. – 318 с.

7. P.Fritz. Efficient dsagnostics for supporting the availability of turnouts and tracks // Signal and Draht. – 2004. – № 11. – Pp. 42-45.

8. Парфенов В.И. Способ дистанционного определения дефектов электрических составляющих электродвигателя постоянного тока стрелочного перевода. Д.П.Украины № 8530, В 61L 7/08, опубл. 15.08.2005. – В.И. Парфенов, А.Б. Руденко. – Бюл. № 8

9. Tavner P. Penman and H. Sedding, Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, The Institution of Engineering and Technology, London, UK. – P. Tavner, L. Ran, J. – 2008.

10. Mikhail Tsyppkin. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique - a Practical Implementation // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011. – P. 406-411.

11. Subhasis Nandi. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review / Nandi Subhasis, A. Hamid Toliyat, Li. Xiaodong // IEEE Transactions on Energy Conversion. – Vol. 20, No. 4, December. – 2005. – P. 719 -729.

Поступила в редколлегию 8.11.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Н. Муха, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр.

### МОНІТОРИНГ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Т.М. Сердюк

У статті розглянуті питання діагностики двигунів постійного струму стрілочних приводів за допомогою гармонічного аналізу кривої робочого струму в процесі експлуатації. Виконана експериментальна і теоретична оцінка спектрального складу робочого струму двигуна з послідовним збудженням. Розроблено математичну модель технічного обслуговування стрілочних електроприводів на основі теорії Марковських процесів. Застосування запропонованої методики експлуатаційної діагностики двигунів постійного струму стрілочних приводів дозволить підвищити їх надійність, а, отже, і безпеку руху на залізниці.

**Ключові слова:** стрілочний привід, діагностика, двигун постійного струму, гармоніки.

### MONITORING AND OPERATIONAL DIAGNOSIS OF SWITCH POINTS' DC SERIES-WOUND MOTORS

T.M. Serdiuk

The paper deals with the diagnosis of DC motors switch point using harmonic analysis of current curve during the operation. The current spectral composition of the DC motor with series excitation was evaluated experimentally and theoretically. The mathematical model of maintenance switch point motors are developed and based on the theory of Markov processes. Application of the proposed operational diagnostic techniques of switch points' DC motors will allow to improve their reliability and, consequently, and traffic safety on the railways.

**Keywords:** switch point, diagnostics, DC motor, harmonics.