

УДК 656.259.9

Б. П. ДОРОХИН – студент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, bogdan94@live.ru  
Т. Н. СЕРДЮК – к. т. н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru

## ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ДВИГАТЕЛЕЙ СТРЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

*Статью представил д. ф.-м. н., проф. В. И. Гаврилюк*

### Введение

Обеспечение безопасности движения поездов является одной из основных задач при их эксплуатации.

Темпы современного развития железнодорожного транспорта, увеличение массы поездов, рост скоростей их движения требуют совершенствования используемых ресурсов: удлинения станционных путей, укладки тяжелых типов рельсов, в том числе и на стрелках.

Возросшие тяговые усилия по переводу остряков требуют применения более мощных электродвигателей стрелочных приводов, что связано с увеличением рабочего тока и необходимостью иметь в каждом проводе линейной цепи по две, три и более жил кабеля.

Улучшение условий энергоснабжения, наличие недостатков двухпроводной схемы управления стрелкой с двигателями постоянного тока, внедрение новых современных методов и технологий обслуживания, позволяют рассматривать двигатели с использованием переменного тока как достаточно перспективное направление, обеспечивающее высокий уровень безопасности.

Как известно, электродвигатель является устройством, преобразующим электрическую энергию в механическую.

Электрические двигатели применяются в электроприводах, которые перемещают остряки стрелочного перевода из одного положения в другое, запирают остряки и крайнем положении, с их помощью полу-

чают непрерывный контроль фактического положения стрелки.

### Постановка задачи

Первый опыт применения электроприводов переменного тока в схеме управления стрелкой относится к 1952 году. Но в то время на станциях отсутствовали надежные источники переменного тока, возникали сложности с резервированием питания. Кроме того, не были решены вопросы последовательного перевода стрелок, связанные с увеличением числа жил кабеля. Все это обусловило широкое распространение двухпроводной схемы управления стрелкой с двигателями постоянного тока в системах электрической централизации с центральным питанием [1, 2].

Современный уровень модернизации железнодорожных станций, позволяющий использовать приводы с электродвигателями переменного тока, обеспечивают не только высокую надежность, но и удобство в эксплуатации.

Несмотря на это, большая часть переводов на сети железных дорог до сих пор оснащена двигателями постоянного тока. Также следует отметить, что на сортировочных горках в силу условий технологии работы внедрение двигателей переменного тока невозможно. В стрелочных электроприводах используются следующие виды электродвигателей постоянного тока: МСП-0,1, МСП-0,15, МСП-0,25 [2].

Таким образом, анализ существующей элементной базы стрелочных приводов, их достоинств и недостатков, уровень технического оснащения железнодорожных станций Украины, внедрение скоростного движения и электрификация участков, модернизации устройств электрической централизации и перевод их на микропроцессорную элементную базу в соответствии с Концепцией Государственной программы реформирования железнодорожного транспорта, утвержденной распоряжением Кабинета Министров Украины от 27.12.2006 г. № 651-р [4], подчеркивает необходимость в поиске новых решений, связанных с заменой существующих двигателей стрелочных электроприводов и усовершенствованием их технологии обслуживания. Следовательно, затронутая в статье тема, является актуальной.

**Целью работы** является оценка существующих типов электродвигателей стрелочных приводов и современных аналогов, разработка рекомендаций по применению новых типов двигателей, совершенствование существующей технологии обслуживания двигателей переменного тока типа МСТ путем разработки методики измерения их параметров.

#### **Анализ существующих типов двигателей стрелочных электроприводов**

**Электродвигатель постоянного тока** типа МСП-0,1 (рис.1) предназначен для установки в электроприводах для перевода стрелок легких типов, но в новых разработках электродвигатели МСП-0,1 не применяются. Электродвигатели постоянного тока типа МСП-0,1 мощностью 0,1 кВт имеют последовательное соединение обмоток, являются двухполюсными, реверсивными, с горизонтальным валом на подшипниках качения, изготавливаются на номинальное напряжение 30, 100 и 160В; имеют две обмотки возбуждения [2, 6].

Электродвигатель типа МСП-0,15 мощностью 0,15 кВт предназначен для установки в электроприводах для перевода стрелок тяжелых, а также обычных типов. С 1982 года электродвигатели выпускаются только на напряжение 160 В [2].

Электродвигатель МСП-0,25 является неотъемлемой частью усовершенствований железнодорожного оснащения. Стрелочный электродвигатель постоянного тока типа МСП-0,25 представляет собой двухполюсный реверсивный электродвигатель с горизонтальным валом на подшипниках. Его мощность составляет 0,25 кВт [2, 7].



Рис. 1. Электродвигатель постоянного тока стрелочного электропривода типа МСП-0,1

**Асинхронные электродвигатели трехфазного переменного тока** (рис. 2) имеют ряд преимуществ по сравнению электродвигателями постоянного тока с последовательным возбуждением, которые применяются в стрелочных приводах.



Рис. 2. Асинхронные электродвигатели стрелочных электроприводов типа МСТ

Прежде всего, это отсутствие в асинхронных электродвигателях такого сложного и малонадежного узла, как коллектор, что значительно сокращает эксплуатационные расходы на текущее обслуживание и ремонт, а также исключает получение ложного контроля положения стрелки за счет выпрямительного эффекта дуги при искрении коллектора [2, 6, 15].

Межремонтный срок службы электродвигателей переменного тока в 3...4 раза больше по сравнению с двигателями постоянного тока.

В настоящее время на железной дороге применяются электродвигатели переменного тока типа МСТ. К ним относятся такие электродвигатели, как МСТ-0,3; МСТ-0,3А; МСТ-0,3Б; МСТ-0,3В и МСТ-0,6; МСТ-0,6А [2, 6].

Асинхронные трехфазные электродвигатели типов МСТ-0,3, МСТ-0,3А, МСТ-0,3Б, МСТ-0,3В устанавливаются в электроприводах типа СП для перевода острижков тяжелых и обычных стрелок электрической централизации; типов МСТ-0,6, МСТ-0,6А устанавливаются в электроприводах типа СП для перевода острижков стрелок в маневровых районах.

### Современные типы двигателей стрелочных электроприводов

В настоящее время выпускаются стрелочные **электродвигатели переменного тока типа МСА** (рис. 3), асинхронные, реверсивные, трёхфазные с улучшенными эргономическими свойствами (наличие ручки для переноса и уменьшение массы).

Выпускаемые заводом электродвигатели имеют встроенное соединением обмоток «звездой». МСА является полностью взаимозаменяемым электродвигателем типа МСТ. Двигатели МСА применяются и в новых шпальных электроприводах типа УПС [6, 12].

Следует отметить, что коллекторные двигатели по управляемости и энергоэкономичности считаются лучшими, в особенности для электроприводов с регулированием скорости или положения.



Рис. 3. Электродвигатель переменного тока типа МСА

Их основной недостаток – ненадежный и быстро изнашивающийся щеточно-коллекторный узел, вызывающий искрение и помехи, а в стрелочных электроприводах и ложный контроль положения острижков.

Асинхронные двигатели переменного тока, по сути бесконтактные, лишены данного недостатка, но существенно ниже по энергетической эффективности и управляемости.

Наилучшими областями применения асинхронных двигателей являются длительно работающие нерегулируемые электроприводы с одной или двумя скоростями вращения, стабильность которых не имеет решающего значения (обычные вентиляторы, насосы, транспортеры и др.) [9 – 12].

Развитие электроники привело к появлению весьма сложных и дорогих асинхронных двигателей с частотным управлением, регулируемых по скорости.

Но их динамические показатели, такие, как точность регулирования и быстродействие, не могут конкурировать с более простыми электроприводами постоянного тока аналогичного класса и стоимости.

Общим недостатком коллекторных и асинхронных двигателей классической конструкции является то, что основная доля тепла в них выделяется в роторе, откуда, весьма затруднен теплоотвод. Это существенно снижает надежность, срок службы и увеличивает габариты этих двигателей.

**Электродвигатель бесконтактный управляемый постоянного тока (ДБУ)** – это современный перспективный электродвигатель, предназначенный для работы в составе стрелочных электроприводов постоянного тока. (рис. 4). ДБУ сконструированы для использования в компактных, надежных, регулируемых приводах любого назначения с наибольшим сроком службы, в особенности в тяжелых условиях эксплуатации (мороз, тепло, влажность, вибрации и др.). Они не требуют обслуживания и регламентных работ [13, 14].

Электродвигатель ДБУ предназначен для применения в электроприводах стрелочных переводов СП-6, СП-6М, СП-6К и других электроприводах стрелочных переводов железных дорог.



Рис. 4. Бесколлекторный электродвигатель постоянного тока типа ДБУ

Он разработан и изготовлен с использованием новейших материалов и современных технологий. ДБУ обладает рядом преимуществ по отношению к применяющимся в настоящее время коллекторным двигателям постоянного тока МСП-0,15, МСП-0,25, а именно:

- повышенная надежность двигателя за счет отсутствия коллекторного узла гаран-

тия – 4 года;

- исключение возможности пробоя обмоток при климатических и механических воздействиях за счет оригинального конструктивного решения двигателя;

- защита двигателя при перегрузках посредством блока электронного управления двигателем; повышенная надежность стрелочного электропривода за счет исключения механического фрикциона, функции которого обеспечивает электронный блок управления двигателя;

- автоматическое выключение двигателя через 2...10 с после включения; двукратное уменьшение массогабаритных характеристик (в сравнении с коллекторными двигателями);

- возможность планового пуска двигателя, исключение удара острия о рамный рельс; двигатель может быть изготовлен как для работы в сетях как постоянного, так и переменного тока;

- блок управления двигателя обеспечивает самодиагностику и диагностику электропривода (без прокладки дополнительных проводов) [13, 14].

Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя ДБУ приведены на рис. 5.

Также разработан «интеллектуальный» стрелочный электродвигатель ЭМСУ, имеющий электронное управление и работающий как от постоянного, так и от переменного тока. Он может заменить практически все типы стрелочных электродвигателей, выпускавшихся ранее [15].

На заводе изготовителе производится около 20 модификаций электродвигателей, что является невыгодным, так как под каждый нужна специфическая оснастка, которую должно поддерживать в работоспособном состоянии, даже если она используется всего несколько раз в год. Поэтому специалисты придумали универсальный двигатель, который, благодаря использованию электронной платы, может быть запрогра-

ммирован на разное число оборотов и раз-  
 ный вид напряжения. При этом сама меха-  
 ника для всех типов двигателей остается  
 единой [14, 15].

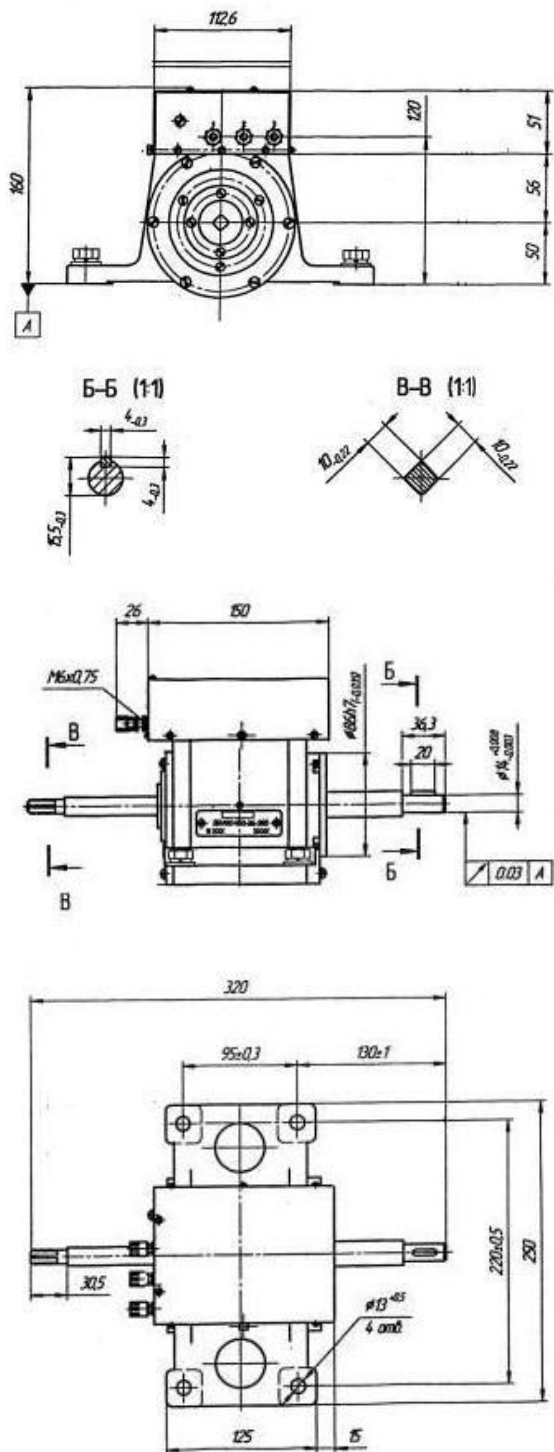


Рис. 5. Габаритные и установочно-присоединительные размеры ДБУ

Двигатель ЭМСУ (рис. 6) разработан на базе вентильно-индукторного двигателя. ЭМСУ предназначен для эксплуатации на железнодорожном транспорте в составе стрелочных электроприводов. мощностью 0,1 кВт. Он оснащён микропроцессорной системой управления, позволяющей ему быть универсальным по питающему напряжению и частоте вращения ротора. Основные технические характеристики электродвигателя типа ЭМСУ приведены в табл. 1 [15].

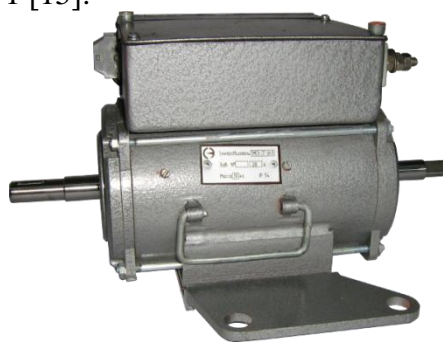


Рис. 6. Электродвигатель стрелочного электропривода типа ЭМСУ

Таблица 1

Основные технические характеристики электродвигателя типа ЭМСУ

Наименование параметра	Значение параметра
Потребляемая мощность, Вт	450, не более
Частота вращения, мин-1	1400 / 100
КПД, %	60, не менее
Масса, кг	8,0, не более

Еще одно удобство при эксплуатации электродвигателя ЭМСУ – это настройка номинальной частоты вращения ротора, в зависимости от типа стрелочного перевода, которая может производиться как на заводе-изготовителе, так и в условиях эксплуатации от переносного пульта или ноутбука.

Работа ЭМСУ в стрелочных переводах осуществляется от серийных схем управления ЭЦ и не требует перерасчёта кабельных сетей. Применение двигателей типа ЭМСУ приобретает особую актуальность с введение скоростного движения в Украине. Он

имеет стабильную скорость вращения и стабильное потребление тока, легко перепрограммируется.

Система управления двигателем предусматривает возможность обеспечения синхронной работы двух и более электроприводов, что делает его перспективным для применения в стрелочных переводах скоростных дорог [13].

Электродвигатель универсален по питанию, может работать как от сети постоянного тока, так и от сети трехфазного переменного тока. Электронный блок управления ЭМСУ обеспечивает его работу в диапазоне напряжений от 160 В до 350 В постоянного тока и от 190 В до 250 В трёхфазного переменного тока.

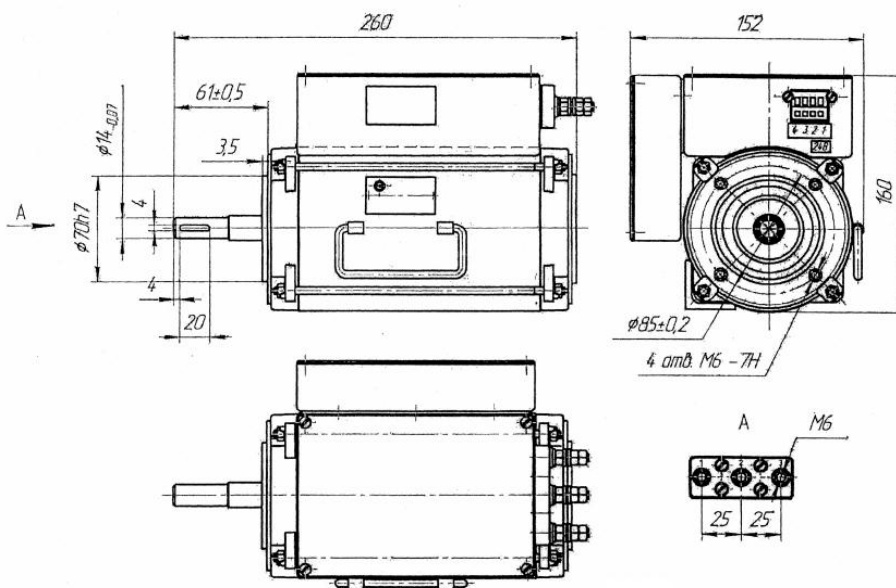


Рис.7. Габаритные и установочные размеры электродвигателя ЭМСУ-Ф [13]

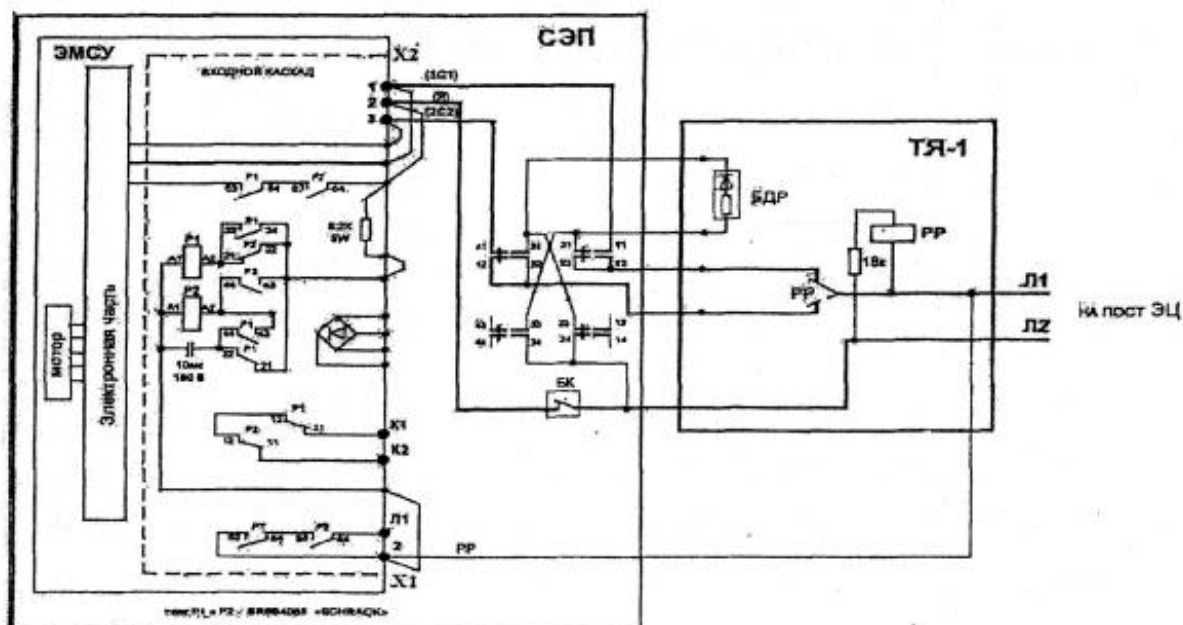


Рис.8. Подключение электродвигателя ЭМСУ к сети постоянного тока

Примечание. В этом случае необходимо установить перемычку проводом 0,75мм<sup>2</sup> между контактами «2 PP» на разъеме XI и проводом JJ1 в путевом ящике ТЯ-1 [13]

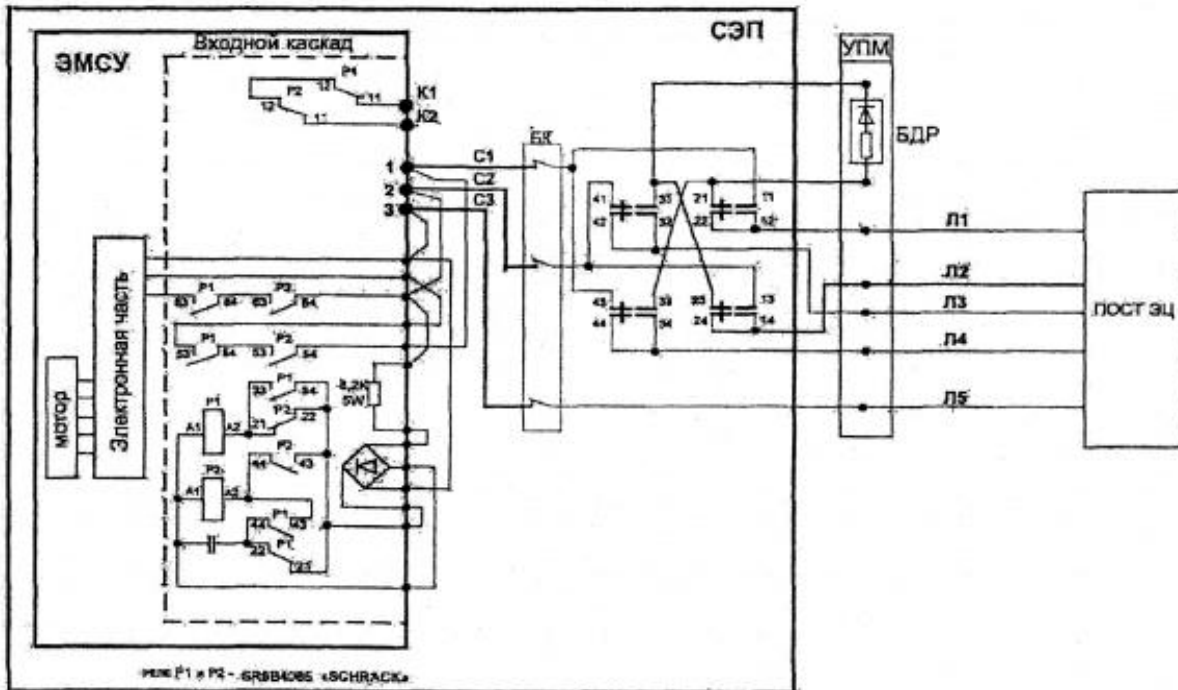


Рис.9. Подключение электродвигателя ЭМСУ к сети трехфазного переменного тока [13]

Наличие микропроцессорной системой управления, позволяющей двигателю быть универсальным по питающему напряжению и частоте вращения ротора, в то же самое время является и его недостатком, поскольку требует специально обученного персонала. Этот же факт делает двигатели ЭМСУ более сложными в эксплуатации и дорогими.

Таким образом, наиболее перспективными являются асинхронных трехфазные двигатели в виду отсутствия щеточно-коллекторного механизма и необходимости в программировании для задания режимов работы.

Ниже приведен метод определения параметров двигателей МСТ, его рабочих и механической характеристик по экспериментальным данным, полученным во время диагностики его состояния, предложенный авторами.

### Определение параметров и характеристик асинхронного двигателя

Знание точных значений многих параметров схемы замещения асинхронных двигателей, например, активных и реактивных сопротивлений статора, ротора и цепи намагничивающего являются необходимыми для определения рабочих и механической характеристик. Эти параметры в большинстве справочников не приводятся или приводятся не полностью или неточными. Кроме того, из-за нарушения технологического процесса, различных технологий на разных заводах-производителях, паспортные параметры машины могут отличаться от справочных данных на 10...20%. Следовательно, возникает необходимость знания точных параметров двигателя для анализа работоспособности данного привода. Эта же задача стоит и у производителей двигателей, поскольку коммерческая ценность двигателя снабженного индивидуальным

паспортом наного выше. Известен ряд методов экспериментального определения параметров асинхронных машин [16]. Рассмотрим схему замещения асинхронного двигателя приведена на рис. 10.

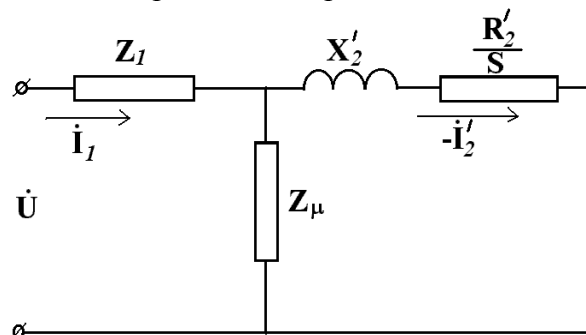


Рис. 10. Схема замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Таки образом, существует возможность идентификации всех параметров асинхронного двигателя, если известны полное сопротивление обмотки при заторможенном роторе  $Z_n$ , и величина:

$$S_{k.o.} = \frac{r_2'}{x_\mu + x_2'} \quad (1)$$

где  $r_2'$  – приведенное активное сопротивление обмотки ротора;  $x_\mu$  – индуктивное сопротивление цепи намагничивания;  $x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора.

При неподвижном роторе ( $s=0$ ) полное сопротивление обмотки определяется выражением:

$$Z_{II} = r_{II} + jX_{II} = r_1 + jX_1 + \frac{jX_\mu (r_2' + jX_2')}{r_2' + j(X_\mu + X_2')} \quad (2)$$

Откуда

$$r_{II} = r_1 + \frac{r_2' \left( \frac{X_\mu}{X_\mu + X_2'} \right)^2}{S_{k.o.}^2 + 1}, \quad (3)$$

$$X_{II} = X_1 + \frac{X_\mu \left( S_{k.o.}^2 + \frac{X_2'}{X_\mu + X_2'} \right)}{S_{k.o.}^2 + 1}. \quad (4)$$

Если ротор машины является короткозамкнутым (то есть используется обмотка «беличья клетка»), пренебрежение величиной индуктивного сопротивления недопустима. Учитывая, что отдельное определение индуктивных сопротивлений статора и ротора связано с большими трудностями, на практике обычно принимают их равными. Профессор Ю. С. Четет [16, 17] показал, что подобное допущение вносит в расчеты ошибку около 1%. Полагая  $x_1 = x_2' = x$  и на основании выражения для  $S_{k.o.}$ :

Для асинхронных машин является характерным такое явление. Если одна из обмоток машины подключена к источнику напряжения, а круг другой обмотки разомкнут, то заранее раскрученный ротор не останавливается, а продолжает вращаться с некоторой скоростью  $\Omega_{k.o.}$ .

Величина скорости  $\Omega_{k.o.}$  зависит от  $S_{k.o.}$  и синхронной скорости  $\Omega_o$ .

$$v_{k.o.} = \frac{\Omega_{k.o.}}{\Omega_o} = \sqrt{1 - S_{k.o.}^2}, \quad (5)$$

$$S_{k.o.} = \sqrt{1 - v_{k.o.}^2}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения  $S_{k.o.}$  достаточно измерить скорость вращения ротора в однофазном режиме работы при разомкнутой цепи обмотки машины. Можно в режиме самохода измерить скорость вращения ротора, а величину ЭДС  $E_{тг.о.}$ , что приводится в разомкнутой обмотке машины [10, 11].

Значительно удобнее получаются соотношения, если для определения  $E_r$  пользоваться следующим выражением [16, 17]:

$$\frac{E_r}{I_{в.о.}(r_n - r_1)} = \frac{(S_{k.o.}^2 + 1)\sqrt{1 - S_{k.o.}^2}}{2S_{k.o.}}, \quad (7)$$



где  $E_r$  – это ЭДС, которая наводится в разомкнутой обмотке машины в режиме самохода;  $I_{г.о}$  – это ток в замкнутой обмотке возбуждения в режиме самохода.

На основе выше сказанного разработана методика определения параметров схемы замещения асинхронных двигателей стрелочных электроприводов.

Алгоритм автоматизированного определения параметров машины:

1. На “холодном двигателе” измеряется омическое сопротивление статора.

2. Затем вал зажимается (фиксируется) и проводится опрос короткого замыкания, в котором определяется полное сопротивление машины. После снятия напряжения с клемм машины ротор освобождается.

3. Двигатель запускается без нагрузки и измеряются параметры контура, что намагничивает [16,17].

4. Наконец, двигатель пускают в трехфазном режиме и отключают две из них. Измерив скорость вращения вала в режиме с обрывом фаз вычисляется вспомогательный параметр  $S_{к.о}$ , через который находятся другие.

В процессе эксперимента были проведены следующие измерения:

1. Измерение омического сопротивления обмотки фазы статора испытуемого асинхронного электродвигателя с помощью омметра при отключенном питании. Таким образом получаем активное сопротивление статора.

2. Проводится опыт короткого замыкания при заторможенном роторе и номинальном напряжении питания. При этом измеряются напряжение  $U_k$ , ток  $I_k$  и потребляемая машиной мощность  $P_k$ . По данным опыта короткого замыкания определяют активное, индуктивное и полное сопротивление рабочего контура упрощенной схемы замещения:

$$r_{\Pi} = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{3I_k^2} \quad (8)$$

$$X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{(Z_k^2 - r_k^2)} \quad (9)$$

3. Проводился нормальный пуск асинхронного электродвигателя без нагрузки при  $U_{\phi} = U_{ном}$  и опрос холостого хода. Для этого был измерен ток холостого хода  $I_0$ , напряжение  $U_0$  и мощность  $P_0$ , потребляемая машиной. Тогда параметры контура схемы замещения, намагничивает:

$$r_{\mu} = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad (10)$$

$$X_{\mu} = \sqrt{(Z_{\mu}^2 - r_{\mu}^2)}. \quad (11)$$

4. Учитывая, что отдельное определение индуктивных сопротивлений статора и ротора связано с большими трудностями, на практике обычно принимают их равными.

В процессе преобразования электрической энергии в механическую существует баланс мощностей энергии.

$$P_{em} = Fn = EI, \quad (12)$$

где  $E \cdot I$  – электромагнитная мощность,  $Fn$  – механическая мощность;  $n$  – скорость вращения ротора. В асинхронных двигателях напряжение в сети  $U \cong E$  и ток статора  $I$  сдвинуты по фазе на угол  $\phi$ . Поэтому

$$P_{em} = mUI \cos \phi, \quad (13)$$

где  $m$  – число фаз роторной обмотки.

Механическую мощность удобно выразить через вращающий момент  $M$  и угловую скорость. Тогда следует равенство

$$P_{em} = mUI \cos \phi = 9.8M\Omega, \quad (14)$$

где  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ ,  $M$  – момент выражен в кГм (1кГм = 9,81 Дж = 9,81 Н.м.).

Роторные обмотки двигателя подразделяют на два типа: короткозамкнутые и с контактными кольцами. В двигателях типа МСТ используются короткозамкнутые обмотки, выполненные в виде беличьей клетки.

Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе во многом аналогичны процессам в трансформаторе. В режиме холостого хода – статор находится под дейст-

вием номинального напряжения, а ток в обмотке ротора отсутствует. Это может быть только в случае вращения ротора по направлению вращения поля статора с синхронной скоростью, то есть когда ход  $S = 0$ . На рис. 11 эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя.

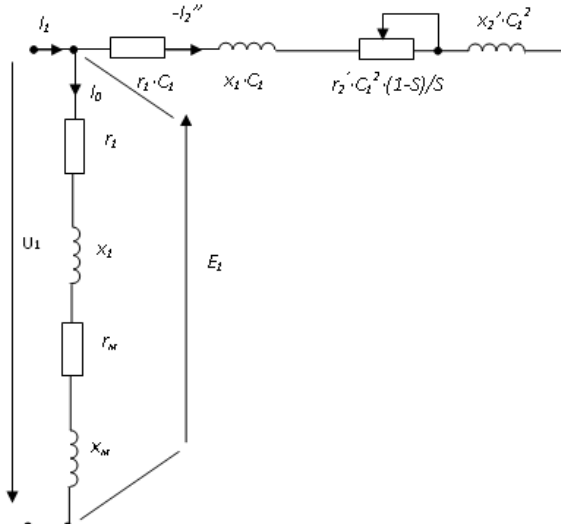


Рис. 11. Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цепь приведенного тока ротора  $I_2'$  содержит активные сопротивления обмоток  $r_1$ ,  $r_2'$  - активные сопротивления обмоток статора и ротора,  $x_1$ ,  $x_2'$  - индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; круг, что намагничивает, представлена опорами  $r_M$ ,  $x_M$ ,  $r_1$ , и  $x_1$ . Из схемы замещения получается, что ток [11, 12]

$$I_2^1 = \frac{U_1}{\left( r_1 + r_2' + \frac{1-S}{S} \cdot r_2' \right)^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (15)$$

Видно, что в момент пуска  $t = t_{\text{пуск}}$ ,  $S=1$ , а токи в обмотке ротора и в обмотке статора имеют максимальное значение (в трансформаторе это соответствует режиму КЗ), поскольку сопротивление  $R_{\text{д}}^1$  который имитирует нагрузку, равна нулю.

Электромагнитный момент вращения двигателя, что возникает в результате силового взаимодействия полей статора и ротора

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{9,81\Omega_1} = \frac{P_{22}}{S\Omega_1 9,81} = C_m \Phi I_2' \cos \phi, \quad (16)$$

где  $I$  – ток, пропорциональный рабочем потока и активной составляющей тока ротора  $I_{2S} = I_2' \cos \phi_2$ , где скольжение  $S = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}$ ,

$P_{22} = m_1 I_2' r_2'$  – мощность потерь в обмотке ротора,  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  - частоты вращения поля статора и ротора. Механический момент  $P_{\text{мех}} = \Omega_2 M_T$ , где  $M_T$  – тормозной момент. Формулу можно записать в таком виде:

$$M = \frac{m_1 r_2' U_1^2}{9,81 S \Omega_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}. \quad (17)$$

Таким образом, зависимость (3.8) называется механической характеристикой асинхронного двигателя. Видно, что  $M$  зависит от квадрата напряжения  $U_1^2$  приложенного к обмотке статора, что характеризует чувствительность момента к изменениям напряжения питающей сети. С другой стороны, из уравнения (6) можно показать, что момент  $M$  при неизменных  $U_1$  и  $f_1$  есть величина постоянная, не зависящая от активного сопротивления ротора.

Критическое скольжение это такое, при котором двигатель развивает максимальный момент. Оно может быть определено по формуле [11]

$$S_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2} \quad (18)$$

Механическая характеристика может быть рассчитана по формуле Клосса, которая позволяет определить зависимость относительного момента от потока

$$\frac{M}{M_{\text{max}}} = \frac{2}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}}} \quad (19)$$

В первый момент времени  $n=0$ ,  $S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_1}{n_1} = 1$ . Таким образом, пусковой момент не максимальный и равен

$$M_{\text{пуск}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{\Omega_1 \cdot \left( (r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right)}. \quad (20)$$

Скольжение  $S=0$ , если  $n_1 = n$ , то есть не будет пересечения магнитного поля статора

и ротора. В это время ЭДС  $E_2$  и ток ротора  $I_2$ , а значит и момент на валу ротора  $M$  будут равны 0.

Когда  $S < S_{кр}$  в формуле (19) числитель преобладает знаменатель, кривая идет вверх, а при  $S > S_{кр}$  наоборот знаменатель преобладает числитель, то кривая механической характеристики идет вниз.

Максимальный момент может быть определен как

$$M_{max} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \Omega_1 \cdot (x_1 + x_2')} \quad (21)$$

Для оценки рабочих свойств асинхронного двигателя и степени его пригодности для работы надо знать его рабочие характеристики, которые представляют собой зависимость момента  $M$ , тока статора  $I_1$ , коэффициента полезного действия  $\eta$ , потока  $S$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от полезной мощности  $P_2$  при номинальном напряжении и частоте питающей сети. Зависимости могут быть построены путем прямых измерений величин, которые интересуют, при различных нагрузках двигателя или рассчитаны.

Зависимость  $n(P_2)$  называется жесткой характеристикой. При работе двигателя в режиме холостого хода  $P_2=0$ , а ротор будет вращаться со скоростью  $n \approx n_1$ . По мере увеличения нагрузки скорость будет падать, а  $S$  поток расти. Для обычных асинхронных двигателей  $S_{ном}=0,015...0,06$ , а для двигателей стрелочных электроприводов типа МСТ  $S_{ном}=0,18$ . Это сделано для увеличения пускового момента.

Зависимость  $M(P_2)$  возрастает с ростом  $P_2$ . Поскольку скорость вращения ротора практически меняется мало, то момент на валу ротора будет пропорционален мощности  $P_2$ .

Ход кривой  $I_1(P_2)$  соответствует уравнению (6), если считать  $I_1 \approx I_{12}$ . При работе вхолостую ( $M_r=0$ ) ротор вращается приблизительно с синхронной скоростью  $n_1$ , а двигатель потребляет большой ток  $I_1$ , который составляет 25...75% от номинального. С ро-

стом нагрузки увеличивается ток в роторе  $I_2$  и ток  $I_1$  в обмотке статора.

Характеристика коэффициента мощности  $\cos \varphi$  ( $P_2$ ) показывает, что по мере роста нагрузки на валу двигателя отношение активной мощности  $P_1$ , потребляемой из сети, к полной мощности  $S$  растёт

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (22)$$

где  $Q_1$  – реактивная мощность в обмотке статора. Эта мощность при работе машины в режиме холостого хода – максимальная, а  $\cos \varphi = \min = 0,08...0,2$ .

При нагрузке скорость вращения ротора падает, мощность  $P_1$  растёт,  $\cos \varphi$  возрастает до 0,75...0,95, а реактивная мощность  $Q_1$  растёт в меньшей степени, чем  $P_1$ . С ростом течения роста  $\cos \varphi$  замедляется, поскольку возрастает мощность  $Q_1$  за счет усиления полей рассеяния, которые пропорциональны токам.  $\cos \varphi$  двигателя, что работает с недогрузкой, можно увеличить снижением в раз напряжения фазных обмоток статора путем переключения обмоток статора, если это допустимо, с треугольника на звезду.

Зависимость  $\eta(P_2)$ . Коэффициент полезного действия показывает отношение полезной мощности к затраченной. При  $P_2=0$ , поэтому  $\eta=0$ . Форма кривой ККР будет зависеть от величины потерь. С увеличением  $P_2$  ток  $I_2$  и ход  $S$  будут расти. Но вначале  $I_2$  и  $S$  будут малыми. При значительных нагрузках величина потока будет увеличиваться, поэтому потери тоже будут расти, а кривая начнет склоняться вниз.

Электрохимические характеристики двигателя типа МСТ-0,25, определенные с помощью предложенного метода, приведены в табл. 2.

В рабочем режиме ротор двигателя вращается с частотой  $n_2$ , меньшей частоты  $n_1$  магнитного поля статора, которая вращается в том же направлении, что и ротор.

Таблиця 2

Снятие электромеханических характеристик стрелочного двигателя типа МСТ-0,25,  
 $n_1 = 1500 \text{ об / мин}$

$F$ , кгс	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$n$ , об/хв	$\cos \phi_1$	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$	$M = \frac{P_2 60}{2\pi n}$ , Н·м
100	190	-	-	-	-	-	-	-	-
	220	1	220	95	1450	0,71	0,43	0,033	0,6
	240	-	-	-	-	-	-	-	-
150	190	-	-	-	-	-	-	-	-
	220	1,1	242	132,6	1400	0,56	0,55	0,067	0,9
	240	-	-	-	-	-	-	-	-
250	190	-	-	-	-	-	-	-	-
	220	1,2	264	211,5	1350	0,4	0,8	0,133	1,49
	240	-	-	-	-	-	-	-	-

Поэтому магнитное поле, имеет большую частоту, скольжение относительно ротора будет изменяться с частотой равной разности частот поля и ротора, то есть  $n_s = n_1 - n_2$ .

Если ротор является неподвижным ( $n_2 = 0$ ), то скольжение равно  $S = 1$  или 100%. Чем больше частота вращения ротора, тем меньше скольжение.

В рабочем режиме асинхронного двигателя значение скольжения мало. В современных асинхронных двигателях течение при полной нагрузке составляет 2 ... 6%, то есть ротор вращается с частотой, незначительно отличающейся от частоты магнитного поля статора. У двигателей МСТ скольжение завышено и равно 18 %, что объясняется условиями работы.

Двигатель будет работать устойчиво с постоянной частотой вращения ротора при равновесии моментов, то есть если вращающий момент двигателя  $M$  будет равен тормозному моменту на его валу  $M_T$ , развиваемому приемником механической энергии. Итак, можно записать  $M = M_T$ . Любой нагрузке машины соответствует определенная частота вращения ротора  $n_2$  и определенный скольжение  $S$ .

Магнитное поле статора вращается относительно ротора с частотой  $n_s$  и индуцирует в его обмотке ЭДС, под действием которой по замкнутой обмотке ротора протекает ток  $I_2$ . Если нагрузка на валу машины увеличивается, то есть возрастает тормозной момент, то равновесие моментов будет нарушено, так как тормозной момент окажется больше, чем вращающий. Это приведет к уменьшению частоты вращения ротора, а следовательно, и к увеличению скольжения. С увеличением  $S$  магнитное поле статора будет пересекать проводники обмотки ротора чаще, ЭДС  $E_2$ , которая индуцируется в обмотке ротора, возрастет, а в результате увеличится как ток в роторе, так и крутящий момент, развиваемый двигателем. Течение и ток в роторе будут увеличиваться до значений, при которых вновь наступит равновесие моментов, то есть крутящий момент станет равным тормозному.

С уменьшением нагрузки на валу двигателя тормозной момент становится меньше вращающего, что приводит к увеличению частоты вращения ротора или к уменьшению  $S$ . В результате уменьшается ЭДС и ток в обмотке ротора, а, следовательно, и

крутящий момент, вновь становится равным тормозному моменту.

Пуск в ход двигателя, как уже отмечено выше, сопровождается значительным потреблением из сети электроэнергии, что в маломощных сетях может вызвать нежелательное для работы других приемников временное понижение напряжения (например, перекрытия сигналов светофоров на запрещающие). Поэтому применяются различные технические меры, которые снижают последствия такого явления. Например, увеличение активного сопротивления ротора, применение специальной конструкции короткозамкнутого ротора и прочее.

### Вывод

Таким образом, очевидно, что повысить уровень безопасности эксплуатации железнодорожных поездов невозможно без обеспечения надёжной работы одного из важнейших устройств железнодорожной автоматики и телемеханики – стрелочного электропривода.

Произведена оценка существующих типов электродвигателей стрелочных приводов и современных аналогов. Современными аналогами существующим типам моторов МСТ, ДП и МСП являются ДБУ и ЭМСУ. Двигатели типа ДБУ, ЭМСУ являются унифицированными, оборудованы микропроцессорной системой управления, которая предусматривает возможность обеспечения синхронной работы двух и более электроприводов (при двигателях ЭМСУ), что делает его перспективным для применения в стрелочных переводах скоростных дорог. Система управления двигателями ДБУ позволяет исключить фрикционную муфту в стрелочном электроприводе и минимизировать его размеры, за счет использования электронной систему управления. Однако, такие двигатели являются более дорогими и сложными в эксплуатации в сравнении с существующими типа МСП и МСТ, поскольку требуют для обслуживания специально обученный персонал.

Разработан метод определения параметров и рабочих и механических характеристик асинхронных трехфазных двигателей стрелочных приводов типа МСТ.

Было установлено, что с увеличением нагрузки на валу КПД асинхронного стрелочного двигателя увеличивается.

Коэффициент мощности ниже нормы ( $\cos\phi_{ном} = 0,9...1$ ). Это объясняется значительным реактивным сопротивлением обмоток и средоточие асинхронного двигателя.

Скорость вращения ротора уменьшается, что приводит к увеличению скольжения  $S$  асинхронной машины. Для двигателей типа МСТ номинальное значение скольжения составляет  $S_{ном} = 0,18$ . Поскольку нагрузка меньше номинальной, рассчитано по измеренным данным значение  $S$  остается ниже нормативного.

С увеличением нагрузки на валу ток  $I_1$ , мощность  $P_1$  и момент  $M$  увеличиваются в соответствии с теорией работы асинхронного двигателя.

### Библиографический список

1. Сапожников, Вл. В. Станционные системы автоматики и телемеханики [Текст] / Вл. В. Сапожников, Б. Н. Елкин, И. М. Кокурин и др. – М.: Транспорт, 1997. – 432 с.
2. Резников, Ю. М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / Ю. М. Резников. – М.: Транспорт, 1985. – 288 с.
3. Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування [Текст]. – Київ, 2006. – 433с.
4. Железнодорожный транспорт [Текст] // УНИАН. Транспорт. – 23.11.2006. – №168. – С. 5.
5. Ахмедзянов, Г. Г. Повышение надежности двигателей постоянного тока стрелочных электроприводов [Электронный ресурс] / Г. Г. Ахмедзянов // Журнале научных публикаций аспи-

- рантов и докторантов. –2012. – №10. – Курск: 2012. – Режим доступа: <http://jurnal.org/articles/2012/elect2.html>
6. Электродвигатели для стрелочных электроприводов и приводов автостопа [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://scbist.com/spravochnik/elektroprivod.htm>
7. Электродвигатель железнодорожный МСП-0,25 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://speztrade.ru/products/motors/msp/>
8. Принцип построения и особенности работы контрольной, управляющей и рабочей цепей пятипроводной схемы управления стрелочным электроприводом с двигателем переменного тока [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://edu.dvgsups.ru>
9. Москаленко, В. В. Электрический привод [Текст] / В. В. Москаленко. – М.: Высшая школа, 1991. – 226 с.
10. Дубинець, Л. В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини: [Текст] / Л. В. Дубинець, О. І. Момот, О. Л. Маренич – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
11. Пиотровский, Л. М. Электрические машины [Текст]/ Л. М. Пиотровский – М.–Л.:Госенргоиздат, 1963. – 504 с.
12. Электродвигатели переменного тока типа МСА (17529–00–00) ТУ 32 ЦШ 2093–2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geksar.ru>
13. Любшин, Д. А. Схема управления стрелкой с бесколлекторным управляемым электродвигателем [Текст]/ Д. А. Любшин, В. М. Руденко // Авто-матика, связь, информатика. –2007. – № 6 –С. 10 - 13.
14. Матвеева, О. Л. Современные электродвигатели для стрелочных приводов [Электронный ресурс]/ О. Л. Матвеева, Д. И. Селиванов // Актуальные вопросы технических наук: материалы II междунар. науч. конф. – Пермь: Меркурий, 2013. – С. 102-104. Режим доступа: <http://www.moluch.ru/conf/tech/archive/73/3219/>
15. Электродвигатель малогабаритный стрелочный универсальный (ЭМСУ). ТУ32 ЦШ 162.22–2009 (черт. 22381–00–00) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geksar.ru/>
16. Чечет, Ю. С. Управляемый асинхронный двигатель с полым ротором [Текст]/ Ю. С. Чечет. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. - 239 с.
17. Несговорова, Е. Д. Опытное определение параметров маломощных асинхронных двигателей [Текст]/ Е. Д. Несговрова // Электромеханика. – 1962. – №5.

**Ключові слова:** стрілочний привод, електродвигун постійного струму, асинхронний трифазний двигун, параметри двигуна, метод виміру.

**Ключевые слова:** стрелочный привод, электродвигатель постоянного тока, асинхронный трехфазный двигатель, параметры двигателя, метод измерения.

**Keywords:** switch point, d.c. motor, three-phase asynchronous motor, the motor parameters, the method of measurement.

Надійшла до редколегії 15.10.2013