

УДК 621.313.33:004

В. П. Беляев, М. Л. Марчик, Ю. Н. Ротайко

Белорусский государственный технологический университет

**БАЗА ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОТРЕМОНТИРОВАННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

В статье рассматривается построение алгоритма формирования базы данных электромеханических характеристик отремонтированных тяговых электродвигателей в среде *Mathcad*. Рассматриваемый тяговый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения типоразмера ДК263Б – основной электромеханический преобразователь, используемый в таком виде городского электротранспорта, как пассажирский трамвайный вагон. Он движется за счёт двух транспортных тележек, имеющих две пары ведущих колес, которые приводятся во вращение отдельными электродвигателями. Для синхронизации вращения колесных пар электромеханические моменты на их валах должны быть принципиально равными. Поэтому обмотки якорей, возбуждения, добавочных полюсов электродвигателей соединены последовательно и обтекаются общим током. Другими словами, электродвигатели должны обладать практически идентичными рабочими характеристиками, что в определенной степени гарантируется их промышленным изготовлением. Ремонтные работы по восстановлению электродвигателей, выполняемые специализированными подразделениями предприятий, не позволяют по разным причинам достичь упомянутой идентичности всех экземпляров электродвигателей. Рационально иметь базу данных электромеханических характеристик электродвигателей, позволяющую выбирать из неё электродвигатели с наиболее идентичными характеристиками. Она формируется программой, в которую вносятся N характеристик ($n = f(I)$), полученных при их испытании на стенде после ремонта. Программа проводит последовательное сопоставление полученных характеристик с зоной характеристик, в основу которой положена теоретическая характеристика двигателя последовательного возбуждения, принятая как эталонная. Размер зоны характеристик определяется инженерными допусками расхождения значений координат (n и I). В дальнейшем рассматриваются характеристики, расположившиеся в этой зоне. Второй этап тестирования состоит в выявлении характеристик, близлежащих по значениям координат для совместной работы.

Ключевые слова: электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, программа подбора электромеханических характеристик.

V. P. Belyaev, M. L. Marchik, Yu. N. Rotayko

Belarusian State Technological University

**DATABASE OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS
OF REPAIRED TRACTION MOTORS**

The article deals with the construction of algorithm of formation of database of the electromechanical characteristics of repaired traction motors in *Mathcad*. Considered traction motor of direct current of series excitation, standard size toporas-measure DK263B_main electromechanical converter used in this form of public transport as a passenger tramcar. It is propelled by two transport carriages, having two pairs of driven wheels rotated by separate motors. To synchronize the rotation of the wheel pairs of the electromechanical torques on their shafts shall be essentially equal. Therefore, armature winding, excitation, additional poles of the motors are connected in series. In other words, the motors have almost identical performance. Industrial production of electric motors to a certain extent guarantees the identity of the performance. Repair work on restoration of electric motors, performed by specialized units of the enterprises do not allow for a variety of reasons to achieve the above-mentioned identity of all instances of repaired electric motors. Rational to have a database of electromechanical characteristics of motors, allowing you to select the motor with the most identical characteristics. The database is created by the program, which include N -characteristics ($n = f(I)$), obtained from the test stand after repair. The software performs a sequential comparison of obtained characteristics with area characteristics, which is based on the theoretical response of the engine serial excitation, adopted as a reference. The size of the array is determined by engineering tolerances of the differences of coordinate values (n , I). Further discusses the characteristics, located in the area. The second stage of testing is to identify the characteristics most suitable for the coordinate values to work together.

Key words: the DC motor of independent excitation, the program selection of electromechanical characteristics.

Введение. Одним из представителей городского тягового электротранспорта является пассажирский трамвайный вагон. Он приводится в движение двумя транспортными тележками, каждая из которых имеет две пары ведущих колес [1]. Каждая пара колес расположена на одной оси, приводящейся во вращение через редуктор одним тяговым электродвигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Таким образом, на каждой транспортной тележке устанавливаются два электродвигателя [2]. Для создания синхронности вращения колесных пар от этих электродвигателей их якорные цепи соединены также последовательно. Такое конструктивное решение электромеханической системы электроподвижного состава предусматривает использование в ней электродвигателей, обладающих практически идентичными рабочими характеристиками. Под действием регулируемого источника напряжения по последовательно соединенным обмоткам возбуждения, добавочных полюсов и обмоткам якорей двух двигателей протекает общий ток, создающий электромеханические (электромагнитные в воздушном зазоре машин) моменты на их валах. Эти моменты через кинематику передаются на общую ось колесных пар. Колесные пары силой тяжести трамвайного вагона с помощью рельсового пути оказываются соединенными механически, т. е. в принципе должны иметь одну и ту же скорость вращения. Степень сцепления во многом обуславливается состоянием окружающей среды (дождь, снег, влажность, листва, различный мусор и т. п.). Указанные факторы существенно снижают силы трения (фрикционного сцепления) в зоне контакта колес с рельсами. Отличающиеся друг от друга механические характеристики при одном и том же значении тока в обмотках якорей двигателей предусматривают различие в значениях их скоростей, поэтому при уменьшенном из-за погодных условий сцеплении возможно проскальзывание одной колесной пары тяговой тележки относительно другой [3]. Особенно это явление будет наблюдаться при малых скоростях двигателя, поскольку в этой зоне имеется значительное расхождение характеристик [4].

Промышленное изготовление должно гарантировать идентичность рабочих характеристик всех выпускаемых электродвигателей. Однако ремонтные работы по восстановлению коллекторов, якорных обмоток, обмоток добавочных полюсов и обмоток возбуждения, выполняемые специализированными подразделениями предприятий, обслуживающих электроподвижной состав, не позволяют по разным причинам, в которые можно включить реальное качество ремонтного оборудования и квалифи-

кацию ремонтников, достичь упомянутой идентичности всех экземпляров отремонтированных электродвигателей [5]. Неидентичность рабочих характеристик приводит к тому, что при одном и том же общем токе, одинаковых значениях электромеханических моментов этих двигателей и одинаковой скорости вращения колесных пар из-за электрического равновесия их общей якорной цепи возникает неравенство напряжений, приложенных к якорной цепи каждого двигателя [6]:

$$U_{\text{пит сети}} = U_{\text{я1}} + U_{\text{я2}} = (E_{\text{я1}} + R_{\text{оя1}}I_{\text{я общ}}) + (E_{\text{я2}} + R_{\text{оя2}}I_{\text{я общ}}),$$

где $U_{\text{пит сети}}$ – напряжение на двух последовательно соединенных якорных цепях, В; $U_{\text{я}}$ ($U_{\text{я1}}$, $U_{\text{я2}}$) – напряжение на якорной цепи каждого двигателя, В; $R_{\text{оя}} = R_{\text{я}} + R_{\text{возб}} + R_{\text{доп}}$ ($R_{\text{оя1}}$, $R_{\text{оя2}}$) – активное сопротивление якорной цепи каждого двигателя, здесь $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление обмотки якоря, Ом; $R_{\text{возб}}$ – активное сопротивление обмотки последовательного возбуждения, Ом; $R_{\text{доп}}$ – активное сопротивление добавочных полюсов, Ом; $I_{\text{я общ}}$ – ток в цепи двух последовательно соединенных якорных обмоток, А; $E_{\text{я}}$ ($E_{\text{я1}}$, $E_{\text{я2}}$) = $nc_k k_f$ – ЭДС каждого двигателя; здесь n – частота вращения вала двигателя, мин^{-1} ; c_e – конструктивный коэффициент, характеризующий ЭДС двигателя; k_f – конструктивный коэффициент, характеризующий магнитный поток двигателя.

Неравенство указанных напряжений создается из-за возникшей разницы между ЭДС каждого двигателя и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки, а также из-за разницы падения напряжения на активных сопротивлениях обмоток возбуждения и добавочных полюсов. Разное падение напряжения приводит к перераспределению общего напряжения питающей сети, приложенного к якорным цепям электродвигателей. На одной якорной цепи напряжение увеличивается, на другой – уменьшается. Увеличение напряжения на якорной цепи в различных режимах нагрузки (токах) неблагоприятно сказывается на процессе коммутации этого двигателя [7].

Выше была обоснована целесообразность подбора наиболее подходящих друг другу механических характеристик. Весьма правильно было бы ввести различие характеристик по параметру скорости в пределах инженерной погрешности, например $\pm 5\%$. Электромеханическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения имеет гиперболический характер и описывается выражением

$$n = \frac{U_{\text{я}} - R_{\text{оя}}I_{\text{я}}}{c_e k_f I_{\text{я}}}.$$

Объектом исследования является тяговый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения типоразмера ДК263Б со следующими номинальными данными: режим работы – S2; мощность – $P_{\text{ном}} = 80$ кВт; напряжение питания – $U_{\text{я ном}} = 275$ В; частота вращения номинальная – $n_{\text{ном}} = 1900$ мин⁻¹; частота вращения максимальная – $n_{\text{max}} = 4060$ мин⁻¹; ток якоря – $I_{\text{ном}} = 330$ А; КПД – $\eta_{\text{ном}} = 88,5\%$, момент инерции якоря – $J_{\text{дв}} = 24,27$ кг·м² [8]. Его естественная электромеханическая характеристика, рассчитанная аналитическим способом при температуре газообразной охлаждающей среды 20°C, приведена на рис. 1. После ремонта проводятся испытания двигателя, в том числе снимается электромеханическая характеристика $n = f(I)$.

Для создания базы данных указанных двигателей целесообразно иметь их характеристики в матричном виде ($N \times 2$, где N – количество точек характеристики, снятых при испытаниях двигателя), вносящиеся в программу, созданную в среде *Mathcad* (рис. 2) [9, 10]. Кроме этого, в программу вводятся номинальные данные нового двигателя завода-изготовителя, принимаемого за эталонный, с характеристикой которого проводятся сравнения характеристик отремонтированных двигателей. Для этого создаётся массив токов $I_{\text{я}}$ (рис. 3) и вычисляется эталонная характеристика и зона предполагаемого

расположения характеристик отремонтированных двигателей (рис. 1). На рис. 2–7 приведены фрагменты программы, выполняющие предписанный алгоритм создания базы механических характеристик. Первым шагом выполняется определение принадлежности любой характеристики области, которой они должны соответствовать.

Этим занимается часть программы, изображенная на рис. 3. При отладке программы были произвольно заданы координаты характеристик в количестве пяти штук (рис. 4). На нём пунктиром выделены предположительно несоответствующие значения координат скорости, расположенные во втором столбце. Результат работы программы выведен на рис. 5. Финальным шагом является выявление характеристик, наиболее близлежащих друг к другу. Это вычисляется фрагментом программы, представленной на рис. 7. Вывод поиска близлежащих характеристик выполнен табличным видом для всех характеристик, а две наиболее близлежащие обозначаются их номерами (рис. 6). Для подтверждения некоторой универсальности программы были заложены некорректные отклонения в двух из пяти наладочных характеристиках. Выведенный текстовый результат анализа массивов пяти электромеханических характеристик подтвердил это (рис. 8).

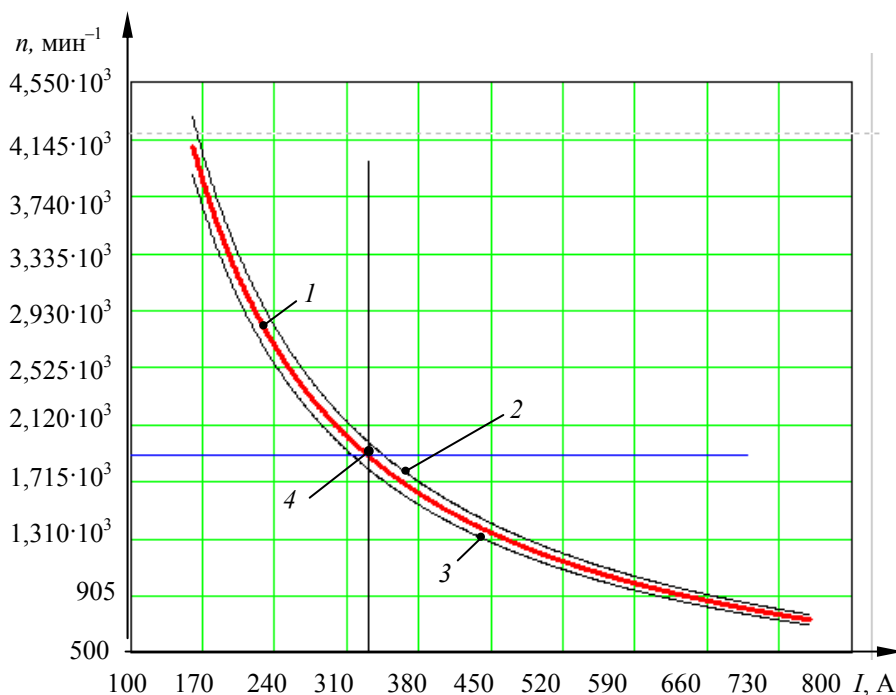


Рис. 1. Электромеханические характеристики двигателя ДК263Б:

- I – естественная характеристика;
- 2 – характеристика, соответствующая питающему напряжению $U_{\text{я}} = 1,05U_{\text{ном}}$;
- 3 – характеристика, соответствующая питающему напряжению $U_{\text{я}} = 0,95U_{\text{ном}}$;
- 4 – точка, соответствующая номинальным току и скорости

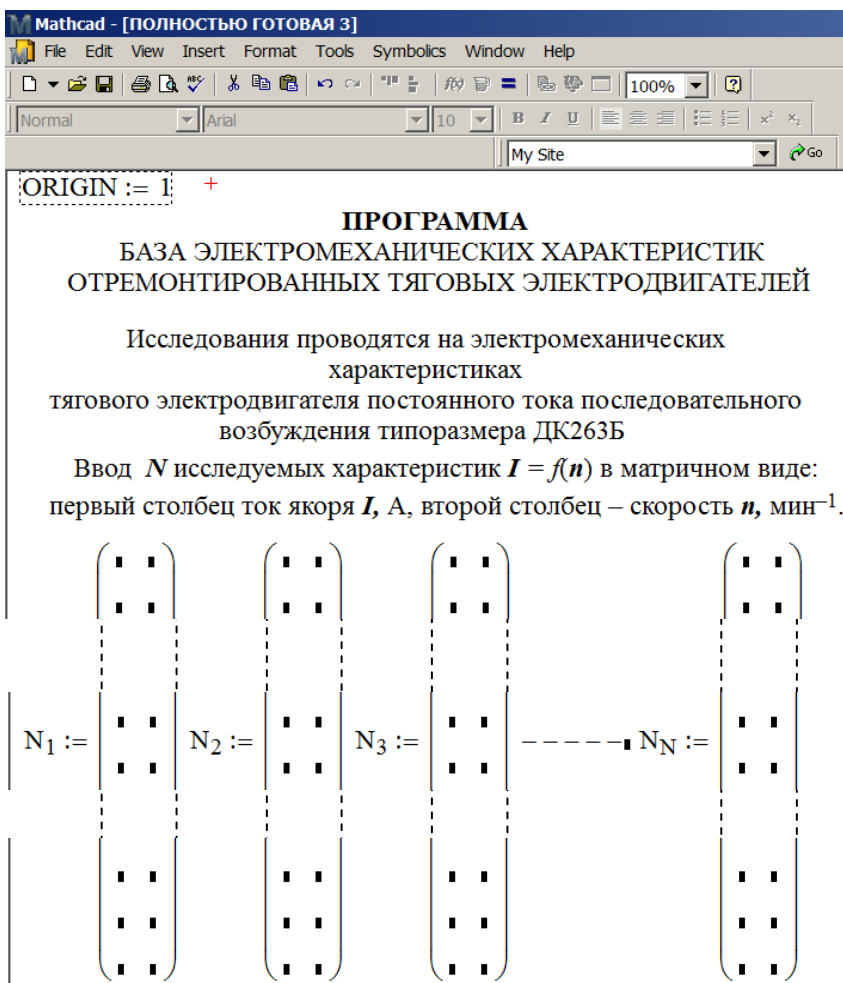


Рис. 2. Начало программы

ПРОГРАММА
 определения расположения хотя бы одной из N внутренних координат кривой в пределах 5%-ной зоны от эталонной кривой.
 Если хотя бы одна из точек N не лежит в пределах этой зоны, то этой кривой присваивается значение "не лежит", а иначе – "лежит".

```

Π := | for i ∈ 1..rows(N)
      |   for j ∈ 1..rows(Ni)
      |     Li ← i
      |     Ti ← | "лежит" if n2[(Ni)j,1] ≤ (Ni)j,2 ≤ n1[(Ni)j,1]
      |           | otherwise
      |           | Ti ← "не лежит"
      |           | break
      |     return ( L )
      |           ( T )
    
```

Проверка := augment(Π₁, Π₂)

Рис. 3. Фрагмент программы определения места нахождения характеристики

ПРОГРАММА
 проверки расположения исследуемых характеристик в указанной зоне

$N_1 :=$	$N_2 :=$	$N_3 :=$	$N_4 :=$	$N_5 :=$	$\left(\begin{matrix} 160 & 4.085 \cdot 10^3 \\ 161 & 4.059 \cdot 10^3 \\ 162 & 4.033 \cdot 10^3 \\ 163 & 4.007 \cdot 10^3 \\ 164 & 3.981 \cdot 10^3 \\ 165 & 3.956 \cdot 10^3 \\ 166 & 3.931 \cdot 10^3 \\ 167 & 3.907 \cdot 10^3 \\ 168 & 3.882 \cdot 10^3 \\ 169 & 3.858 \cdot 10^3 \\ 170 & 3.835 \cdot 10^3 \\ 171 & 3.811 \cdot 10^3 \\ 172 & 3.788 \cdot 10^3 \\ 173 & 3.765 \cdot 10^3 \\ 174 & 3.743 \cdot 10^3 \end{matrix} \right)$	$\left(\begin{matrix} 160 & 4.075 \cdot 10^3 \\ 161 & 4.049 \cdot 10^3 \\ 162 & 4.023 \cdot 10^3 \\ 163 & 4.000 \cdot 10^3 \\ 164 & 3.961 \cdot 10^3 \\ 165 & 3.946 \cdot 10^3 \\ 166 & 3.911 \cdot 10^3 \\ 167 & 3.890 \cdot 10^3 \\ 168 & 3.862 \cdot 10^3 \\ 169 & 3.848 \cdot 10^3 \\ 170 & 3.825 \cdot 10^3 \\ 171 & 3.801 \cdot 10^3 \\ 172 & 3.768 \cdot 10^3 \\ 173 & 3.765 \cdot 10^3 \\ 174 & 3.733 \cdot 10^3 \end{matrix} \right)$	$\left(\begin{matrix} 160 & 4.075 \cdot 10^3 \\ 161 & 4.049 \cdot 10^3 \\ 162 & 4.023 \cdot 10^3 \\ 163 & 4.000 \cdot 10^3 \\ 164 & 3.971 \cdot 10^3 \\ 165 & 3.946 \cdot 10^3 \\ 166 & 3.921 \cdot 10^3 \\ 167 & 3.900 \cdot 10^3 \\ 168 & 3.872 \cdot 10^3 \\ 169 & 3.848 \cdot 10^3 \\ 170 & 3.825 \cdot 10^3 \\ 171 & 3.801 \cdot 10^3 \\ 172 & 3.778 \cdot 10^3 \\ 173 & 3.755 \cdot 10^3 \\ 174 & 3.733 \cdot 10^3 \end{matrix} \right)$	$\left(\begin{matrix} 160 & 4.064 \cdot 10^3 \\ 161 & 4.051 \cdot 10^3 \\ 162 & 4.032 \cdot 10^3 \\ 163 & 4.010 \cdot 10^3 \\ 164 & 3.981 \cdot 10^3 \\ 165 & 3.956 \cdot 10^3 \\ 166 & 3.931 \cdot 10^3 \\ 167 & 3.890 \cdot 10^3 \\ 168 & 3.872 \cdot 10^3 \\ 169 & 3.858 \cdot 10^3 \\ 170 & 3.825 \cdot 10^3 \\ 171 & 3.801 \cdot 10^3 \\ 172 & 3.788 \cdot 10^3 \\ 173 & 3.755 \cdot 10^3 \\ 174 & 3.733 \cdot 10^3 \end{matrix} \right)$	$\left(\begin{matrix} 160 & 4.071 \cdot 10^3 \\ 161 & 4.048 \cdot 10^3 \\ 162 & 4.022 \cdot 10^3 \\ 163 & 4.000 \cdot 10^3 \\ 164 & 4.198 \cdot 10^3 \\ 165 & 4.245 \cdot 10^3 \\ 166 & 3.920 \cdot 10^3 \\ 167 & 3.900 \cdot 10^3 \\ 168 & 3.870 \cdot 10^3 \\ 169 & 3.846 \cdot 10^3 \\ 170 & 3.823 \cdot 10^3 \\ 171 & 3.801 \cdot 10^3 \\ 172 & 3.776 \cdot 10^3 \\ 173 & 3.752 \cdot 10^3 \\ 174 & 3.731 \cdot 10^3 \end{matrix} \right)$
----------	----------	----------	----------	----------	---	---	---	---	---

Рис. 4. Фрагмент программы численного задания характеристик для проверки её работоспособности

Проверка := augment(Π_1, Π_2) Результат, показывающий какие N лежат и не лежат в указанной зоне по номерам в столбце слева	$\left(\begin{matrix} 1 & \text{"лежит"} \\ 2 & \text{"лежит"} \\ 3 & \text{"лежит"} \\ 4 & \text{"лежит"} \\ 5 & \text{"не лежит"} \end{matrix} \right)$
---	--

Рис. 5. Фрагмент программы определения места нахождения характеристики

ПРОГРАММА
 нахождения минимальных значений по модулю из всех отклонений и вывода на выходе ответа в виде двух чисел, соответствующих номерам характеристик. Нахождение наиболее близких характеристик.

$N :=$ <pre> (return "Характеристик нет") if Отклонение = 0 for i ∈ 1..cols(Отклонение) $T_i \leftarrow \sum \text{Отклонение}^{(i)}$ Min ← match(min(T), T) for j ∈ 1..rows(Min) $L_j \leftarrow \text{INF}_{1, \text{Min}_j}$ L </pre>	$N = (\text{"2-3"})$ номера похожих характеристик
--	---

Рис. 6. Фрагмент программы вывода результатов поиска двух близлежащих характеристик

```

ПРОГРАММА
нахождения разности значений по координате токов в значениях всех
N характеристик, лежащих в допустимых значениях, путём вычитания
значений из соответствующих N всех остальных N.

Например, от 1-й вычитается сначала 2-я, потом 3-я и так далее,
затем вычитается 3-я, потом 4-я и так далее.
Программа не вычитает друг от друга одно и то же,
т. е., от 1-й отняв 2-ю, она не будет отнимать от 2-й 1-ю.

Δ := | PLVK ← Π2
      | i ← 1
      | k ← 1
      | for m1 ∈ 1..rows(N) - 1
      |   | for m2 ∈ i + 1..rows(N)
      |   |   | for y ∈ 1..rows(N1)
      |   |   |   | Δy,k ← |(Nm1)y,2 - (Nm2)y,2|
      |   |   |   | INF1,k ← concat(num2str(m1), "-", num2str(m2))
      |   |   |   | k ← k + 1 if PLVKm1 = "лежит" ∧ PLVKm2 = "лежит"
      |   |   | i ← i + 1
      |   | (INF)
      |   | (Δ)
      | +
INF := Δ1 Отклонение := Δ2
Отклонение_N_друг_от_друга := stack(INF, Отклонение)
    
```

Рис. 7. Фрагмент программы поиска двух близлежащих характеристик

<table border="1"> <tr><td>164</td><td>3.981·10³</td></tr> <tr><td>165</td><td>3.956·10³</td></tr> <tr><td>166</td><td>4.251·10³</td></tr> <tr><td>167</td><td>3.907·10³</td></tr> </table>		164	3.981·10 ³	165	3.956·10 ³	166	4.251·10 ³	167	3.907·10 ³	<table border="1"> <tr><td>164</td><td>164</td><td>3.970·10³</td></tr> <tr><td>165</td><td>165</td><td>4.245·10³</td></tr> <tr><td>166</td><td>166</td><td>3.920·10³</td></tr> <tr><td>167</td><td>167</td><td>3.900·10³</td></tr> </table>	164	164	3.970·10 ³	165	165	4.245·10 ³	166	166	3.920·10 ³	167	167	3.900·10 ³	Проверка := augment(Π ₁ , Π ₂)
164	3.981·10 ³																						
165	3.956·10 ³																						
166	4.251·10 ³																						
167	3.907·10 ³																						
164	164	3.970·10 ³																					
165	165	4.245·10 ³																					
166	166	3.920·10 ³																					
167	167	3.900·10 ³																					
N ₁ :=		N ₂ :=	N ₅ :=	Проверка = <table border="1"> <tr><td>1</td><td>"не лежит"</td></tr> <tr><td>2</td><td>"лежит"</td></tr> <tr><td>3</td><td>"лежит"</td></tr> <tr><td>4</td><td>"лежит"</td></tr> <tr><td>5</td><td>"не лежит"</td></tr> </table>	1	"не лежит"	2	"лежит"	3	"лежит"	4	"лежит"	5	"не лежит"									
1	"не лежит"																						
2	"лежит"																						
3	"лежит"																						
4	"лежит"																						
5	"не лежит"																						

Рис. 8. Фрагмент проверки определения места нахождения характеристики

Заключение. Разработанная программа формирует базу данных электромеханических характеристик, позволяет проводить выбор пары двигателей наиболее близлежащими электромеханическими характеристиками для установки их на тяговую тележку. Алгоритм программы

рассчитывает эталонную характеристику, имеет возможность работать с большим по численности количеством характеристик, устанавливать необходимую точность подбора характеристик, имеет вывод результатов в графическом и текстовом виде.

Литература

1. Ветров Ю. Н., Приставко М. В. Конструкция тягового подвижного состава. М.: Желдориздат. 2000. 316 с.
2. Руководство по эксплуатации трамвайного вагона АКМ-60102. Минск: Белкоммунмаш, 2010. 103 с.
3. Эксплуатация и ремонт трамваев и троллейбусов. URL: <http://www.ga-avto.ru/tramvaj/1/html> (дата обращения: 22.03.2017).
4. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
5. Устройство и ремонт электропоездов метрополитена: учеб. для ПТУ / Э. А. Сементовский [и др.]; под ред. Э. А. Сементовского. М.: Транспорт, 1991. 335 с.

6. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины: учеб. для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1991. 343 с.
7. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Теория электропривода: учеб. для вузов. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 496 с.
8. Электротехнический справочник: в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова, А. Ф. Дьякова, А. И. Попова. М.: МЭИ, 2004. Т. 4: Использование электрической энергии. 696 с.
9. Программирование в среде MathCAD: учеб.-метод. пособие для бакалавров инженерных и физических специальностей / сост. В. К. Толстых. Донецк: ДонНУ, 2010. 128 с.
10. Основы вычислений и программирования в пакете MathCAD: учеб. пособие / Ю. Е. Воскобойников [и др.]; под ред. Ю. Е. Воскобойникова; Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2012. 212 с.

References

1. Vetrov Yu. N., Pristavko M. V. *Konstruktsiya tyagovogo podvizhnogo sostava* [Design of the traction rolling stock]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2000. 316 p.
2. *Rukovodstvo po ekspluatatsii tramvaynogo vagona AKSM-60102* [Operation manual on the tram car]. Minsk, Belkommunmash Publ., 2010. 103 p.
3. *Ekspluatatsiya i remont tramvaev i trolleybusov* [Operation and repair of trams and trolleybuses]. Available at: <http://www.ga-avto.ru/tramvaj/1/html> (accessed 22.03.2017).
4. Voldek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* [Electrical machines. Introduction to electromechanics. Cars of a direct current and transformers]. Sant Petersburg Publ., 2008. 320 p.
5. Sementovskiy E. A., Bogdanov A. A., Gusev V. S., Mogilner Yu. Ya. *Ustroystvo i remont elektro-poezdov metropolitena* [Device and repair of electric trains of the subway]. Moscow, Transport Publ., 1991. 335 p.
6. Zakharchenko D. D., Rotanov N. A. *Tyagovye elektricheskiye mashiny* [Traction electrical machines] Moscow, Transport Publ., 1991. 343 p.
7. Kovchin S. A., Sabinin Yu. A. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of the electric drive]. Sant Petersburg Publ., Energoatomizdat, 2000. 496 p.
8. Gerasimov V. G., D'yakov A. F., Popov A. I. *Elektrotekhnicheskii spravochnik: v 4 tomakh. Tom 4: Ispolzovaniye elektricheskoy energii* [Electrotechnical reference book: in 4 vol. Vol. 4: Use of electric energy]. Moscow, MEI Publ., 2004. 696 p.
9. Tolstykh V. K. *Programirovaniye v srede MathCAD* [Programming in the environment of MathCAD]. Donezk: DonNU Publ., 2010. 128 p.
10. Voskoboynikov Yu. E., Zadorozhny A. F., Litvinov L. A., Cherny Yu. G. *Osnovy vychisleniy i programirovaniya v pakete MathCAD* [Bases of calculations and programming in the MATHCAD package]. Novosibirsk, NGASU Publ. (Sibstrin), 2012. 212 p.

Информация об авторах

Беляев Валерий Павлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Beliaev@belstu.by

Марчик Максим Леонидович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: MM2017k@tut.by

Ратайко Юлия Николаевна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: YulRat@tut.by

Information about the authors

Belyaev Valeri Pavlovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Editing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Beliaev@belstu.by

Marchik Maksim Leonidovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: MM2017k@tut.by

Ratayko Yuliya Nikolayevna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: YulRat@tut.by

Поступила 17.06.2017