

УДК 629.4.053;629.423

M.S.YAKUBOV, J.S.FAYZULLAYEV

**INFORMATION MATHEMATICAL MODEL OF DIAGNOSING OF THE OPERATIONAL
MODE OF THE TRACTIVE ELECTROMOTOR**

Тортувчи электр двигателнинг элементлари ва қисмларини носозлиги билан белгиланадиган, статорнинг амплитудали модуланган токи спектрларини таҳлил қилиш асосида двигатель иш режимларини таъхислашнинг ахборот-математик модели тузилган. Оптимал филтер параметрлари статор токининг максимал сигнал/шовқин нисбатини максимуми мезонига кўра аниқланган бўлиб, улар бўйича объектнинг техник ҳолатларини идентификациялаш мумкин. Статор токининг спектрал таъхил этувчиларининг таҳлили асосида тортувчи электр двигателнинг техник ҳолатлари натижаларини таъхислаш, ишлов бериш ва таҳлил қилиш, ўлчанадиган параметрлар тўплами бўйича фойдаланиш ишончлилигини кўллаб-қувватлаш ҳақидаги техник қарорларни қабул қилиш ишончлилигини ошириш ҳамда техник ҳолатлар тадрижини ўрганиш, шунингдек сабабсиз ишдан чиқишлар эҳтимолини камайтириш имконини беради.

Таянч сўзлар: тортувчи электр двигатели, ахборот-математик модель, техник таъхислаш, сабабсиз ишдан чиқариш.

Составлена информационно-математическая модель диагностирования эксплуатационного режима тягового электродвигателя на основе анализа спектров амплитудно модулированного тока статора, обусловленного неисправностями его элементов и узлов. Определены параметры оптимального фильтра по критерию максимума отношения сигнал/шум тока статора, по которому можно идентифицировать техническое состояние объекта. Показано, что диагностика, обработка и анализ результатов технического состояния тягового электродвигателя на основе анализа спектральных составляющих тока статора позволяют по совокупности измеряемых параметров повысить достоверность принимаемого технического решения о поддержании эксплуатационной надежности и изучить эволюцию технического состояния, а также уменьшить вероятность необоснованного вывода из эксплуатации.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, информационно-математическая модель, техническая диагностика, необоснованный вывод из эксплуатации.

Information mathematical model of diagnosing of the operational mode of the tractive electromotor on the basis of the analysis of ranges of amplitude-modulated current of the stator caused by failure of its elements and nodes is made. Parameters of the optimum filter are determined by criterion of a maximum of the relation signal/noise of current of the stator on which it is possible to identify technical condition of an object. It is shown that diagnostics, processing and the analysis of results of technical condition of the tractive electromotor on the basis of the analysis of spectral components of current of the stator allow on set of the measured parameters will increase reliability of the made technical solution about maintenance of operational reliability and to study evolution of technical condition and also to reduce probability of an unreasonable output from maintenance.

Keywords: tractive electromotor, information-mathematical model, technical diagnostics, unreasonable output from maintenance.

На сегодняшний день сохраняется жесткая зависимость качества движения электроподвижного состава от работы его тягового электродвигателя. Анализ характера причин повреждений и режимов работы электрооборудования электровозов при выходе из строя электропривода, в частности тягового асинхронного электродвигателя (ТАД) показал, что основная часть его повреждений и сбоев происходит из-за витковых коротких замыканий фазных

обмоток, статического и динамического эксцентритета ротора относительно статора, повреждений стержней ротора и его смещение относительно оси вращения, аварийных процессах тиристорных преобразователей в результате запираания ветвей тиристоров, приводящих к образованию высших гармонических составляющих тока и напряжений, износа роликовых подшипников, приводящих к поперечным и профильным колебаниям его наружного кольца [1,2,3,4,5,9]. В соответствии с вышеуказанным актуальной проблемой является функциональное диагностирование технического состояния тягового электропривода электровозов.

Совершенствование элементной базы и применение микропроцессорных технологий расширяет возможности практической реализации создания алгоритмов на основе комбинированного диагностирования с целью получения более точных результатов о техническом состоянии (ТАД) [1,2,3,4,5,7,8].

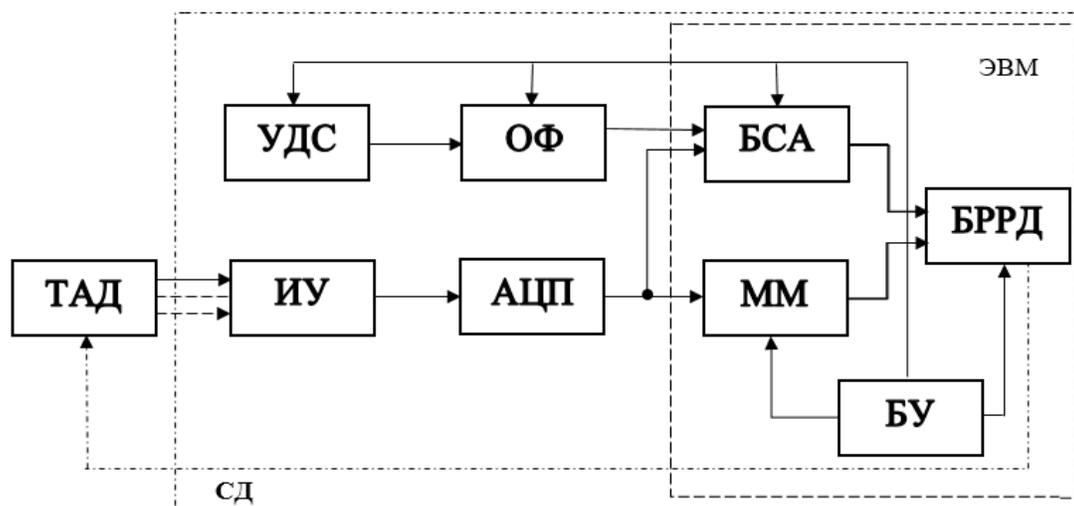


Рис.1. Блок-схема функционального диагностирования ТАД.

ОФ-оптимальный фильтр; УДС-усилитель диагностируемого сигнала; ИУ-измерительные устройства; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ММ-математическая модель на ЭВМ; БСА-блок спектрального анализа; БРРД-блок расшифровки результатов диагностирования; БУ-блок управления.

К сожалению, в доступных источниках не приводятся рабочий частотный диапазон анализатора и гармонических составляющих электрических и механических величин, диапазон измерений в децибелах и самое главное, математическая обработка уровня отдельных гармоник в реальном масштабе времени с учетом того, что периодический детерминированный полезный сигнал статистического анализа, характеризующий неисправность элементов ТАД, аддитивно смешан на практике со стационарным белым шумом с минимальным отношением сигнал/шум, а также не определены структура и параметры измерительных и диагностических устройств и алгоритмы расшифровки результатов диагностирования с использованием ЭВМ.

В данной работе делается попытка устранения указанных недостатков. Наличие в спектре тока статора ТАД характерных частот определенной величины является наиболее информативным диагностическим параметром и свидетельствует о наличии повреждений его электрической или механической частей и связанных с ними других исполнительных механизмов.

На рис.1. приведена блок-схема функционального диагностирования ТАД с его рабочим алгоритмом, выбираемого из условий эффективной организации процесса диагностирования с применением ЭВМ.

В качестве датчика тока обмотки статора применяются измерительные шунты и датчики Холла. Наиболее предпочтительным для измерения тока статора ТАД, по нашему мнению, является магнитооптический датчик, собственно датчик фирмы Airak, измеряемый диапазон которого по току составляет 0,003 – 30 кА, частотная полоса 5 – 5000 Гц. С выхода датчика, воспроизведенная кривая через усилитель переменного тока должен подаваться на частотный анализатор гармоник, например, типа 2031 фирмы Bruel Kjaev, работа которого основана на быстром преобразовании Фурье в реальном масштабе времени на частотах до 2 кГц [6]. Длительность записи тока необходимо осуществлять в течении времени, необходимый для спектрального анализа по частоте не менее 0,01 – 0,03 Гц.

В аспекте спектрального анализа непрерывной диагностики ТАД задача состоит в нахождении закона и распределения выходной величины (потребляемого тока по известному закону распределения входной величины) и априорным данным цели, или говоря языком статистики, прохождения стационарных или нестационарных случайных сигналов через линейную цепь.

Задача формулируется следующим образом. На вход линейной системы с обобщенной комплексной передаточной функцией $K_0(j\omega)$ подается при $t = \infty$ стационарный случайный сигнал, математическое ожидание $m(t)$, дисперсия $\sigma_x^2(t)$ и корреляционная функция $B_1(\tau)$ которого считаются известными, нужно найти корреляционную функцию $B_2(\tau)$ и математическое ожидание случайной функции на выходе цепи [7,8].

Пусть на потребляемый ток двигателя действует смесь некоррелированных между собой периодический детерминированный сигнала $s(t)$, возникающего вследствие повреждений электрической или механической части ТАД и помехи $n(t)$

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

Рассмотрим пример, когда сигнал $s(t)$ возникает, например, из-за статического или динамического эксцентритета ротора относительно статора, т.е. когда расстояние между длиной расточки статора и ротора не равно по всей окружности и вследствие этого изменяется магнитный поток внутри воздушного зазора, приводящего к характерному модулируемому по амплитуде тока статора:

$$x(t) = s(1 + M_{am} \sin(\Omega t) \cos(\omega_0 t + M_{\phi_m} + \varphi) + n(t), \quad (2)$$

где S – амплитуда модулируемого сигнала; n – скорость вращения ротора; M_{am} – глубина модуляции, $\Omega = n/60$ (об/с) – частота модуляции; ω_0 – угловая частота напряжения питания двигателя, φ – начальный угол сдвига; $n(t)$ – случайная функция, имеющая нормальный закон распределения со средним значением $m_{1n}(t)$ и дисперсией $\sigma_n^2(t)$.

Для диагностического анализа необходимо найти по (2) математическое ожидание $m_{1x}(t)$, дисперсию выходного процесса $\sigma_x^2(t)$, а также записать закон распределения спектральной плотности вероятности $w_x(t)$.

Очевидно, что

$$m_{1x}(t) = m_{1n}(t) + s[1 + M_{am} \sin \Omega t] \cos(\omega_0 t) + M_{\phi_m} \lambda(t) + \varphi, \quad (3)$$

$$\sigma_x^2(t) = \sigma_n^2(t) + D_s = \sigma_n^2(t). \quad (4)$$

Учитывая, что спектральная функция содержит информацию об определенных соотношениях между амплитудами и фазами колебаний разных частот и имея в виду [7]

$$W_n(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n(t)}} \cdot \exp\left[-\frac{[n - m_{1n}(t)]^2}{2\sigma_n^2(t)}\right]$$

для суммы $x(t)$ получим следующее

$$W_x(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n(t)}} \cdot \exp\left[-\frac{\{x - [m_{1n}(t) + S(1 + M_{am})\sin(\Omega t)\cos(\omega_0) + M_{\phi m}\lambda(e) + \varphi]\}^2}{2\sigma_n^2(t)}\right] \quad (5)$$

Преобразуя выражение (5) в ряд и учитывая, что интенсивность спектральных составляющих определяется спектральной плотностью $F(j\omega)$, вычисляемых по формуле прямого преобразования Фурье $F(j\omega) \int_{-\infty}^{\infty} W_x(x,t)e^{-j\omega t} dt$ для каждого члена ряда, получим:

$$F(\omega) = \frac{\sigma_\lambda^2}{\alpha} e^{-\sigma_\phi^2} \left\{ \sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + D_\varphi)}{n![(n + D_\varphi)^2 + \Omega^2]} + (1 - 2\sigma_\phi^2) \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + 1 + D_\varphi)}{n![(n + 1 + D_\varphi)^2 + \Omega^2]} + \sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + 2 + D_\varphi)}{n![(n + 2 + D_\varphi)^2 + \Omega^2]} \right\} \quad (6)$$

где $\sigma_\lambda^2 = \sigma_\phi^2 M_{am}^2 \sigma_\phi^2 = \sigma_\lambda^2 M_{\phi m}^2$; $D_{cp} = \frac{1}{4\alpha} N_\varphi$; N_φ – фазовая флуктуация; $M_{am}, M_{\phi m}$ – соответственно глубина амплитудной и фазовой модуляции; $\Omega = (\omega - \omega_0)/\alpha, \omega > 0$. α – независимая случайная величина с нулевым математическим ожиданием $m_\alpha = 0$ и дисперсией $D_\alpha = \sigma^2$.

Экспериментальные исследования были проведены на трехфазном асинхронном электродвигателе типа 1ТВ262-ОГА02 [2]. Графики функции $F(\omega)$ с использованием параметров этого ТАД при наличии эксцентритета ротора приведены на рис.2.

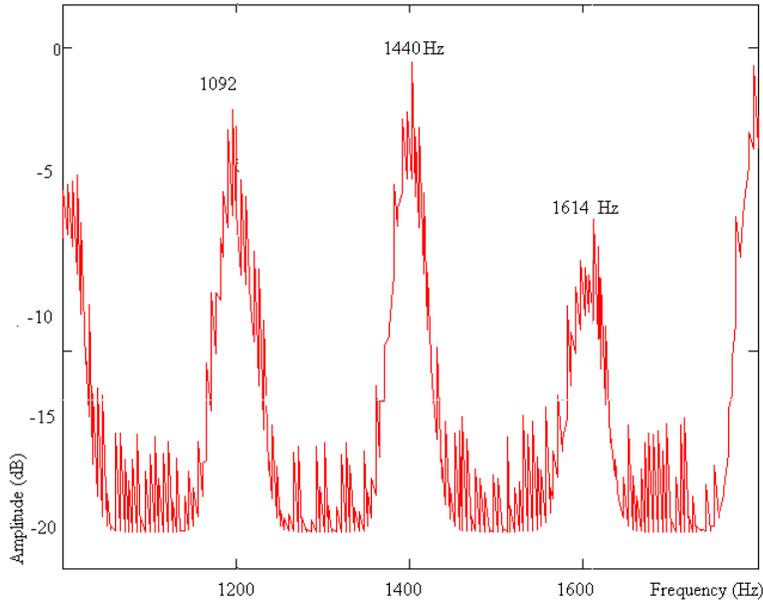


Рис.2. Спектр тока ТАД при наличии эксцентритета.

Например, при повреждении стержней ротора или части кольца беличей клетки ТАД, ток статора будет модулирован по амплитуде с частотой скольжения s . Это модуляция увеличивается в случае наличия повреждений ротора. Полученный интегральным преобразованием Фурье спектр модулированного тока статора по амплитуде с повреждением разного числа стержней ротора приведен на рис.3, из которого видно, что обрыв стержней сопровождается появлением у основной гармоники боковых составляющих с двойной частотой скольжения.

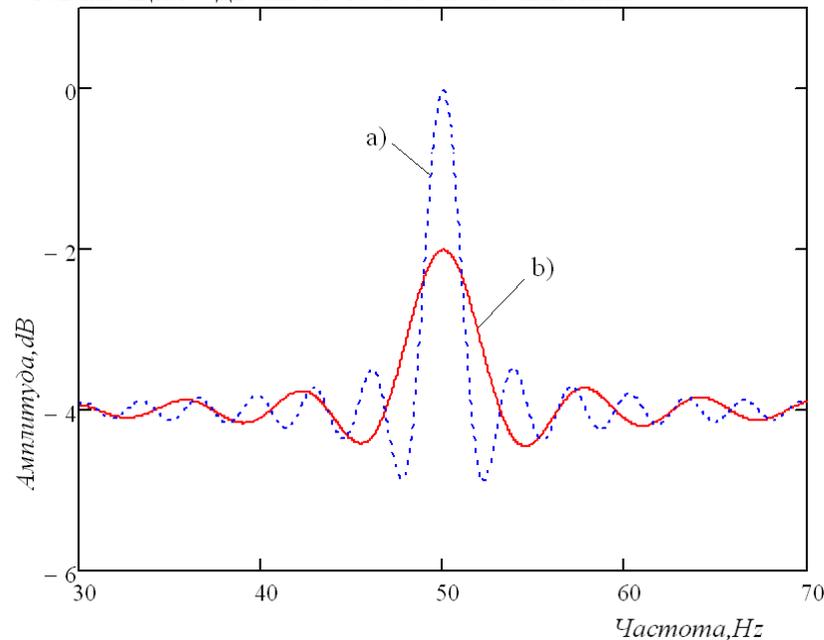


Рис.3. Спектр тока при повреждении (а) четырех и (б) шести стержней ротора ТАД.

Из-за наличия шума и количественно-качественных характеристик детерминированного сигнала, определяющего состояние отказавшего элемента ТАД, оценка его реализации не совпадает с истинной реализацией. Поэтому необходимо определить параметры оптимального фильтра по критерию максимума отношения сигнал/шум на его выходе, по которому можно идентифицировать то или иное состояние ТАД. В качестве примера рассмотрим случай когда входящий сигнал имеет составляющую в виде случайного процесса $n(t)$, представляющую собой стационарный гауссовский белый шум со спектром плотности $S_n(\omega) = N_0/2, -\infty < \omega < \infty$. Комплексная частотная характеристика фильтра, максимизирующего отношение сигнал/шум на его выходе, можно описать в виде [8]

$$K_0(j\omega) = kI(j\omega) * e^{-(j\omega)T}, \quad (7)$$

где k – некоторая постоянная; $I(j\omega) *$ – функция комплексно-сопряженная со спектром $I(j\omega)$, например, периодического входного сигнала $i(t) = I_m \sin \omega t$ при $0 \leq t \leq t_u$, к которому можно эквивалентировать любую несинусоидальную величину, возникающего из-за дефекта какого-либо элемента двигателя, спектр которого выражается в свою очередь в виде:

$$I(j\omega) * = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{K_0}{2} \cdot \frac{I_m \cdot \frac{\pi t_u}{2} \cos \frac{\omega t_u}{2}}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(\frac{\omega t_u}{2}\right)^2} e^{-j \frac{\omega t_u}{2}} \quad (8)$$

Если интервал наблюдения совпадает с длительностью импульса, т.е. $T = \tau_u$, то

$$I(j\omega) = \frac{I_m \cdot \frac{\pi t_u}{2} \cos \frac{\omega t_u}{2}}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(\frac{\omega t_u}{2}\right)^2} (1 - e^{-j\frac{\omega t_u}{2}}). \quad (9)$$

Структурная схема вышеуказанного оптимального фильтра представлено на рис.4

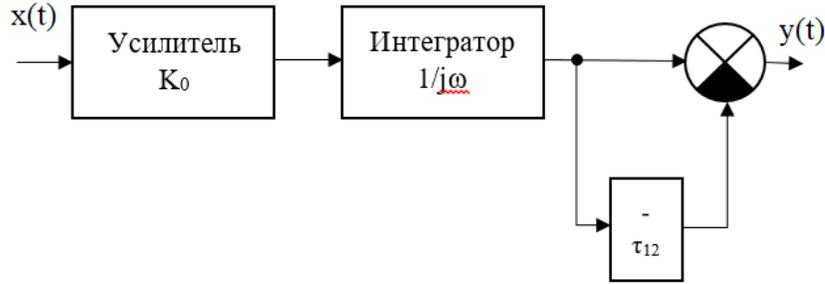


Рис.4. Структурная схема оптимального фильтра.

Определим сигнал на выходе фильтра, имея в виду что его импульсная характеристика имеет вид [9]:

$$h_0(t) = K_0 S(T - t) = K_0 S(\tau_u - t). \quad (10)$$

Следовательно,2

$$S_{\text{вых}}(t) = \int_0^t h_0(\tau) S(t - \tau) d\tau = K_0 \int_0^2 S(\tau_u - \tau) S(t - \tau) d\tau. \quad (11)$$

Максимальное значение $[S_{\text{вых}}(t)]_{\text{max}}$, найденное из условия $\frac{dS_{\text{вых}}(t)}{dt} = 0$ имеет место при $t = \tau_u$ и равно $[S_{\text{вых}}(t)]_{\text{max}} = K_0 E$, где E – энергия сигнала $S(t)$.

Дисперсия на выходе оптимального фильтра:

$$D_{\text{вых}} = \sigma_{\text{вых}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_n(\omega) |K_0(j\omega)|^2 d\omega. \quad (12)$$

Следовательно максимальное отношение сигнал/шум:

$$a = \frac{[S_{\text{вых}}(t)]_{\text{max}}}{\sigma_{\text{вых}}} = \frac{K_0 E}{\sqrt{K_0^2 N_0 E}} = \sqrt{2N_0 E} \quad (13)$$

Выражения (6), (7) и (13) с практической точки зрения дают возможность более точно определить разницу между амплитудами спектральных составляющих, связанных с техническим состоянием элементов ТАД.

Измерения тока и напряжение, а также их спектральный анализ необходимо проводить с определенной периодичностью, зависящую от результатов предварительного эксперимента. Результаты анализа сравниваются и контролируются по динамике развития повреждения во времени и определяется остаточный ресурс двигателя.

Применение предлагаемого метода позволит в полной мере реализовать технологию технического обслуживания электродвигателей по фактическому состоянию, что обеспечить снижение ущерба от аварийных отказов за счет раннего обнаружения дефектов.

Диагностика основных неисправностей электродвигателя однозначно осуществляется и связан с характерными спектральными составляющими частот, например, опасная перегрузка

двигателя по небольшой разнице в амплитуде между основной, 3-й и 5-й гармоник тока статора; повреждения подшипника – на частотах, кратных частоте вращения ротора; подвисяние ротора – характерным биениям и амплитудно модулированному току статора; наличие межвитковых замыканий в обмотках статора – на основной гармонике тока статора.

Заклучение

Описанный метод диагностики, обработка и анализ результатов технического состояния ТАД на основе анализа спектральных составляющих тока статора, позволяют по совокупности измеряемых параметров повысить достоверность принимаемого технического решения о поддержании эксплуатационной надежности и изучить эволюцию технического состояния, а также уменьшить вероятность необоснованного вывода из эксплуатации.

Применение магнитооптических датчиков, имеющих большой динамический диапазон по амплитуде и частоте для измерений токов мощных АД, с последующей обработкой их на ЭВМ, работающим в реальном масштабе времени и основанном на быстром преобразовании Фурье, дает возможность использования в обработке данных измерений мощного математического аппарата.

References:

1. Djabarov N.G., Yakubov M.S., Djabarov A.N. Sposob i ustroystvo zasch'ity' trehfaznogo asinhronnogo dvigatelya. Patent R.Uz. IAP № 03415, 2007.
2. Bobrovnikov YA. YU., Stecyuk A. E. Diagnosticheskie komplekсы' e`lektropodvijnogo sostava: ucheb. posobie / Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2012.-94 s.
3. Thomson W.T., Mark Fenger "Current signature analyses to detect intucion motor fault" IEEE industry Application Magazine July/August 2001.
4. Petuhov V. Diagnostika sostoyaniya e`lektrodvigatelye. Metod spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka/- Jurnal <Novosti e`lektrotehniki>, 2005, № 1(31) 11-14 str.
5. Sadunin A.M., Afanas'ev D.O., Sidel'nikov L.G. Metody' diagnostiki asinhronny'h dvigateley. Trudy' Permskogo gosudarstvennogo universiteta, №2,2005.
6. Bader M.P. E`lektromagnitnaya sovместimost'. - M.: UMK MPS,2002,-638 s.
7. Goryainov V.T., Juravlev A.G., Tihonov V.I. Statisticheskaya radiotekhnika - M.: <Sov.Radio>, 1980.544 s.
8. Tihonov V.I., Harisov V.N., Statisticheskiiy analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem. - Moskva: <Radio i svyaz'>, 1991. - 608 s.:il.
9. Grishenko A.V., Hamidov O.R. Novy'y podhod k issledovaniyu vibratsiy defektov rotora i podshipnikov kacheniya lokomotivny'h asinhronny'h e`lektrodvigatelye //E`lektrifikatsiya i razvitie infrastruktury' e`nergoobespecheniya tyaga poezdov jeleznodorojnogo transporta. Sankt-Peterburg, 2015,-150-156 s.

*Якубов Миржалил Сагатович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог» ТИИТ, Тел.:299-04-44;
Файзуллаев Жавхар Султон угли – докторант (PhD) кафедры «Электрическая связь и радио» ТИИТ, Тел.:299-05-97, E-mail: javhar2019@mail.ru.*