

УДК 629.42, 004.032.26

В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, М.В. Липчанский, Г.В. Гейко

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗЛАДОВ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА

Системы управления тяговым электроприводом характеризуются значительным числом технических и экономических показателей, изменяющихся во времени, оперативная оценка которых человеком практически невозможна. Поэтому предлагается выполнять оперативную оценку технических и экономических показателей тяговых электроприводов с помощью нейронной сети на основе критерия Стьюдента. Данная оценка может быть использована и в тех случаях, когда не выполняется предположение критерия Стьюдента о нормальности наблюдаемой случайной величины и известен другой закон распределения случайной величины.

Ключевые слова: система управления, тяговый привод, нейронная сеть, критерий Стьюдента.

Постановка проблемы

Параметры тягового электропривода должны соответствовать заранее определенным значениям. К причинам, из-за которых эти значения могут отличаться от заданных, можно отнести: изменение внешних факторов, изменение текущего состояния оборудования вследствие старения или возникновения неисправности. Поскольку число контролируемых параметров тягового привода в статических и динамических режимах не поддается оперативной оценке человеком, необходимы разработка и внедрение современных систем контроля. Решение этой задачи представляется актуальным, т.к. позволяет обеспечить бесперебойное функционирование системы и отдельных элементов тягового электропривода и способствует надёжному использованию подвижного состава.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время нет единого системного подхода к вопросам диагностики подвижного состава. Это приводит к созданию различных средств и методов контроля, которые, в свою очередь, не обеспечивают в полной мере требуемого информационного сопровождения процессов эксплуатации и технического обслуживания.

В [1] предлагается использовать в тяговых электротехнических комплексах шахтных электровозов метод идентификации параметров тяговых двигателей (ТД), который основан на отработке алгоритма приближений с прямым решением дифференциальных уравнений и сравнении получаемых результатов с паспортными значениями. В [2] приведён метод идентификации параметров ТД, построенный на основе разностных

схем. В [3] рассмотрена возможность использования нейросетевой модели для обнаружения замыканий в обмотках двигателя; в [4] описан метод идентификации параметров ТД по переходным характеристикам; в [5] предлагаются схемы оценки сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя (АД) в реальном времени, в [6] предлагается выполнить такую же оценку с помощью генетического алгоритма. В [7] для идентификации применяется расширенный фильтр Калмана с одновременной оценкой в реальном времени параметров АД; предложенный метод уменьшает вычислительные затраты.

Изложение основного материала

Проблема раннего обнаружения изменения характеристик отдельных подсистем управления подвижным составом может быть решена с помощью нейронной сети на основе критерия Стьюдента, если контролируемый объект может быть описан линейным разностным уравнением вида (1).

$$y(t_k) = b_1 y(t_{k-1}) + b_2 y(t_{k-2}) + \dots + b_n y(t_{k-n}) + b_{n+1} u(t_{k-1}) + b_{n+2} u(t_{k-2}) + \dots + b_{n+q} u(t_{k-q}) + \delta(t_k) = B^T x(t_k) + \delta(t_k), \quad (1)$$

где $y(t_k)$ и $u(t_k)$ – соответственно выходная переменная и управление объектом в момент времени $t = t_k$; $B^T = (b_1, b_2, \dots, b_n, \dots, b_{n+q})^T$ – вектор в общем случае неизвестных параметров; $\delta(t_k)$ – возмущение типа белого шума; $x(t_k) = (y(t_{k-1}), y(t_{k-2}), \dots, u(t_{k-q}))$ – вектор обобщенных входов в момент времени t_k .

Обозначим через M_0 и H_0 соответственно модель и гипотезу, отвечающие оптимальному

функционированию объекта, а через M_1 и H_1 – модель и гипотезу, соответствующие неоптимальным режимам работы объекта. Смена гипотезы H_0 на H_1 в некоторый момент времени t_r означает, что до момента t_r , $t_1 \leq t_r < t_n$ выходная последовательность (2) соответствует модели M_0 объекта, а с момента времени t_r – модели объекта M_1 :

$$y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_k), \dots \quad (2)$$

Наиболее простой способ контроля смены гипотез и моделей – по изменению математического ожидания \bar{Y} и дисперсии $\hat{\sigma}_y^2$ выходной наблюдаемой последовательности (2) с помощью критерия Стьюдента (или критерия значимости для средних значений нормальных распределений) [8 – 10].

По значениям наблюдения нетрудно вычислить оценки математического ожидания и дисперсии этой последовательности на бесконечно увеличивающемся интервале времени:

$$\bar{Y}(t_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(t_i), \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_y^2(t_n) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y(t_i) - \bar{Y}(t_n))^2. \quad (4)$$

Аналогично вычисляются оценки среднего значения и дисперсии в момент времени $t = t_n$ для скользящего окна размерности m :

$$\bar{Y}(t_n, m) = \frac{1}{m} \sum_{k=n-m+1}^n y(t_k), \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_y^2(t_n, m) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=n-m+1}^n (y(t_k) - \bar{Y}(t_n, m))^2. \quad (6)$$

При реальном контроле разладок объектов оценки (3) – (5) рациональнее вычислять с помощью рекуррентных соотношений [11]:

$$\bar{Y}(t_n) = (1 - \frac{1}{n}) \bar{Y}(t_{n-1}) + \frac{1}{n} y(t_n), \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_y^2(t_n) = \frac{1}{n-1} ((n-2) \hat{\sigma}_y^2(t_{n-1}) +$$

$$+ \frac{n}{n-1} (y(t_n) - \bar{Y}(t_n))^2),$$

$$\bar{Y}(t_n, m) = \bar{Y}(t_{n-1}, m) + \frac{1}{m} (y(t_n) - y(t_{n-m})). \quad (9)$$

Расчёт дисперсии при скользящем окне при небольших значениях m можно выполнять с помощью выражения (6), поскольку рекуррентное соотношение для $\hat{\sigma}_y^2(t_n, m)$ получается весьма громоздким. Выводится оно на основе разности $(\hat{\sigma}_y^2(t_n) - \hat{\sigma}_y^2(t_{n-1}))$ и выражений (6), (9):

$$\hat{\sigma}_y^2(t_n) = \hat{\sigma}_y^2(t_{n-1}) + \frac{1}{m-1} [\sum_{k=n-m+1}^n (y(t_k) - \bar{Y}(t_n, m))^2 - \sum_{k=n-m}^{n-1} (y(t_k) - \bar{Y}(t_{n-1}, m))^2]$$

или

$$\hat{\sigma}_y^2(t_n) = \hat{\sigma}_y^2(t_{n-1}) + \frac{1}{m-1} [(y(t_n) - \bar{Y}(t_n, m))^2 - (y(t_{n-m}) - \bar{Y}(t_{n-1}, m))^2 + \sum_{k=n-m+1}^{n-1} (y(t_k) - \bar{Y}(t_n, m))^2 - \sum_{k=n-m+1}^{n-1} (y(t_k) - \bar{Y}(t_{n-1}, m))^2]. \quad (10)$$

Для приведения соотношения (10) к рекуррентной форме преобразуем слагаемые со знаками суммы:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=n-m+1}^{n-1} (y(t_k) - \bar{Y}(t_n, m))^2 - \sum_{k=n-m+1}^{n-1} (y(t_k) - \bar{Y}(t_{n-1}, m))^2 = \\ & = \sum_{k=n-m+1}^{n-1} \{ [(y(t_k) - \bar{Y}(t_{n-1}, m)) - \frac{1}{m} (y(t_n) - y(t_{n-m}))]^2 - (y(t_k) - \bar{Y}(t_{n-1}, m))^2 \} = \\ & = \sum_{k=n-m+1}^{n-1} [-\frac{2}{m} (y(t_k) - \bar{Y}(t_{n-1}, m)) (y(t_n) - y(t_{n-m})) + \frac{1}{m^2} (y(t_n) - y(t_{n-m}))^2] = \\ & = 2(y(t_n) - y(t_{n-m})) \sum_{k=n-m+1}^n (-\frac{1}{m} y(t_k)) + \\ & + (\frac{2}{m} (y(t_n) (y(t_n) - y(t_{n-m})) + \\ & + \frac{2(m-1)}{m} \bar{Y}(t_{n-1}, m) (y(t_n) - y(t_{n-m})) + \\ & + \frac{1}{m^2} (y(t_n) - y(t_{n-m}))^2 = \\ & = 2(y(t_n) - y(t_{n-m})) [-\bar{Y}(t_n, m) + \frac{1}{m} y(t_n) + \\ & + \frac{m-1}{m} \bar{Y}(t_{n-1}, m) + \frac{1}{2m^2} (y(t_n) - y(t_{n-m}))] = \\ & = \varphi(y(t_n), y(t_{n-m}), \bar{Y}(t_n, m), \bar{Y}(t_{n-1}, m), m). \end{aligned}$$

Подставив функцию φ в выражение (10), получим следующее рекуррентное соотношение для определения оценки дисперсии при скользящем окне:

$$\hat{\sigma}_y^2(t_n) = \hat{\sigma}_y^2(t_{n-1}) + \frac{1}{m-1} [(y(t_n) - Y(t_n, m))^2 - (y(t_{n-m}) - \bar{Y}(t_{n-1}, m))^2 + \varphi(y(t_n), y(t_{n-m}), \bar{Y}(t_n, m), \bar{Y}(t_{n-1}, m), m)]. \quad (11)$$

Для каждого значения дискретного времени рассчитывается критерий Стьюдента:

$$T(t_n, m) = t_{n+m-2} = \frac{\bar{Y}(t_n) - \bar{Y}(t_n, m)}{s\sqrt{1/n + 1/m}}, \text{ где}$$

$$s = \left[\frac{1}{n+m-2} ((n-1) \hat{\sigma}_y^2(t_n) + (m-1) \hat{\sigma}_y^2(t_n, m)) \right]^{1/2}.$$

Здесь s^2 – объединенная выборочная дисперсия, представляющая собой несмещенную оценку общей дисперсии $\hat{\sigma}_y^2$ последовательности (2).

Статистика (т.е. функция от результатов наблюдений) t_{n+m-2} при справедливости гипотезы H_0 (оптимальное функционирование объекта) подчиняется распределению Стьюдента с $f = n + m - 2$ степенями свободы, если

$$|t_{n+m-2}| < t_{n+m-2}^*(1 - p/2), \tag{12}$$

где $t_{n+m-2}^*(1 - p/2)$ – квантиль уровня $(1 - p/2)$ распределения Стьюдента с $f = n + m - 2$ степенями свободы, т.е. $t_{n+m-2}^*(1 - p/2)$ есть решение уравнения $S_{n+m-2}(t) = (1 - p/2)$, где $S_f(t)$ – функция распределения Стьюдента с f степенями свободы случайной величины t_f [10, 12]:

$$p\{t_f \leq x\} = S_f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi f}} \frac{\Gamma\left(\frac{f+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{f}{2}\right)} \int_{-\infty}^x \left(1 + \frac{u^2}{f}\right)^{-\frac{f+1}{2}} du, |x| < \infty.$$

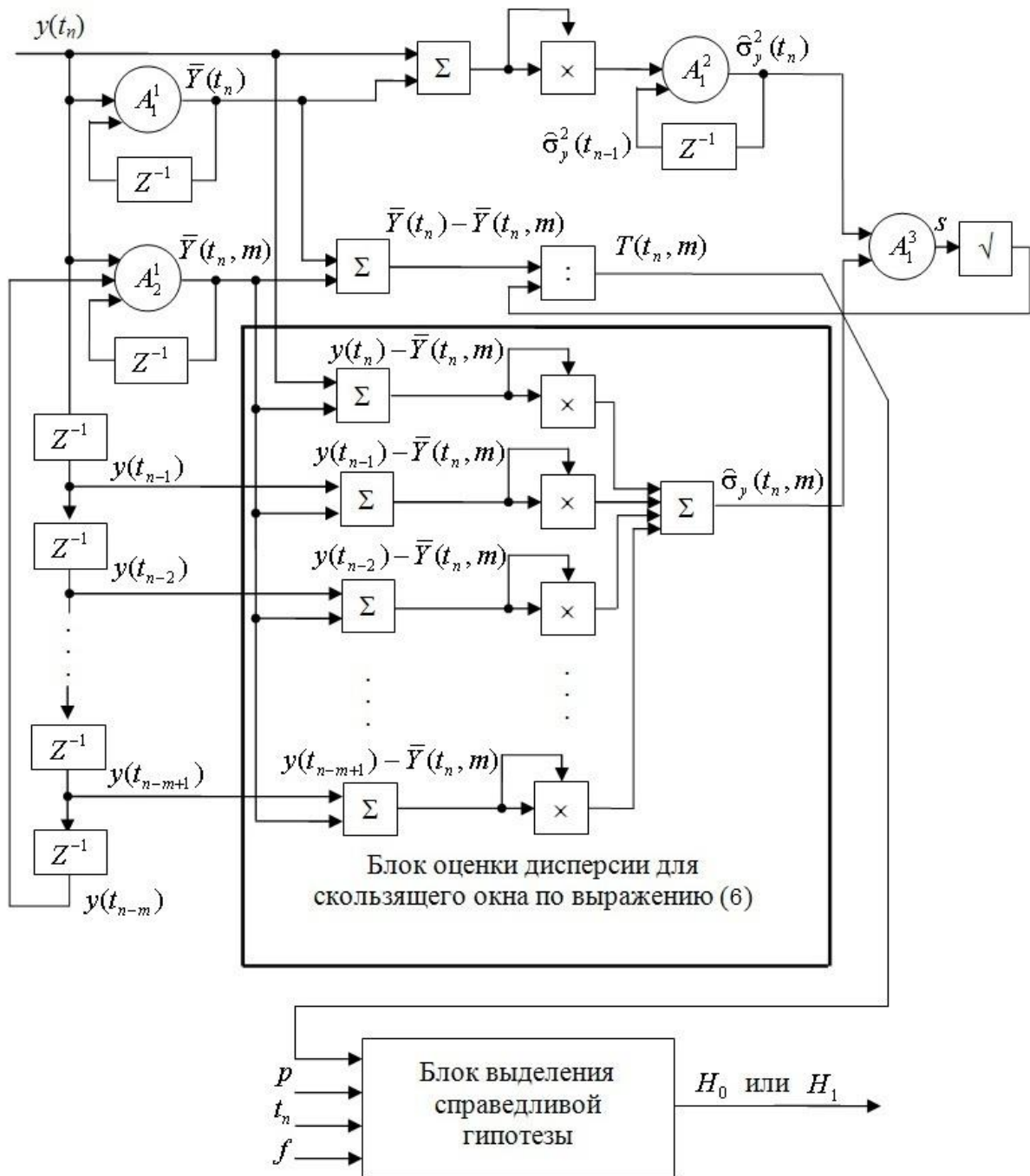


Рис. 1. Нейронная сеть для определения разладок на основе критерия Стьюдента

Здесь p – вероятность того, что случайная величина t_f меньше x ; $\Gamma(f)$ – гамма-функция;

$$t_f = U / \sqrt{\frac{1}{f} \chi_f^2},$$

где U – случайная величина, подчиняющаяся стандартному нормальному распределению с нулевым математическим ожиданием $N(0,1)$; χ_f^2 – случайная величина, подчиняющаяся "хи-квадрат" распределению с f степенями свободы; U и χ_f^2 – независимые случайные величины.

Если соотношение (12) не выполняется, то выполняется гипотеза H_1 (неоптимальное функционирование объекта).

На рис. 1 приведена нейронная сеть для определения разладок на основе критерия Стьюдента. В этой сети для вычисления оценки дисперсии при скользящем окне используется выражение (6), реализованное с помощью соответствующего блока, указанного на рис. 1. Данный блок несложно заменить блоком, вычисляющим рекуррентное выражение (11), и получить ещё одну нейронную сеть для определения разладок с помощью критерия Стьюдента.

Выводы

В общем случае, критерий Стьюдента использует предположение о нормальности наблюдаемой случайной величины. Он является робастным, то есть нечувствителен к умеренным отклонениям случайной величины от нормального распределения.

Если закон распределения случайной величины сильно отличается от нормального и это заранее известно, то возможно использование других методов и критериев для оценки параметров этого распределения [10, 12].

Разработанная авторами методика синтеза нейронной сети для контроля смены гипотез и моделей по изменению математического ожидания и дисперсии на основе критерия Стьюдента может быть использована и в тех случаях, когда не выполняется предположение критерия Стьюдента о нормальности наблюдаемой случайной величины и известен другой закон распределения случайной величины. При известном законе распределения случайной величины и наблюдаемым ее случайным значениям нетрудно получить соотношения для вычисления оценок математического ожидания и дисперсии и использовать их для синтеза нейронной сети, определяющей разладки в контролируемых объектах по наблюдаемым случайным значениям. Соответствующую нейронную сеть можно разработать практически для всех известных законов распределения случайных величин.

Литература

1. Синчук О.Н. Идентификация электрических параметров тяговых асинхронных двигателей электровозов / О.Н. Синчук, В.Ю. Захаров, И.О. Синчук, Л.В. Сменова // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2013. – №10 (86). – С. 50–59.
2. Глазырин А.С. Идентификация параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем / А.С. Глазырин, Е.В. Боловин // *Известия Томского политехнического ун-та*. – 2012. – №5 – С. 101–105.
3. Каширских В.Г. Динамическая идентификация параметров ротора асинхронного электродвигателя с помощью искусственной нейронной сети / В.Г.Каширских, А.В. Нестеровский // *Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та*. – 2004. – №4. – С. 50–51.
4. Ткачук Р.Ю. Идентификация параметров асинхронного двигателя с применением генетических алгоритмов / Р.Ю.Ткачук, А.С. Глазырин, В.И. Полищук // *Омский научный вестник*. – 2012. – №3 (113). – С. 245–248.
5. Zaremba A.T. Real-time identification of an induction motor using sinusoidal PWM voltage signals / A.T. Zaremba, A.V. Pavlov, // *ААСС*. – 2002. – P. 3082–3087.
6. Simonik P. Estimation of Induction Machine Electrical Parameters Based on the Genetic Algorithms / P. Simonik, P. Hudecek, P. Palacky, D. Slivka // *PIERS Proceedings*. – K.L., Malaysia. – 2012. – P. 999–1002.
7. Leite V. A Real-time Estimator of Electrical Parameters for Vector Controlled Induction Motor using a Reduced Order Extended Kalman Filter / V. Leite, R. Araújo, D. Freitas // *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. – 2004. – P. 2293–2299.
8. Дмитриенко В.Д. Обнаружение разладок в системах управления тягового подвижного состава с помощью искусственных нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заповский, В.И. Носков, М.В. Липчанский // *Проблеми інформатики і моделювання. Матеріали третьої науково-технічної конференції*. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2003. – С. 14.
9. *Математическая энциклопедия: Гл. ред. И.М. Виноградов, т. 5*. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – С. 258–260.
10. Афифи А. *Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ*. / А. Афифи, С. Эйзен. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
11. Бодяньський Є.В. Адаптивне виявлення розладань в об'єктах керування за допомогою штучних нейронних мереж / Є.В. Бодяньський, О.І. Михальов, І.П. Плісе // *Дніпропетровськ: Системні технології, 2000*. – 140 с.
12. Корольок В.С. *Справочник по теории вероятностей и математической статистике* / В.С. Корольок, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. – М.: Наука, 1985. – 640 с.

References

1. Sinchuk O.N. Identification of the electrical parameters of traction asynchronous motors of electric locomotives / O.N. Sinchuk, V.Y. Zakharov, I.O. Sinchuk, L.V. Sменова // *Electrical and computer systems*. – 2013. – №10 (86). – P. 50–59.
2. Glazyrin A.S. Identification of parameters of asynchronous motors with fixed squirrel-cage rotor that based on difference

- schemes / A.S. Glazyrin, E.V. Bolovin // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. – 2012. – №5 – P. 101–105.
3. Kashirskikh V.G. Dynamic parameter identification of asynchronous motor rotor by using artificial neural network / V.G. Kashirskikh, A.V. Nesterovskiy // *Bulletin of the Kuzbass state. tehn. univ.* – 2004. – №4. – S. 50–51.
4. Tkachuk R.Y. Identification of the parameters of asynchronous motor using genetic algorithms / R.Y. Tkachuk, A.S. Glazyrin, V.I. Polishchuk // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2012. – №3 (113). – P. 245–248.
5. Zaremba A.T. Real-time identification of an induction motor using sinusoidal PWM voltage signals / A.T. Zaremba, A.V. Pavlov, // *AACC*. – 2002. – P. 3082–3087.
6. Simonik P. Estimation of Induction Machine Electrical Parameters Based on the Genetic Algorithms / P. Simonik, P. Hudecek, P. Palacky, D. Slivka // *PIERS Proceedings*. – K.L., Malaysia. – 2012. – P. 999–1002.
7. Leite V. A Real-time Estimator of Electrical Parameters for Vector Controlled Induction Motor using a Reduced Order Extended Kalman Filter / V. Leite, R. Araújo, D. Freitas // *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. – 2004. – P. 2293–2299.
8. Dmitrienko V.D. Detection disorders in the traction rolling stock control systems using artificial neural networks / V.D. Dmitrienko, N.I. Zapolovskiy, V.I. Noskov, M.V. Lipchanskyi // *Problems of Informatics and modeling. Proceedings of the Third Science and Technology Conference. Kharkov National Technical University "KhPI"*. – 2003. – P. 14.
9. *Mathematical Encyclopedia: Ch. Ed. I.M. Vinogradov, vol. 5 – M. : Soviet Encyclopedia, 1984. – P. 258–260.*
10. Afifi A. Statistical analysis: The approach of using a computer. / A. Afifi, S. Eisen // *M. : Mir*. – 1982. – 488 p.
11. Bodyansky E.V. Adaptive detection of discord in control objects with artificial neural networks. / E.V. Bodyansky, O.I.

- Michalov, I.P. Plise // *Dnipropetrovsk: Sistemni tehnologii*. – 2000. – 140 p.
12. Koroljuk V.S. Handbook on probability theory and mathematical statistics / V.S. Koroljuk, N.I. Portenko, A.V. Skorokhod, A.F. Turbin. – M. : Nauka. – 1985 – 640 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Серков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

Автор: НОСКОВ Валентин Иванович
Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, доктор технических наук, профессор,
E-mail – val1942@mail.ru

Автор: МЕЗЕНЦЕВ Николай Викторович
Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, кандидат технических наук, доцент,
E-mail – besitzer@rambler.ru

Автор: ЛИПЧАНСКИЙ Максим Валентинович
Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, кандидат технических наук, доцент,
E-mail – max1@meta.ua

Автор: ГЕЙКО Геннадий Викторович
Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, ст. преподаватель,
E-mail – e2901@rambler.ru

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗЛАДНАНЬ У ТЯГОВОМУ ПРИВОДІ З ВИКОРИСТАННЯМ КРИТЕРІЮ СТЬЮДЕНТА

В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, М.В. Липчанський, Г.В. Гейко

Системи управління тяговим електроприводом характеризуються значним числом технічних і економічних показників, що змінюються в часі, оперативна оцінка яких людиною практично неможлива. Тому пропонується виконувати оперативну оцінку технічних і економічних показників тягових електроприводів за допомогою нейронної мережі на основі критерію Стьюдента. Дана оцінка може бути використана і в тих випадках, коли не виконується припущення критерію Стьюдента про нормальність спостережуваної випадкової величини і відомий інший закон розподілу випадкової величини.

Ключові слова: система керування, тяговий привід, нейронна мережа, критерій Стьюдента.

DISORDERS IDENTIFICATION IN TRACTION DRIVE USING A STUDENT'S CRITERION

V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, M.V. Lipchanskyi, G.V. Gejko

Electric traction drive control systems are characterized by a significant number of technical and economic parameters which are time-varying. And it is practically impossible to assess them rapidly by man. At the moment there is no single systematic approach to the rolling stock diagnosis. Therefore it is proposed to perform a rapid assessment of the technical and economic parameters of electric traction drives using a neural network based on Student's criterion. In general, the Student's criterion uses the assumption of normality of the observed random variable. It is robust, i.e. insensitive to random variable moderate deviations of a normal distribution. The synthesis method of neural network to monitor replacement of hypotheses and models to change the mathematical expectation and variance based on Student's criterion, that is developed by authors, can be used in those cases where the Student's criterion assumption is not satisfied for normality of the observed random variable and other principle of the random variable distribution is known.

Keywords: control system, traction drive, neural network, Student's criterion.