

**ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ СТРЕЛОЧНОГО ПРИВОДА**

Ассист. Ю.И. Богатырь

**ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ЗАМКНУТОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМ ПРИСТРОЄМ СТРЕЛОЧНОГО ПРИВОДА**

Асист. Ю.І. Богатир

**CHECKIN THE ADEQUANCY OF THE SIMULATION MODEL OF CLOSET-LOOP CONTROL ACTUATORS SWICH GEAR**

Assistant Y.I. Bogatir

*Був проведений аналіз впливу факторів на результуючий показник роботи безконтактного керованого двигуна стрілочного привода з замкнутою системою керування за допомогою методів математичної статистики. У результаті було встановлено, що дійсно існує лінійний зв'язок між зміною навантаження на валу та електромагнітним моментом двигуна, що свідчить про адекватність розробленої імітаційної моделі замкнутої системи керування виконавчим пристроєм стрілочного привода, тобто можна використовувати результати моделювання в подальших дослідженнях.*

**Ключові слова:** стрілочний електропривод, перевірка адекватності імітаційної моделі, регресійний аналіз, критерій Фішера, критерій Стьюдента.

*Проведен анализ влияния факторов на результирующий показатель работы бесконтактного управляемого двигателя стрелочного привода с замкнутой системой управления с помощью методов математической статистики. В результате было установлено, что действительно существует линейная связь между изменением нагрузки на валу и электромагнитным моментом двигателя, что свидетельствует об адекватности разработанной имитационной модели замкнутой системы управления исполнительным устройством стрелочного электропривода, то есть можно использовать результаты моделирования в дальнейших исследованиях.*

**Ключевые слова:** стрелочный электропривод, проверка адекватности имитационной модели, регрессионный анализ, критерий Фишера, критерий Стьюдента.

*Verification of adequacy of simulation model of close system of management is executed the noncontact guided engine of switchgear being base on the data got at a design analysed influence of change of loading on the billow of the noncontact guided engine on his electromagnetic moment with the use of methods of mathematical statistics. A cross-correlation analysis was applied for determination of closeness of connection between two variables. For the unambiguous estimation of the adequacy worked out to the model, took advantage of criterion of Fisher that reflects as far as well this model explains general dispersion of dependency variable. By means of t- criterion of Student estimated static meaningfulness of parameters of regression and correlation, for what defined the standard errors of parameters of linear regression and coefficient of correlation. Equalization of regression confesses meaningful because actual value F- criterion considerably anymore tabular, consequently, explained dispersion considerably anymore, what unexplained. After the conducted analysis of simulation model of close system of management existence of linear dependence is mathematically well-proven between the change of loading on a billow and electromagnetic moment of the noncontact guided engine at the use of close system of management in a switchgear. It talks that a model is adequate, id est design results can serve for further researches.*

**Keywords:** electric point machine, checking the adequacy of the simulation model, regression analysis, Fischer's criterion, Student's criterion.

**Введение.** Эффективность и конкурентоспособность железных дорог в значительной степени зависит от скорости и интенсивности движения поездов. Важным звеном в обеспечении безопасности функционирования железной дороги являются устройства автоматики, в частности стрелочные электроприводы (СП). В процессе эксплуатации СП возникают различные повреждения, приводящие к аварийным ситуациям [1]. Одной из функций автоматизированной системы управления СП является регулирование величин, характеризующих его движение [2]. В таком приводе электродвигатель должен обладать большим пусковым моментом, быть реверсивным, экономичным, обеспечивая минимальный расход кабеля на стрелку, герметичным и максимально простым в обслуживании [3]. В настоящее время в СП применяются двигатели с последовательным возбуждением, асинхронный двигатель, а также широко внедряется бесконтактный управляемый двигатель (ДБУ), для управления которыми применяется разомкнутая система управления. Ее недостатком является то, что процесс работы системы не зависит непосредственно от результата ее воздействий на управляемый объект. Для регулирования работы исполнительного устройства электропривода целесообразно применять замкнутую систему управления ЭП [2]. Такая система является более сложной, но в то же

время и более совершенной, чем разомкнутая. Сигнал управления формируется из сигнала задания и сигнала отрицательной обратной связи, несущего информацию о фактическом значении регулируемого параметра, которое зависит от возмущений, действующих на узлы системы и рабочий орган электропривода. В результате введения обратной связи ошибка регулирования уменьшается до допустимого значения. При этом ни одно из возмущений не измеряется, а их влияние на регулируемый параметр воспринимается системой по каналу обратной связи.

**Анализ исследований.** С целью устранения недостатков, присущих применяемым электроприводам с разомкнутой системой управления исполнительным устройством [2, 4], была разработана замкнутая система управления исполнительным устройством ЭП [5], в которой применяется два контура управления: внутренний цикл синхронизирует импульсы коммутатора с электродвижущей силой, внешний цикл регулирует скорость двигателя, изменяя напряжение на управляемом источнике напряжения. Для исследования характеристик двигателя стрелочного привода с такой системой управления разработана имитационная модель (рисунок) в среде Simulink системы Matlab R2012a [2]. С помощью этой модели был проведен анализ характеристик работы двигателя в различных условиях.

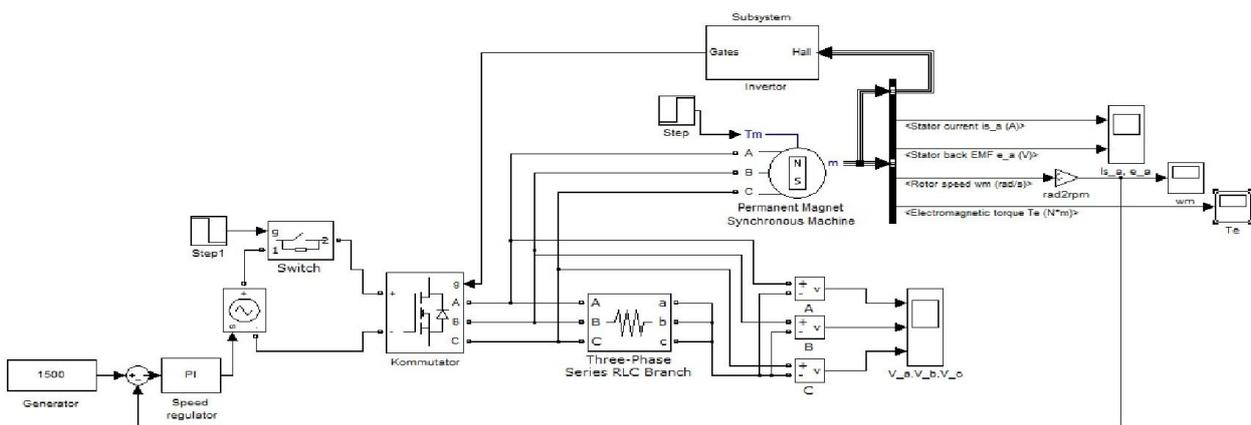


Рис. Имитационная модель управления электродвигателем стрелочного привода

**Целью** данной работы является проверка адекватности построенной имитационной модели, то есть определение наличия

логической связи между изменяющимися параметрами бесконтактного управляемого двигателя в процессе эксплуатации

стрелочного привода с замкнутой системой управления.

**Основной материал.** Наиболее распространенным способом обоснования адекватности модели является использование методов математической статистики. Метод регрессионного анализа обеспечивает такую подборку выбранной кривой, при которой экспериментальные точки ложатся на нее лучшим образом в смысле критерия наименьших квадратов [6]. Под приближением кривой к экспериментальным данным необходимо понимать процесс вычисления значений параметров таким образом, чтобы сумма квадратичных отклонений была минимальной.

Уравнение линейной регрессии имеет вид [7]

$$y = \vartheta_0 + \vartheta_1 x + u,$$

где  $Y$  – случайная величина, распределение которой зависит от некоторой независимой  $X$ ,  $Y = \{Y_1, Y_2 \dots Y_n\}$ ;

$X$  – вектор наблюдений за независимой переменной,  $x = \{x_1, x_2 \dots x_n\}$ ;

$\vartheta_0, \vartheta_1$  – неизвестные параметры регрессионной модели;

$u$  – случайные отклонения модели,  $u = \{u_1, u_2 \dots u_n\}$ .

Прямую регрессии без учета случайных отклонений представим следующим уравнением:

$$y = \vartheta_0 + \vartheta_1 x.$$

Неизвестные параметры регрессии определяются по ниже приведенным формулам [5]:

$$\vartheta_0 = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2};$$

$$\vartheta_1 = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}.$$

Основываясь на данные, полученные при моделировании (табл. 1), проанализировали влияние изменения нагрузки на валу бесконтактного управляемого двигателя (фактор  $x$ ) на его электромагнитный момент (фактор  $y$ ), исходя из 11 выбранных наблюдений. Рассчитали линейный коэффициент парной корреляции, коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации и оценили статистическую значимость уравнения регрессии в целом и отдельных параметров регрессии и корреляции с помощью F-критерия Фишера и t-критерия Стьюдента.

Таблица 1

Электромагнитный момент двигателя при изменении нагрузки на валу двигателя

Номер наблюдения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Нагрузка на вал двигателя, Н	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5
Электромагнитный момент, Н·м	0.6406	0.9559	1.246	1.557	1.835	2.21	2.439	2.785	3.06	3.347	3.732

Построим простую линейную регрессионную модель зависимости изменения электромагнитного момента двигателя постоянного тока вследствие изменения нагрузки на валу двигателя  $y = \vartheta_0 + \vartheta_1 x + u$  с целью выявления, насколько изменение нагрузки на валу влияет на электромагнитный момент [7].

Для расчета параметров уравнения линейной регрессии все расчетные значения сведены в расчетную таблицу (табл. 2).

После подстановки рассчитанных значений в формулы определения параметров регрессионного уравнения получены следующие значения:  $\vartheta_0 = 0.21$ ,  $\vartheta_1 = 0.96$ .

Таблица 2

Оценка параметров прямой регрессии

№	x	y	xy	x <sup>2</sup>	ŷ <sub>i</sub>	y-ŷ <sub>i</sub>	A <sub>i</sub>
1	0.5	0.6406	0.3203	0.25	0,69	-0,049	7,71
2	0.8	0.9559	0.7647	0.64	0,978	-0,022	2,31
3	1.1	1.246	1.3706	1.21	1,266	-0,02	1,6
4	1.4	1.557	2.1798	1.96	1,554	0,003	0,19
5	1.7	1.835	3.1195	2.89	1,842	-0,007	0,38
6	2.0	2.21	4.42	4	2,13	0,08	3,61
7	2.3	2.439	5.6097	5.29	2,418	0,021	0,86
8	2.6	2.785	7.241	6.76	2,706	0,079	2,83
9	2.9	3.06	8.874	8.41	2,994	0,066	2,15
10	3.2	3.347	10.7104	10.24	3,282	0,065	1,94
11	3.5	3.732	11.802	12.25	3,57	0,162	4,34
<i>Итого</i>	22	23,45	56.412	53.9	21,33	2,47	10,4

Полученное уравнение регрессии имеет вид

$$\check{y} = 0.21 + 0.96x.$$

Отклонение расчетных значений от фактических определяет ошибка аппроксимации:

$$A = \left| \frac{y - \check{y}}{y} \right| \cdot 100\%$$

Для определения плотности связи между двумя переменными применяется корреляционный анализ. Полученные в результате применения линейных методов корреляционного анализа выводы могут подтвердить или опровергнуть гипотезу о существовании линейной зависимости между

рядами [8]. Чем ближе вычисленная величина корреляционного отношения к 0, тем слабее сила линейной связи между рядами, чем ближе вычисленная величина к+1 или к-1, тем сильнее сила линейной связи.

Силу линейной корреляционной связи количественных признаков измеряет коэффициент корреляционного отношения Пирсона, который вычисляется по формуле [8]

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – средние значения переменных.

Все расчетные значения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения для определения коэффициента корреляции

№	x	y	x <sub>i</sub> - $\bar{x}$	y <sub>i</sub> - $\bar{y}$	$\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	(x <sub>i</sub> - $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>	(y <sub>i</sub> - $\bar{y}$ ) <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.5	0.6406	-1.5	-1.49	2,23	2,25	2,22
2	0.8	0.9559	-1.2	-1,17	1,41	1,44	1,38
3	1.1	1.246	-0.9	-0,88	0,79	0,81	0,78
4	1.4	1.557	-0.6	-0,57	0,344	0,36	0,33
5	1.7	1.835	-0.3	-0,29	0,088	0,09	0,087
6	2.0	2.21	0	0,078	0	0	0,006

1	2	3	4	5	6	7	8
7	2.3	2.439	0.3	0,307	0,092	0,09	0,09
8	2.6	2.785	0.6	0,65	0,39	0,36	0,42
9	2.9	3.06	0.9	0,92	0,83	0,81	0,86
10	3.2	3.347	1.2	1,21	1,451	1,44	1,47
11	3.5	3.732	1.5	1,24	1,86	2,25	1,53
<i>Итого</i>	22	23,45	0	21,31	9,517	9,9	9,21

После подстановки рассчитанных параметров значение коэффициента корреляционного отношения равно  $r=0.99$ .

Величина вычисленного линейного коэффициента корреляции составила 0.99, что свидетельствует о том, что связь между изменяемыми параметрами двигателя весьма высока. Положительная величина коэффициента корреляции свидетельствует о прямой связи между изменением нагрузки на валу и электромагнитным моментом двигателя при использовании замкнутой системы управления исполнительным устройством стрелочного привода.

Одним из показателей качества модели является коэффициент детерминации  $R^2$ . При отсутствии связи коэффициент детерминации равен нулю, то есть модель считается неадекватной.

Коэффициент детерминации равен квадрату коэффициента корреляции:

$$R^2 = r^2;$$

В нашем случае коэффициент детерминации  $R^2=0.99^2=0.98$  показывает, что в исследуемой ситуации 98 % общей дисперсии издержек обращения объясняются изменениями нагрузки на валу двигателя, в то время как на все остальные неучтенные факторы приходится 2 % изменчивости издержек обращения.

Качество модели определяет средняя ошибка аппроксимации, допустимый предел значений  $\bar{A}$  не должен превышать 10 %:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum |A| = 0.94\%$$

Качество построенной модели хорошее, так как средняя ошибка аппроксимации не превышает 10 %.

Для однозначной оценки адекватности разработанной нами модели воспользуемся критерием Фишера. Для регрессионной модели он отражает, насколько хорошо эта модель объясняет общую дисперсию зависимой переменной [6]. Расчет критерия выполняется по следующей формуле:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{f_1}{f_2}$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – числа степеней свободы.

Число степеней свободы объясненной дисперсии  $f_1$  равно количеству объясняющих переменных  $f_1 = 1$ . Число степеней свободы необъясненной дисперсии  $f_2 = 11 - 1 - 1 = 9$ .

Рассчитанное значение F-критерия составляет  $F=891$ .

По таблице критических значений F-распределения Фишера определим при указанных степенях свободы  $k = n - 2 = 9$  и уровне значимости  $p=0,05$  критическое значение F-критерия 5.12. Уравнение регрессии признается значимым, так как фактическое значение F-критерия ( $F=891$ ) значительно больше табличного ( $F = 5,12$ ). Видим, что расчетное больше табличного, следовательно, объясненная дисперсия значительно больше, чем необъясненная [5].

С помощью t-критерия Стьюдента оценим статическую значимости параметров регрессии и корреляции. Для этого необходимо определить стандартные ошибки параметров линейной регрессии и коэффициента корреляции и рассчитать фактические значения.

Стандартные ошибки параметров линейной регрессии и коэффициента корреляции:

$$M_{\vartheta_0} = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - 2} \cdot \frac{\sum x^2}{n \sum (x - \bar{x})^2}} = 0.053$$

$$M_{\vartheta_1} = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2 / n - 2}{\sum (x - \bar{x})^2}} = 0.024$$

$$M_R = \sqrt{\frac{1 - R^2}{n - 2}} = 0.047$$

Фактические значения t-критериев:

$$t_{\vartheta_0} = \frac{\vartheta_0}{M_{\vartheta_0}} = 3.96$$

$$t_{\vartheta_1} = \frac{\vartheta_1}{M_{\vartheta_1}} = 40$$

$$t_R = \frac{R}{M_R} = 21.06$$

Табличное значение t-критерия для числа степеней свободы и уровня значимости  $p=0,05$  составляет  $t_{табл} = 2,26$ . Фактические значения превосходят табличное значение:

$$t_{\vartheta_0} = 3.96 > t_{табл} = 2,26,$$

$$t_{\vartheta_1} = 40 > t_{табл} = 2,26,$$

$$t_R = 21.06 < t_{табл} = 2,26,$$

Следовательно, параметры  $\vartheta_0, \vartheta_1$  и  $R$  статистически значимы. Это значит, что построенная имитационная модель адекватна, то есть существует линейная связь между

изменением нагрузки на валу и электромагнитным моментом в бесконтактном управляемом двигателе стрелочного привода.

**Вывод.** При анализе имитационной модели замкнутой системы управления исполнительным устройством стрелочным приводом математически доказано существование линейной зависимости между изменением нагрузки на валу и электромагнитным моментом ДБУ при использовании замкнутой системы управления в стрелочном приводе. Это говорит о том, что модель является адекватной, то есть результаты моделирования могут служить для дальнейших исследований.

### Список использованных источников

1. Бабаев, М.М. Имитационное моделирование временных зависимостей параметров асинхронных двигателей стрелочных электроприводов [Текст] / М.М. Бабаев, В.С. Блиндюк, Ю.И. Богатырь // 36. наук. праць Укр. держ. ун-ту заліз. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2015 – Вип. 154. – С. 120-126.
2. Бабаев, М.М. Управление стрелочным электроприводом с применением нейросетевого преобразователя управляемого сигнала [Текст] / М.М. Бабаев, В.С. Блиндюк, Ю.И. Богатырь // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 4. – С. 79-84.
3. Бабаев, М.М. Компьютерное моделирование двигателей стрелочных электроприводов [Текст] / М.М. Бабаев, Ю.И. Богатырь // 36. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 124. – С. 164-172.
4. Стрелочный электропривод [Текст]: пат. 2412845 Россия: МПК В61L 5/06 (2006.01) / Эпифанова Л.М., патентообладатель ЗАО Проектно-технологическая фирма «ЭЛМА-Ко». - № 2009111327/11; заявл. 27.09.2010; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6. – 5 с.
5. Стрелочный электропривід [Текст]: пат. 101436 Україна: МПК Н04К 3/00 Н03J 7/00, Бабаєв М.М., Блиндюк В.С., Ананьєва О. М., Богатир Ю.І.; власник Українська державна академія залізничного транспорту. – № а201201334; заявл. 23.09.2011; опубл. 25.03.2012, Бюл. №6. – 5 с.

6. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука [Текст] / под ред. Е.К. Масловского. – М.: Издательство «Мир», 1978. – 212 с.

7. Ван дер Варден, Б.Л. Математическая статистика [Текст] / пер. с нем. Л.Н. Большева; под ред. Н.В. Смирнова. – М.: Издательство «Иностранная литература», 1960. – 435 с.

8. Гайдышев, И. Анализ и обработка данных [Текст]: специальный справочник / И. Гайдышев. – СПб.: Питер, 2001. – 752 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор М.М. Бабаев

---

Богатир Юлія Іванівна, асистент кафедри електротехніки та електричних машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)7301996.

Bohatyr Yuliia Ivanivna, assistant of the department " Electrical engineering and electrical machines " Ukrainian State University of Railway Transport.

Стаття прийнята 02.11.2015 р.