

УДК 631

UDC 631

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СТЕНДА
ИСПЫТАНИЯ РОЛИКОВЫХ ЦЕПЕЙ****MODELING OF ELECTRIC EQUIPMENT OF
THE STAND OF TEST OF ROLLER CHAINS**

Стрижков Игорь Григорьевич
д.т.н., профессор

Strizhkov Igor Grigorievich
Dr.Sci.Tech., professor

Хорьков Евгений Евгеньевич
инженер

Khorkov Eugeniy Eugenievich
engineer

*Кубанский государственный аграрный университет,
Краснодар, Россия*

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье представлены математические модели статического и динамического режима электрооборудования стенда испытания роликовой цепи цепной передачи, позволяющие проектировать силовые элементы стенда, определять нагрузочные переменные и исследовать переходные электромеханические процессы

The article presents mathematical models of a static and dynamic mode of electric equipment of the stand of test of the chain transfers, allowing to project power elements and to analyze the work of electric equipment of the stand in static and dynamic modes

Ключевые слова: ЦЕПНАЯ ПЕРЕДАЧА,
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ, ЧАСТОТНОЕ
РЕГУЛИРОВАНИЕ

Keywords: CHAIN TRANSFER, ELECTRIC
EQUIPMENT, FREQUENCY REGULATION

Серийное производство роликовых и других цепей для цепных передач сельскохозяйственной техники сопровождается их периодическими стендовыми испытаниями. Ресурсные испытания и испытания на надежность проводятся при нагрузке цепной передачи механической мощностью в движении при возможно близкой имитации естественных условий работы цепи. В настоящее время для этих целей используются стенды с возвратным циклом передачи мощности, не предусматривающие регулирования скорости движения цепи. Вместе с тем, имеется необходимость разработки стенда с регулируемой скоростью движения цепи и нагрузкой цепи механической мощностью, позволяющего максимально приблизить условия испытания цепи к реальным нагрузкам цепи при работе в механизмах сельскохозяйственных машин [1-6].

В Кубанском ГАУ предложена рациональная схема электрооборудования такого стенда [7], предусматривающая использование в качестве ис-

точника механической мощности и регулируемого нагрузочного устройства двух асинхронных короткозамкнутых машин (рис. 1).

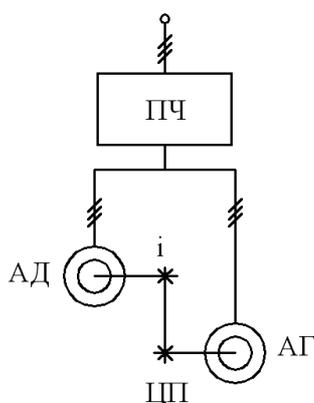


Рисунок 1 – Схема электрооборудования испытательного стенда

Двигатель АД и нагрузочный генератор АГ электрически присоединены параллельно к регулируемому преобразователю частоты ПЧ, получающему питание от электрической сети. Цепная передача ЦП содержит собственно испытываемую цепь и ведущую и ведомую звездочки, соединенные с валами двигателя и генератора прямой передачей или через редуктор (последние на схеме не показаны).

Соотношение чисел зубцов ведущей и ведомой звездочек i определяет диапазон регулирования нагрузки (натяжения) испытываемой цепи и должно определяться в соответствии с максимальной нагрузкой цепи.

Частоту вращения АД Ω_o и скорость движения цепи задает ПЧ регулированием частоты напряжения. Регулирование мощности нагрузки цепи (натяжения) осуществляется изменением амплитуды выходного напряжения преобразователя частоты.

Значения электрических и механических переменных величин в испытательном оборудовании и испытываемой цепи в установившемся режиме работы могут быть определены на основании уравнений моментов (механических характеристик) АД и АГ.

Механическая характеристика двигателя в диапазоне скольжения от нуля до номинального описывается известным уравнением электромагнитного момента

$$M_o = \frac{p_o m U_1^2 r'_{2o} / s_o}{2pf_1 [(r_{1o} + r'_{2o} / s_o)^2 + (x_{1o} + x'_{2o})^2]}, \quad (1)$$

где m – число фаз ($m = 3$); U_1 и f_1 – напряжение (действующее значение) и частота на выходе преобразователя (фазной обмотке); s_d – скольжение двигателя; r_{1d} и x_{1d} – соответственно активное и индуктивное сопротивление обмоток статора (индекс 1) и ротора (индекс 2) двигателя.

Уравнение электромагнитного момента генератора, приведенного к валу электродвигателя, описывается уравнением

$$M'_e = \frac{ip_e m U_1^2 r'_{2e} / s_e}{2pf_1 [(r_{1e} + r'_{2e} / s_e)^2 + (x_{1e} + x'_{2e})]}. \quad (2)$$

В уравнении (2) скольжение s_e имеет отрицательное значение. Установившийся режим имеет место при равенстве моментов двигателя и генератора, т.е. при $M_d + M_e^l = 0$.

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет определить соотношение скольжений обеих машин и результирующего передаточного числа

$$i = \frac{p_e(1-s_d)}{p_d(1-s_e)} \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет определить, что расчетное передаточное отношение i лежит в диапазоне $(0,7 - 0,95) \cdot p_r/p_d$, при меньших значениях, соответствующих асинхронным машинам повышенного скольжения, и больших – для машин общепромышленной модификации.

Выбор передаточного отношения должен производиться после выбора электрических машин – двигателя и генератора, как величины, зависящей от номинальных скольжений этих машин [8]. Выбор машин с большими номинальными скольжениями позволяют производить более точную тари-

ровку машин для определения механической нагрузки по электрическим переменным стенда.

Для определения режимных значений скольжений и других переменных двигателя и генератора удобно использовать совмещенные механические характеристики двигателя и генератора, где момент генератора представлен приведенными значениями момента и частоты вращения и с противоположным знаком.

Изменением напряжения U_1 и частоты питания f_1 , достигается регулирование как скорости движения цепи, так и передаваемой мощности.

Закон регулирования скорости движения и нагрузки испытываемой цепи описывается уравнением

$$U = \sqrt{\frac{M_d}{A} f_n (r_d^2 + x_{kd}^2 \cdot f_n^2)}, \quad (4)$$

где M_d – требуемый момент двигателя; f_n – частота источника питания;

$r_d = r_{1d} + r'_{2d}/s_{др}$ – активное сопротивление схемы замещения двигателя при расчетном скольжении $s_{др}$ при номинальной частоте источника;

$x_{kd} = x_{1d} + x_{2d}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания двигателя;

коэффициент A определяется выражением

$$A = \frac{p \cdot m \cdot r'_{2d}}{2p \cdot f_{1n} \cdot s_{дн}},$$

где p – число пар полюсов двигателя, $m = 3$ – число фаз; f_{1n} , $s_{дн}$ – номинальные частота тока и скольжение двигателя.

Как показали экспериментальные исследования, уравнение (4), полученное с принятием ряда допущений, удовлетворительно описывает закон изменения момента при изменении амплитуды и частоты напряжения.

Для математического моделирования и исследования испытательного электрооборудования, выполнения тарировки электрооборудования стенда необходимо установить закономерность в изменении скольжений двигателя и генератора при изменении частоты источника f_1 . Уравнение (3) устанавливает соотношение скольжений, но не позволяют определить их численные значения при изменяющихся U_1 и f_1 .

Для определения зависимости скольжений от регулируемых переменных можно использовать уравнения (1) и (2). Равенство электромагнитных моментов двигателя и генератора (приведенного значения) дают следующее выражение:

$$\frac{mU_1^2 r_{2d}/s_d}{\Omega_{0d} f_n [(r_{1d} + r_{2d}/s)^2 + x_{kd}^2 f_n^2]} = - \frac{mU_1^2 r_{2z}/s_z}{i \cdot \Omega_{0z} f_n [(r_{1z} + r_{2z}/s_z)^2 + x_{kz}^2 f_n^2]} \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает в частности, что скольжения обеих электрических машин не зависят от напряжения питания, но являются функцией частоты источника.

Выразить функцию $s_d = f(f_n)$ или $s_z = f(f_n)$ в явном виде не представляется возможным вследствие громоздкости преобразований уравнения (5). Однако исключением одного из скольжений можно преобразовать его в уравнение вида $f(f_n, s) = 0$. Преобразование уравнения с введением коэффициентов дает полином третьей степени (кубической параболы):

$$s_d^3 + a_1 s_d^2 + a_2 s_d + a_3 = 0 \quad (6)$$

Численные значения коэффициентов a_i в уравнении (6) определяется с использованием следующих выражений:

$$p = \frac{P_z}{i p_d}; \quad d = r_{1d}^2 + x_{kd}^2 f_n^2; \quad g = r_{1z}^2 + x_{kz}^2 f_n^2; \quad b_1 = gp^2; \quad b_2 = 2gp(1-p); \quad b_3 = g(1-p)^2;$$

$$b_4 = 2pr_{1z}r_{2z}; b_5 = r_{2z}^2 + 2r_{1z}r_{2z}(1-p); b_6 = b_2 + b_4; b_7 = b_3 + b_5; b_8 = p(1-p); b_9 = 2r_{1z}r_{2z};$$

$$a_1 = \frac{p^2b_9 + b_6}{2b_1}; a_2 = \frac{b_8b_9 + b_7}{2b_1}; a_3 = \frac{b_8r_{1z}^2}{2b_1}. \quad (7)$$

Коэффициенты a_i являются величинами, не зависящими от напряжения, но зависимыми от частоты источника питания.

Среди корней кубического полинома (6) решаемой задаче соответствует корень, лежащий в диапазоне 0,01-0,08, отражающий возможные значения скольжения двигателя испытательного стенда в статическом режиме. Остальные корни следует считать случайными.

При исследовании электрооборудования важное значение имеет изучение его динамических режимов, поскольку эти режимы определяют устойчивость работы оборудования при воздействии внешних факторов, возможность пуска в работу заданным способом и др. Наиболее эффективным инструментом таких исследований является математическая компьютерная модель динамического режима. Такая модель может быть построена с использованием широко известного пакета прикладных программ «MatLab-Simulink». Построение математической модели испытательного стенда в среде «MatLab-Simulink» имеет свои особенности.

На движение механических частей испытательного стенда накладываются ограничения, определяемые кинематическими связями. Кинематика стенда представляет систему с голономными связями, для которых число независимых переменных – обобщенных координат, определяющих положение системы – равно числу степеней свободы системы. Известно, что наиболее общей формой записи дифференциальных уравнений движения таких систем являются уравнения движения в обобщенных координатах (уравнения Лагранжа) [9]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i,$$

где W_k – запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты q_i и обобщенные скорости \dot{q}_i ; Q_i – обобщенная сила, определяемая суммой элементарных работ δA_i всех действующих сил на возможном перемещении δq_i

$$Q_i = \frac{dA_i}{dq_i}.$$

В случае испытательного стенда, где все действующие на систему силы являются потенциальными, уравнение Лагранжа имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0,$$

где L – функция Лагранжа, представляющая собой разность между кинетической W_k и потенциальной W_n энергиями системы, выраженными через обобщенные координаты q_i , т.е.

$$L = W_k - W_n.$$

В качестве обобщенных координат в работе приняты угловые перемещения в системе. В двухмассовой упругой системе обобщенными координатами являются угловые перемещения масс φ_1 и φ_2 или соответствующие им угловые скорости ω_1 и ω_2 . Система уравнений движения имеет вид

$$\begin{aligned} M_1 - M_{c1} - M_{12} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_2 &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Передаточные функции этой системы по управляющему воздействию

$$W_{w_0}(p) = \frac{w_0(p)}{M_0(p)} = \frac{p^2 + \frac{J_\delta}{J_\delta + J_z} W_{12}^2}{J_\delta p (p^2 + W_{12}^2)},$$

где $W_{12} = \sqrt{c_{12}(J_\delta + J_z)/J_\delta J_z}$ – частота свободных колебаний двухмассовой упругой системы;

$$W_{w_z}(p) = \frac{w_z(p)}{M_z(p)} = \frac{W_{12}^2}{p(J_\delta + J_z)(p^2 + W_{12}^2)};$$

$$W_{M_{12}}(p) = \frac{M_{12}(p)}{M_0(p)} = \frac{\frac{J_z}{J_\delta + J_z} W_{12}^2}{p^2 + W_{12}^2}.$$

Фазо-частотная характеристика механической системы испытательного стенда имеет вид:

$$y = p + \arctg \frac{1 + (4a_{em}^2/W_{12}^2 - 1)(W/W_{12})^2}{(2a_{em}/W_{12})(W/W_{12})^2}.$$

Метод преобразования координат широко известен и подробно изложен в отечественной и зарубежной учебной и научной литературе [10-12]. Преобразованные в d,q координаты уравнения равновесия напряжения двигателя имеют вид:

$$\begin{aligned} U_{qs} &= R_s i_{qs} + p\varphi_{qs} + \omega_1 \varphi_{ds}; \\ U_{ds} &= R_s i_{ds} + p\varphi_{ds} + \omega_1 \varphi_{qs}; \\ U_{qr} &= R_r i_{qr} + p\varphi_{qr} - (\omega - \omega_r) \varphi_{dr}; \\ U_{dr} &= R_r i_{dr} + p\varphi_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi_{qr}; \\ T_e &= 1,5p_n(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}); \\ \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr}; \\ \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \varphi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs}; \\ \varphi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds}; \end{aligned} \tag{9}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m;$$

$$L_r = L_{lr} + L_m;$$

$$p\omega_m = (T_e - F\omega_m - T_m)/(2H);$$

$$p\theta_m = \omega_m.$$

R_s, L_{ls} – активное сопротивление и собственная индуктивность обмоток статора; R_r, L_{lr} – активное сопротивление и собственная индуктивность обмоток ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;

L_s, L_r – общая индуктивность статора и ротора:

U_{qs}, i_{qs} – напряжение и ток обмотки статора по оси q; U_{qr}, i_{qr} – напряжение и ток обмотки ротора по оси q; U_{ds}, i_{ds} – напряжение и ток обмотки статора по оси d; U_{dr}, i_{dr} – напряжение и ток обмотки ротора по оси d; $\varphi_{qs}, \varphi_{ds}$ – составляющие потокосцепления статора по осям d и q; $\varphi_{qr}, \varphi_{dr}$ – составляющие потокосцепления ротора по осям d и q; ω_m – угловая частота вращения ротора; θ_m – угловое положение ротора; p_n – число пар полюсов машины; ω_r – электрическая угловая частота вращения ротора ($\omega_m \cdot p_n$); θ_r – угловое положение ротора в электрических радианах ($Q_m \cdot p_n$); T_e – электромагнитная постоянная машины; T_m – механическая постоянная машины; H – момент инерции ротора и жестко связанных с ним элементов кинематической схемы; F – сила натяжения цепной передачи в рабочей части.

Связь напряжений на обмотках статора и ротора обобщенной машины по осям d и q с реальными напряжениями на трехфазных обмотках устанавливается известными матрицами преобразований:

$$\begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos q & \cos q + \sqrt{3} \sin q \\ 2 \sin q & \sin q - \sqrt{3} \cos q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{abs} \\ U_{bcs} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} U_{qr} \\ U_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos b & \cos b + \sqrt{3} \sin b \\ 2 \sin b & \sin b - \sqrt{3} \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{abr} \\ U_{bcr} \end{bmatrix}$$

Связь между расчетными токами в обмотках в обмотках статора и ротора по осям d и q и токами в реальных трехфазных обмотках a,b,c устанавливается следующими матрицами обратных преобразований:

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos q}{2} & \frac{\sin q}{2} \\ -\frac{\cos q + \sqrt{3} \sin q}{2} & -\frac{\sqrt{3} \cos q - \sin q}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos b}{2} & \frac{\sin b}{2} \\ -\frac{\cos b + \sqrt{3} \sin b}{2} & -\frac{\sqrt{3} \cos b - \sin b}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix};$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs}; \quad i_{cr} = -i_{ar} - i_{br}.$$

Уравнения генератора в координатах d,q, вращающихся с частотой вращения ротора генератора ω_2 , имеет аналогичный вид:

Для механической части силового блока «двигатель-генератор» управляющим воздействием является электромагнитный момент двигателя. На величину электромагнитного момента двигателя оказывают влияние как параметры источника питания, в качестве которого выступает преобразователь частоты, так и нагрузочный генератор, включенный с приводным двигателем в общую электрическую и механическую системы. На величину момента сопротивления генератора оказывает влияние частота вращения, задаваемая двигателем. Изменение основных показателей напряжения питания, как амплитуда и частота, оказывает воздействие как на электрические, так и на механические процессы в системе. Таким образом, обобщенная модель системы «двигатель-генератор» включает в себя как уравнения электромагнитных процессов в двигателе и генераторе, так уравнения движения механической части названной системы, включающей цепную передачу. В качестве уравнений электромагнитных процессов выступают уравнения системы (8) и (9), адаптированные к использованию штатных моделей асинхронных машин программ «MatLab-Simulink».

Математическая модель, представленная на рисунке 2 позволяет реализовать различные динамические режимы, в частности переходные процессы при изменении нагрузки испытываемой цепи, изменении амплитуды и (или) частоты напряжения источника питания стенда и др. На рисунках 3 и 4 приведены осциллограммы изменения частоты вращения и момента приводного двигателя и тормозного генератора при прямом пуске стенда в работу.

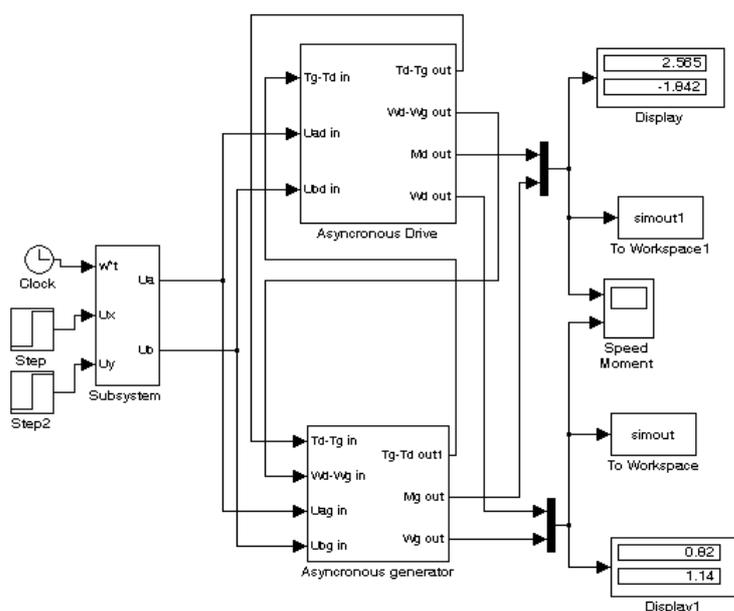


Рисунок 2 – Математическая модель электрооборудования стенда в символах пакета программ «MatLab-Simulink»

Осциллограммы имеют практически полное совпадение с экспериментальными и указывают на возможность пуска стенда прямым подключением к сети. Они отражают характерное изменение момента тормозного генератора, который в процессе разбега выполняет функции вспомогательного разгонного двигателя, облегчая процесс прямого пуска асинхронных машин в работу.

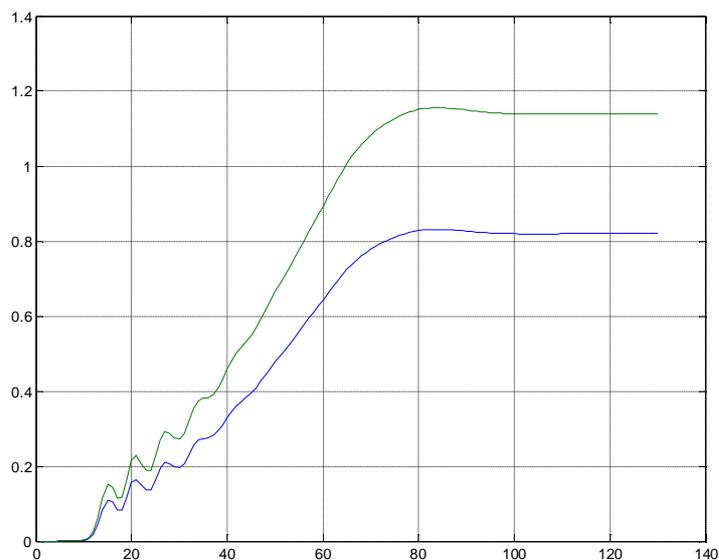


Рисунок 3 – Диаграмма разбега двигателя 1 и генератора 2 при пуске стенда

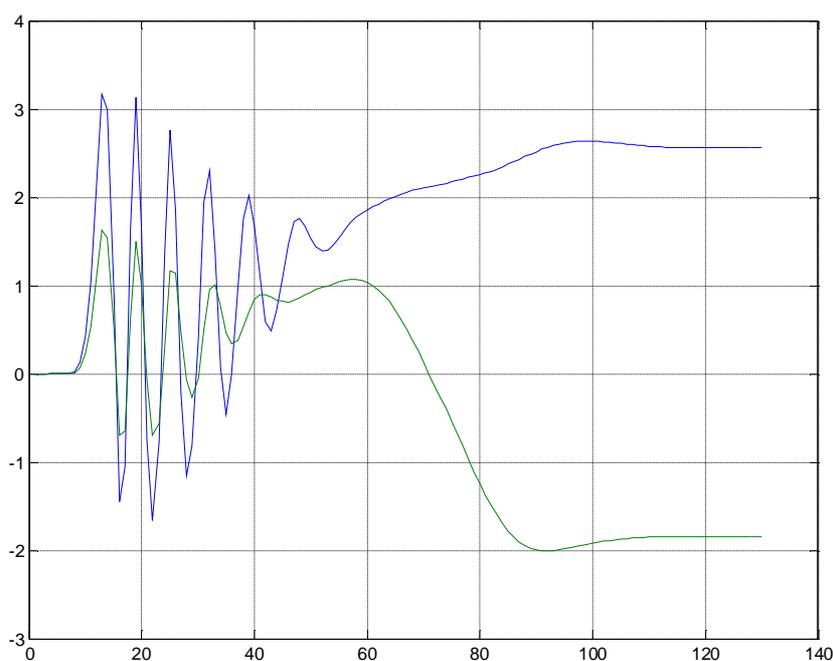


Рисунок 4 – Диаграмма изменения момента двигателя 1 и генератора 2 при пуске стенда

Литература

1. Стрижков И.Г. Электрооборудование стенда для испытания цепных передач./ И.Г. Стрижков, Е.Е. Хорьков//Ж. Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2007 - № 8. С. 28-29.

2. Стрижков И.Г. Моделирование динамических режимов электрооборудования стенда испытания роликовых цепей / И.Г. Стрижков, Е.Е. Хорьков // Труды Кубанского гос. агр. ун-та. Науч. журнал. Вып. 2(11), 2008. С. 234-238.

3. Пат. 2338170 Российская федерация. Стенд для испытания цепей / Стрижков И.Г., Стрижков С.И., Фарафонова Е.В., Хорьков Е.Е., Шакирова А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КубГАУ; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 32.

4. Пат. 2333469 Российская федерация. Стенд для испытания цепей / Стрижков И.Г., Хорьков Е.Е., Стрижков С.И. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КубГАУ; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25.

5. Пат. 2362982 Российская федерация. Стенд для испытания цепных передач с синхронными машинами / Стрижков И.Г., Бегляров Р.Р., Стрижков С.И., Трубин А.Н., Хорьков Е.Е., Чеснок Е.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КубГАУ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21.

6. Пат. 2362983 Российская федерация. Стенд для испытания цепных передач с синхронными машинами / Стрижков И.Г., Бегляров Р.Р., Стрижков С.И., Трубин А.Н., Хорьков Е.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КубГАУ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21.

7. Авт. свид. СССР 1596219. Стенд для испытания предохранительных муфт / Стрижков И.Г., Завгородний В.П. Опубл. 30.09.90 Бюл. № 36.

8. Стрижков И.Г. Статический режим электрооборудования стенда для испытания цепных передач / И.Г. Стрижков, А.Н. Трубин, Е.Е. Хорьков// Сб. трудов КубГАУ, 2008. - № 1.

9. Чиликин М.Г. и др. Теория автоматизированного электропривода/ М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер//М.: Энергия, 1979.–616 с.

10. Копылов И.П. Электрические машины.–М.: Высш. шк.; Логос; 2000.–607 с.

11. Оськин С.В. Автоматизированный электропривод / С.В. Оськин //Краснодар: Изд-во «Крон», 2013.-489 с.

12. Стрижков И.Г. Математическое описание асинхронного генератора с разветвленной статорной обмоткой / И.Г. Стрижков, В.Н. Ванурин, Я.А. Ильченко // Научный журнал КубГАУ, 2011 - № 71(07). <http://ej.kubagro.ru/2011/07pdf/29.pdf>.

References

1. Strizhkov I.G. Jelektrooborudovanie stenda dlja ispytaniya cepnyh peredach./ I.G. Strizhkov, E.E. Hor'kov//Zh. Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva, 2007 - № 8. S. 28-29.

2. Strizhkov I.G. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov jelektrooborudovanija stenda ispytaniya rolikovyh cepej / I.G. Strizhkov, E.E. Hor'kov // Trudy Kubanskogo gos. agr. un-ta. Nauch. zhurnal. Vyp. 2(11), 2008. S. 234-238.

3. Pat. 2338170 Rossijskaja federacija. Stend dlja ispytaniya cepej / Strizhkov I.G., Strizhkov S.I., Farafonova E.V., Hor'kov E.E., Shakirova A.V.; zajavitel' i paten-toobladatel' FGBOU VPO KubGAU; opubl. 10.11.2008, Bjul. № 32.

4. Pat. 2333469 Rossijskaja federacija. Stend dlja ispytaniya cepej / Strizhkov I.G., Hor'kov E.E., Strizhkov S.I. zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO Kub-GAU; opubl. 10.09.2008, Bjul. № 25.

5. Pat. 2362982 Rossijskaja federacija. Stend dlja ispytaniya cepnyh peredach s sinhronnymi mashinami / Strizhkov I.G., Begljarov R.R., Strizhkov S.I., Trubin A.N., Hor'kov E.E., Chesnjuk E.N.; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO KubGAU; opubl. 27.07.2009, Bjul. № 21.

6. Pat. 2362983 Rossijskaja federacija. Stend dlja ispytaniya cepnyh peredach s sinhronnymi mashinami / Strizhkov I.G., Begljarov R.R., Strizhkov S.I., Trubin A.N., Hor'kov E.E.; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO KubGAU; opubl. 27.07.2009, Bjul. № 21.

7. Avt. svid. SSSR 1596219. Stend dlja ispytanija predohranitel'nyh muft / Strizhkov I.G., Zavgorodnij V.P. Opubl. 30.09.90 Bjul. № 36.
8. Strizhkov I.G. Sticheskiy rezhim jelektooborudovanija stenda dlja ispytanija cepnyh peredach / I.G. Strizhkov, A.N. Trubin, E.E. Hor'kov // Sb. trudov KubGAU, 2008. - № 1.
9. Chilikin M.G. i dr. Teorija avtomatizirovannogo jelektoprivoda/ M.G. Chilikin, V.I. Kljuhev, A.S. Sandler // M.: Jenergija, 1979.–616 s.
10. Kopylov I.P. Jelektricheskie mashiny.–M.: Vyssh. shk.; Logos; 2000.–607 s.
11. Os'kin S.V. Avtomatizirovannyj jelektoprivod / S.V. Os'kin // Krasnodar: Izd-vo «Kron», 2013.–489 s.
12. Strizhkov I.G. Matematicheskoe opisanie asinhronnogo generatora s razvetv-lennoj statornoj obmotkoj / I.G. Strizhkov, V.N. Vanurin, Ja.A. Il'chenko // Nauchnyj zhurnal KubGAU, 2011 - № 71(07). <http://ej.kubagro.ru/2011/07pdf/29.pdf/>.