нежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Гиевский Алексей Михайлович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: aleksej.gievskij@mail.ru.

Баскаков Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: vasich2@yandex.ru.

Подорванов Даниил Алексеевич – лаборант кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Authors credentials

Affiliations

Chernyshov Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: lexa-c@yandex.ru.

Orobinsky Vladimir – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Gievsky Aleksey – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: aleksej.gievskij@mail.ru.

Baskakov Ivan – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: vasich2@yandex.ru.

Podorvanov Daniil A. – Laboratory Assistant, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию (Received): 09.12.2021 Принята к публикации (Accepted): 20.12.2021

УДК 621.311.24

DOI: 10.35887/2305-2538-2021-6-67-76

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ПРОГРАММЕ SIMINTESCH

¹Пилев Сергей Николаевич

¹Еремин Михаил Юрьевич

¹Аксенов Игорь Игоревич

¹Афонищева Дарья Дмитриевна

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

Реферат. Актуальной является проблема обеспечения информацией о реальной частоте вращения ротора и электромагнитном моменте электродвигателя косвенным путем, с помощью расчетов по математической модели электродвигателя, используя только сравнительно просто измеряемые его параметры, такие как токи обмоток статора и напряжение питания. Задача

состоит в том, чтобы по известному значению измеряемых и управляющих параметров определить текущие значения переменных состояния электродвигателя (токи, потокосцепления, частота вращения). Рассмотрена возможность построения компьютерной модели наблюдателя на основе фильтра Калмана с помощью программного комплекса SimInTech. В основу наблюдателя на базе фильтра Калмана положена модель, которая совпадает с математической моделью объекта управления. Каждый шаг работы фильтра Калмана подразделяется на два этапа. Первый представляет собой предсказание (экстраполяцию) состояния динамического объекта и предсказание матрицы ковариации на основании полученных данных о состоянии объекта на предыдущем шаге. Вторым этапом состоит из уточнения (коррекции) предсказанного значения с использованием данных текущих измерений токов и напряжений электродвигателя и вычисления матрицы усиления Калмана. Для реализации данного наблюдателя в программном комплексе SimInTech был разработан соответствующий блок. Алгоритм оценки частоты вращения ротора реализован в виде программного модуля. Проверка работоспособности данного наблюдателя осуществлялась при рассмотрении задачи пуска электродвигателя мощностью 3 кВт, она показала, что наблюдаемая частота отклоняется от реальной при переходном процессе, в установившемся режиме работы отклонений практически нет. Негативным фактором, обуславливающим трудность использования таких простейших наблюдателей на основе фильтра Калмана, является необходимость эмпирического подбора матриц для каждого конкретного электродвигателя.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, частота вращения, наблюдатель состояния, математическая модель, программный модуль, матрица.

SIMULATION OF AN ASYNCHRONOUS STATE OBSERVER ELECTRIC MOTOR BASED ON THE KALMAN FILTER IN THE SIMINTECH PROGRAM

¹Pilyaev Sergey

¹Eremin Mikhail

¹Aksenov Igor

¹Afonicheva Daria

¹ FSBEI HE «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great»

Abstract. An urgent problem is to provide information about the actual rotational speed of the rotor and the electromagnetic torque of the electric motor indirectly, using calculations based on the mathematical model of the electric motor, using only its relatively simple measured parameters, such as the currents of the stator windings and the supply voltage. The task is to determine the current values of the state variables of the electric motor (currents, flow couplings, rotational speed) by a known value of the measured and control parameters. The possibility of constructing a computer model of an observer based on the Kalman filter using the SimInTech software package is considered. The observer based on the Kalman filter is based on a model that coincides with the mathematical model of the control object. Each step of the Kalman filter operation is divided into two stages. The first one is a prediction (extrapolation) of the state of a dynamic object and a prediction of the covariance matrix based on the data obtained about the state of the object at the previous step. The second stage consists of refining (correcting) the predicted value using data from current measurements of electric motor currents and voltages and calculating the Kalman gain matrix. To implement this observer, a corresponding block was developed in the SimInTech software package. The algorithm for estimating the rotor speed is implemented in the form of a software module. Checking the operability of this observer was carried out when considering the task of starting an electric motor with a power of 3 kW, it showed that the observed frequency deviates from the real one during the transition process, there are practically no deviations in the steady-state operation mode. A negative factor causing the difficulty of using such simple observers based on the Kalman filter is the need for empirical selection of matrices for each specific electric motor.

Keywords: asynchronous electric motor, rotational speed, state observer, mathematical model, software module, matrix.

Введение. При всем разнообразии схем частотного управления асинхронными электроприводами общим для них является наличие двух замкнутых контуров автоматического регулирования частоты вращения ротора и электромагнитного вращающего момента электродвигателя [1, 2, 3, 4]. Для функционирования этих замкнутых систем регулирования требуется сигнал обратной связи, который обычно обеспечивается соответствующими датчиками частоты вращения или положения ротора, напряжения и тока обмоток статора. Если измерение электрических параметров не вызывает значительных проблем, то измерение частоты или положения ротора электродвигателя в ряде технологических установок весьма затруднено, а иногда и практически невозможно. Отсутствие информации о реальной частоте вращения ротора весьма снижает качество системы управления электроприводом [4, 5, 6, 7, 8]. Поэтому весьма актуальной является проблема обеспечения информацией о реальной частоте вращения ротора и электромагнитном моменте электродвигателя косвенным путем, с помощью расчетов по математической модели электродвигателя, используя только сравнительно просто измеряемые его параметры, такие как токи обмоток статора и напряжение питания. Математически, согласно теории управления, частотно управляемый асинхронный электропривод может быть представлен в виде следующих матричных уравнений [9, 10, 11, 12]:

$$\begin{cases} \frac{d[X]}{dt} = [A][X] + [B][U]; \\ [Y] = [C][X], \end{cases} \quad (1)$$

где $[X]$ – вектор переменных состояния электродвигателя (токи, потокосцепления, частота вращения);

$[A], [B], [C]$ – матрицы коэффициентов, соответствующих выбранной модели электродвигателя;

$[U]$ – вектор входных воздействий (напряжения питания);

$[Y]$ – вектор измеряемых выходных параметров, который доступен наблюдению и обработке.

Задача состоит в том, чтобы по известному значению измеряемых параметров $[Y]$ и управляющих параметров $[U]$ определить текущие значения переменных $[X]$. Как известно [10, 11, 12], такая задача относится к классу обратных некорректных задач и не имеет точного аналитического решения. Поэтому все известные способы и алгоритмы эффективной оценки параметров и переменных состояния асинхронных двигателей регулируемых электроприводов основаны на использовании априорной информации о наблюдаемом объекте и используют различные алгоритмы приближенных вычислений [11, 12, 13]. Устройства, или программные компоненты, выполняющие данные функции получили название наблюдающие устройства, или просто наблюдатели («estimation») [9, 10, 11, 12]. В литературе описано достаточно большое количество наблюдателей состояния асинхронного электродвигателя, основанных на различных алгоритмах [9, 10, 11, 12]. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, свои уровни робастности и области применения, и так далее. Идеального, общепринятого наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя не существует.

Из-за сложности и нелинейности системы частотного управления наиболее предпочтительным методом их разработки и исследования является построение компьютерных моделей системы управления электропривода с учетом рассматриваемого наблюдателя. Для моделирования динамических процессов в электроприводе используется достаточно много программных продуктов [5, 6, 11, 13, 14], однако, среди подобных информационных систем компьютерного моделирования в последнее время широкое распространение получила отечественная разработка SimInTech [5, 7, 15]. Одним из достоинств SimInTech является возможность программирования и отладки внешней целевой системы управления (контроллера) с использованием стандартизированного программного кода, автоматически полученного в SimInTech. Поэтому, в качестве примера, рассмотрим возможность построение компьютерной модели наблюдателя на основе фильтра Калмана [10] с помощью данного программного комплекса.

Характерная особенность наблюдателя на основе фильтра Калмана заключается в том, что связь переменных состояния с данными измерений – только статистическая. В этом случае математическая модель частотно управляемого асинхронного электродвигателя (1) представляется в виде системы:

$$\begin{cases} \frac{d[X]}{dt} = [A][X] + [B][U] + [W(t)]; \\ [Y] = [C][X] + [V(t)], \end{cases} \quad (2)$$

где $[W(t)]$ – вектор случайных воздействий на объект в оценке параметров состояния;

$[V(t)]$ – вектор случайных помех, сопровождающих измерение заданных параметров.

В общем случае эти векторы считаются случайными процессами типа белого шума с нулевыми математическими ожиданиями.

В основу наблюдателя на базе фильтра Калмана положена модель, которая совпадает с математической моделью объекта управления:

$$\begin{cases} \frac{d[\tilde{X}]}{dt} = [A][\tilde{X}] + [B][U] + [K]([Y] - [\tilde{Y}]); \\ [\tilde{Y}] = [C][\tilde{X}], \end{cases} \quad (3)$$

где $[\tilde{X}]$ – наблюдаемые переменные состояния объекта;

$[Y]$ – реальные измеряемые параметры (токи статора);

$[\tilde{Y}]$ – наблюдаемые токи статора;

$[K]$ – матричный коэффициент усиления фильтра Калмана.

При постоянной частоте вращения ротора, рассматривая асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат $\alpha\beta$, можно записать векторы и матрицы уравнения (2) и (3) в следующем виде:

$$[A] = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & a_2 & a_3\omega_r & 0 \\ 0 & -a_1 & -a_3\omega_r & a_2 & 0 \\ a_4 & 0 & a_5 & -p\omega_r & 0 \\ 0 & a_4 & p\omega_r & a_5 & 0 \\ -k_m\Psi_\beta & k_m\Psi_\alpha & k_m i_\beta & -k_m i_\alpha & -k_f/J \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; [X] = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \\ \omega_r \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [U] = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}; [Y] = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix};$$

$$a_1 = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}; a_2 = \frac{1-\sigma}{\sigma L_m T_r}; a_3 = p \frac{1-\sigma}{\sigma L_m}; a_4 = \frac{L_m}{T_r}; a_5 = -\frac{1}{T_r}; T_r = \frac{L_r}{R_r};$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}; b_1 = \frac{1}{\sigma L_s}; k_m = \frac{3p}{4J},$$

где i_α, i_β – токи в обмотках статора в модели по координатам $\alpha\beta$, А;

Ψ_α, Ψ_β – потокосцепления обмоток статора в модели по координатам $\alpha\beta$, Вб;

ω_r – частота вращения ротора, с⁻¹;

U_α, U_β – напряжения обмоток статора, В;

p – число пар полюсов обмотки статора;

k_f – коэффициент вязкого трения нагрузки;

J – момент инерции ротора, кг·м²;

R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора, Ом;

L_s, L_r, L_m – индуктивности обмоток статора и ротора, и индуктивность контура намагничивания, Гн.

Как известно, фильтр Калмана является оптимальным рекурсивным алгоритмом, который обеспечивает минимальную дисперсию в оценке переменных состояния для линейных систем [10]. Термин «рекурсивный» обозначает то, что для расчета текущих оценок требуется знание о состоянии системы только на предыдущем шаге. Поэтому дифференциальные уравнения заменяются разностными, где период дискретизации, как правило, равен шагу численного интегрирования Δt уравнений модели (3). В этом случае, решая систему уравнений (3) методом Эйлера, получим для каждого k -го шага интегрирования уравнения модели наблюдателя в виде:

$$\begin{cases} [\tilde{X}_k] = ([I] + \Delta t[A])[\tilde{X}_{k-1}] + \Delta t[B][U_{k-1}] = F([\tilde{X}_{k-1}]) + \Delta t[B][U_{k-1}]; \\ [\tilde{Y}_k] = [C][\tilde{X}_{k-1}] = h([\tilde{X}_{k-1}]), \end{cases} \quad (5)$$

где $[I]$ – единичная матрица;

Δt – период дискретизации (интегрирования), с.

Несмотря на то, что алгоритм фильтра Калмана ограничен линейными системами на практике наибольшее распространение для применения в электроприводе получил расширенный фильтр Калмана, который может использоваться и для нелинейных систем. В этом случае требуется только, чтобы матрицы модели наблюдателя были дифференцируемы по переменным состояния объекта $[X]$. Тогда функции F и h заменяются матрицами их якобиан [10]:

$$[F] = \frac{\partial F([\tilde{X}])}{\partial [\tilde{X}]}; \quad [H] = \frac{\partial h([\tilde{X}])}{\partial [\tilde{X}]} \quad (6)$$

Для асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, согласно выражениям (4), данные матрицы будут иметь вид:

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 + \Delta t a_1 & 0 & \Delta t a_2 & \Delta t a_3 \omega_r & \Delta t a_3 \Psi_\beta \\ 0 & 1 + \Delta t a_1 & -\Delta t a_3 \omega_r & \Delta t a_2 & -\Delta t a_3 \Psi_\alpha \\ \Delta t \cdot a_4 & 0 & 1 - \Delta t a_5 & -\Delta t p \omega_r & -\Delta t \Psi_\beta \\ 0 & \Delta t a_4 & \Delta t p \omega_r & 1 - \Delta t a_5 & \Delta t \Psi_\alpha \\ -k_m \Psi_\beta & k_m \Psi_\alpha & k_m i_\beta & -k_m i_\alpha & 1 - k_f / J \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$[H] = \Delta t[B],$$

Каждый шаг работы фильтра Калмана подразделяется на два этапа. Первый представляет собой предсказание (экстраполяцию) состояния динамического объекта $[\tilde{X}_k^*]$ и предсказание матрицы ковариации $[P_k^*]$ на основании полученных данных о состоянии объекта на предыдущем шаге $[\tilde{X}_{k-1}]$, $[\tilde{U}_{k-1}]$ и $[P_{k-1}]$:

$$\begin{cases} [\tilde{X}_k^*] = [F][\tilde{X}_{k-1}] + [B][\tilde{U}_{k-1}]; \\ [P_k^*] = [F][P_{k-1}][F]^T + [Q], \end{cases} \quad (8)$$

где $[P_{k-1}]$ – значение предсказания матрицы $[P_k^*]$ на предыдущем шаге;

$[F]^T$ – транспонированная матрица $[F]$;

$[Q]$ – ковариационная матрица случайных воздействий на объект.

Второй этап состоит из уточнения (коррекции) предсказанного значения с использованием данных текущих измерений токов и напряжений электродвигателя и вычисления матрицы усиления Калмана:

$$\begin{aligned}
 [K_k] &= [P_k^*][H]^T \left([H][P_k^*][H]^T + [R] \right)^{-1}; \\
 [\tilde{X}_k] &= [\tilde{X}_k^*] + [K_k]([Y_k] - [H][\tilde{X}_k^*]); \\
 [P_k] &= ([I] - [K_k][H])[P_k^*],
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где $[R]$ – ковариационная матрица случайного шума измерений;

$[K_k]$ – матрица усиления Калмана;

$[H]^T$ – транспонированная матрица $[H]$.

Для реализации данного наблюдателя в программном комплексе SimInTech был разработан соответствующий блок ЕKF, внешний вид которого и его содержание показаны на рисунке 1.

Рисунок 1 – Внешний вид (а) и структура (б) субмодели «Наблюдатель Калмана»

Алгоритм оценки частоты вращения ротора (8) и (9) реализован в виде программного модуля «ФК».

На рисунке 2 показано окно свойств блока наблюдателя частоты вращения, где задаются параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя и матрицы шума измерения $[R]$ (8) и ковариационная матрица $[Q]$ (9). Проверка работоспособности данного наблюдателя осуществлялась при рассмотрении задачи пуска двигателя мощностью 3 кВт, как это показано на рисунке 3. Как видно из представленного графика (рисунок 3а) наблюдаемая частота отклоняется от реальной при переходном процессе, в установившемся режиме работы отклонений практически нет.

Негативным фактором, обуславливающим трудность использования таких простейших наблюдателей на основе фильтра Калмана, является необходимость эмпирического подбора матриц $[R]$ и $[Q]$ для каждого конкретного электродвигателя.

Свойства : Масро5			
Свойства Общие Порты Визуальные слои			
Название	Имя	Формула	Значение ▲
Индуктивность намагничивания, Гн	Lm_k		0.217
Индуктивность рассеяния статора, Гн	Ls_k		0.229
Индуктивность рассеяния ротора, Гн	Lr_k		0.229
Шаг квантования, с	Ts_k		1E-5
Число пар полюсов	Z_k		2
Активное сопротивление статора, Ом	Rs_k		2.2
Активное сопротивление ротора, Ом	Rr_k		2.68
Матрица шума измерения	R_k	diag([0.01,0.01])	[[0.01 , 0];[0 , 0.01]]
Ковариационная матрица	Q_k	diag([1E-6,1E-6,2E-6,2E-6,1E-4])	[[1E-6 , 0 , 0 , 0 , 0];[0

Рисунок 2 – Окно свойств блока «EKF»

а)

б)

а – графическая программа в SimInTech; б – график изменения частоты вращения во времени

Рисунок 3 – Наблюдение частоты вращения при пуске электродвигателя

Незначительные изменения параметров двигателя приводят к снижению адекватности результатов оценки наблюдателя. Поэтому обычно используется расширение моделей фильтра Калмана

на другие параметры двигателя (момент или сопротивление обмоток) или усложняется структура самого наблюдателя [10, 12]. В этом случае разработанная модель может служить основой для построения более сложных робастных наблюдателей состояния асинхронного электродвигателя.

Список литературы

1. Епифанов А.П., Малайчук Л.М., Гущинский А.Г. Электропривод. С-Пб.: Изд-во «Лань», 2012. 400 с.
2. Еремин М.Ю., Афоничев Д.Н., Мазуха Н.А. Электротехника, электроника и электропривод. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. 165 с.
3. Новиков Г.В. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 498 с.
4. Пиляев С.Н., Труфанов В.В., Афоничева Д.Д. Повышение энергоэффективности технологических установок на основе скалярного управления асинхронным электроприводом // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции в 2-х ч.; Россия, Воронеж, 25 февраля 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. Ч. II. С. 127–132.
5. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Заболотная А.А. Компьютерная модель асинхронного электропривода для исследования его энергетических характеристик // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 09–10 июня 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. С. 193–200.
6. Афоничева Д.Д., Андрианов А.А. Передовые цифровые технологии в АПК // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 71-й студенческой научной конференции; г. Воронеж, февраль-июнь 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. Ч. II. С. 258–264.
7. Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н. Модель системы скалярного управления асинхронным электроприводом с экстремальным регулятором // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции; Россия, Воронеж, 29-30 апреля 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. Ч. I. С. 65–73.
8. Афоничев Д.Н., Мазуха Н.А., Ряховский А.А. Преобразователи частоты в схемах управления электродвигателями // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции; Россия, Воронеж, 29-30 апреля 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. Ч. I. С. 33–37.
9. Muhammed Fazlur Rahman and Sanjeet K. Dwivedi. Modeling, Simulation and Control of Electrical Drives. UK.: The Institution of Engineering and Technology, 2019. 741 p.
10. Калман Р.Э., Фалб П.Л., Арбиб М.А. Очерки по математической теории систем. М.: Издательство «Едиториал УРСС», 2004. 400 с.
11. Haitham Abu-Rub, Atif Iqbal, Jaroslaw Guzinski. High performance control of AC drives with MATLAB/SIMULINK. John Wiley & Sons Ltd, 2021. 621 p.
12. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://privod.news/files/nabludateli_10.16_1.pdf.
13. Калачев Ю.Н. SimInTech. Моделирование в электроприводе. М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2019. 90 с.
14. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н. Информационные системы в электроэнергетике. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. 233 с.
15. Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://help.simintech.ru>.

References

1. Epifanov A.P., Malajchuk L.M., Gushchinskij A.G. Elektroprivod. S-Pb.: Izd-vo «Lan'», 2012. 400 s.
2. Eremin M.YU., Afonichev D.N., Mazuha N.A. Elektrotehnika, elektronika i elektroprivod. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2018. 165 s.
3. Novikov G.V. CHastotnoe upravlenie asinhronnymi elektrodvigatelyami. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2016. 498 s.
4. Pilyaev S.N., Trufanov V.V., Afonicheva D.D. Povyshenie energoeffektivnosti tekhnologicheskikh ustanovok na osnove skalyarnogo upravleniya asinhronnym elektroprivodom // Tendencii

razvitiya tekhnicheskikh sredstv i tekhnologij v APK: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii v 2-h ch.; Rossiya, Voronezh, 25 fevralya 2021 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2021. CH. II. S. 127–132.

5. Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Zabolotnaya A.A. Komp'yuternaya model' asinhronnogo elektroprivoda dlya issledovaniya ego energeticheskikh harakteristik // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii; g. Voronezh, 09–10 iyunya 2020 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2020. S. 193–200.

6. Afonicheva D.D., Andrianov A.A. Peredovye cifrovye tekhnologii v APK // Molodezhnyj vektor razvitiya agrarnoy nauki: materialy 71-j studencheskoy nauchnoy konferencii; g. Voronezh, fevral'-iyun' 2020 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2020. CH. II. C. 258–264.

7. Pilyaev S.N., Afonichev D.N. Model' sistemy skalyarnogo upravleniya asinhronnym elektroprivodom s ekstremal'nym regul'yatorom // Teoriya i praktika innovacionnykh tekhnologij v APK: materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii; Rossiya, Voronezh, 29–30 aprelya 2021 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2021. CH. I. S. 65–73.

8. Afonichev D.N., Mazuha N.A., Ryahovskij A.A. Preobrazovatel' chastoty v skhemah upravleniya elektrodvigatelyami // Teoriya i praktika innovacionnykh tekhnologij v APK: materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii; Rossiya, Voronezh, 29–30 aprelya 2021 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2021. CH. I. S. 33–37.

9. Muhammed Fazlur Rahman and Sanjeet K. Dwivedi. Modeling, Simulation and Control of Electrical Drives. UK.: The Institution of Engineering and Technology, 2019. 741 p.

10. Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A. Ocherki po matematicheskoy teorii sistem. M.: Izda-tel'stvo «Editorial URSS», 2004. 400 s.

11. Haitham Abu-Rub, Atif Iqbal, Jaroslaw Guzinski. High performance control of AC drives with MATLAB/SIMULINK. John Wiley & Sons Ltd, 2021. 621 r.

12. Kalachev YU.N. Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://privod.news/files/nabludateli_10.16_1.pdf.

13. Kalachev YU.N. SimInTech. Modelirovanie v elektroprivode. M.: Izd-vo DMK-Press, 2019. 90 s.

14. Afonichev D.N., Pilyaev S.N. Informacionnye sistemy v elektroenergetike. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2017. 233 s.

15. Spravochnaya sistema SimInTech [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://help.simintech.ru>.

Сведения об авторах:

Принадлежность к организации

Пилиаев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Еремин Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: emu69@yandex.ru.

Аксенов Игорь Игоревич – старший преподаватель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: igor-aksenov1989@ya.ru.

Афоницева Дарья Дмитриевна – студент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: daria.afonicheva@yandex.ru.

Affiliation

Pilyaev Sergey – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, associate professor of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Eremin Mikhail – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, associate professor of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: emu69@yandex.ru.

Aksenov Igor – senior lecturer of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: igor-aksenov1989@ya.ru.

Afonicheva Daria – student of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: daria.afonicheva@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 08.12.2021 Принята к публикации (Accepted): 20.12.2021

УДК 629.113-592.004.58

DOI: 10.35887/2305-2538-2021-6-76-83

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ OFFLINE/ONLINE КОНТРОЛЯ РАСХОДА ТОПЛИВА И ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОТОРНОГО МАСЛА ДЛЯ ТРАКТОРОВ «БЕЛАРУС»

¹Бондаренко Ирина Иосифовна

¹Михалков Виктор Владимирович

¹Сергеев Кирилл Леонидович

^{2,3}Родионов Юрий Викторович

^{2,3}Никитин Дмитрий Вячеславович

²Скоморохова Анастасия Игоревна

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

³ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

Реферат. В настоящее время производство колесных тракторов ведется с усложнением конструкции силовых агрегатов, что увеличивает значимость своевременного технического обслуживания и качества выполнения регулировочных работ, которые оказывают непосредственное влияние на надежность автотракторной техники при эксплуатации и безопасность во время движения. Проведены лабораторные и эксплуатационные испытания на учебном тракторе Беларус-925 М и на тракторе Беларус-952, находящемся в реальных условиях эксплуатации. Установлено, что своевременное бортовое диагностирование тракторов модельного ряда «Беларус» дает возможность выявить и рассчитать срок службы узлов колесного трактора в процессе его эксплуатации без первоначальной разборки узла двигателя трактора. Рассмотрено типовое оборудование, которым оснащены современные системы, обеспечивающие инструментальный offline/online контроль расхода топлива и постоянный мониторинг рабочих режимов автотракторной техники в процессе эксплуатации. Предложены интеллектуальные датчики для систем топливной телематики для точного измерения уровня топлива в баках любых мобильных машин и стационарных емкостях. Основные контролируемые параметры: расход топлива, время и режим работы двигателя, объем и температура топлива, работа навесного оборудования, нагрузка на ось. Разработана новая методика и процесс бортового мониторинга степени выработки и определения по комплексному показателю предельной выработки ресурса моторного масла. На основании экспериментальных результатов получен математический показатель, который учитывает количество циклов пуска двигателя трактора «Беларус» и весь объем израсходованного топлива при различных режимах его работы в реальных условиях эксплуатации. Представленные в статье датчики прогнозируют рассчитываемый объем топлива в баке колесного трактора в соответствии с тарировочной таблицей, вносимой во внутреннюю память датчика при помощи сервисного комплекта организации. Выявлена величина