

В.И. Калашников /к.т.н./, В.Г. Черников, А.А. Горбунов
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБОВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Приведен сравнительный анализ способов частотного регулирования/управления асинхронного короткозамкнутого двигателя без датчика скорости: U/f с линейной характеристикой, U/f с контролем тока намагничивания и векторное регулирование без датчика скорости. Показана целесообразность применения векторного регулирования без датчика скорости в диапазоне 10:1.

Ключевые слова: частотное регулирование, бездатчиковое управление, регулируемый электропривод, механические характеристики.

Постановка проблемы

Частотно-регулируемый электропривод в настоящее время является основным типом регулируемого привода во всех отраслях промышленности. Различают скалярное и векторное регулирование скорости асинхронного привода. При скалярном управлении формируются гармонические токи двигателя. Векторное регулирование – это метод управления электрическими машинами переменного тока с вращающимся магнитным полем, формирующий гармонические токи (напряжения) фаз и обеспечивающий управление магнитным потоком ротора (моментом на валу двигателя). На практике наиболее часто применяются частотно-регулируемые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором без датчика скорости.

Особенностью асинхронного двигателя является то, что его параметры одной и той же мощности, одного и того же производителя существенно отличаются [1]. Это обстоятельство требует автоматического определения параметров привода конкретного двигателя. Для выбора системы регулирования представляет интерес сравнить различные способы частотного регулирования/управления двигателя и показать различие в определении параметров двигателя по его паспортным данным и по результатам автоматической настройки.

Анализ последних исследований и публикаций

В технической литературе достаточно подробно рассмотрены способы частотного регулирования асинхронного привода без датчика скорости [2...4], однако отсутствует анализ механических характеристик асинхронного привода для одного и того же двигателя при различ-

ных способах частотного управления в широком диапазоне изменения скорости. Также отсутствует количественный анализ различия в определении параметров конкретного двигателя по паспортным данным и при самонастройке.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа механических характеристик и зависимости тока статора от момента двигателя при различных способах регулирования/управления скорости, а также анализ отклонения параметров двигателя, определенных по паспортным данным и в результате автоматической настройки.

Основной материал исследования

Современный электропривод с микропроцессорной системой регулирования позволяет, во-первых, быстро и удобно проводить определение параметров привода, а также запоминать в виде файла все параметры; во-вторых – активизировать подпрограммы самонастройки привода, которые в автоматическом режиме помогают пользователю (инженеру-наладчику) подобрать необходимые параметры регуляторов; в-третьих – вносить необходимые изменения в систему регулирования, адаптируя ее к конкретной технологической задаче.

Удобство параметрирования и настройки современных электроприводов с помощью персонального компьютера обеспечивается современными программными пакетами, которые позволяют иметь оперативный доступ к любому параметру привода, а также получить в цифровом виде осциллограммы переходных процессов для того, чтобы можно было оценить качество настройки системы регулирования. Например,

для приводов поколения SINAMICS таким программным пакетом является программа STARTER.

Для проведения исследования частотно-регулируемых электроприводов был создан стенд, структурная схема которого приведена на рис. 1.

В основе стенда лежит спарка двух электрических машин – асинхронной машины с короткозамкнутым ротором и синхронной машины с постоянными магнитами, – установленных на одном валу, каждая из которых подключена к собственному преобразователю частоты. При такой конструкции исследуемая машина может быть нагружена регулируемым моментом посредством нагрузочной машины.

Экспериментальный стенд для исследования режимов работы современных приводов переменного тока состоит из следующих частей:

- QF1, QF2 – автоматические выключатели;
- Simatic S7-314C 2DP – программируемый логический контроллер серии S7-300 с возможностью подключения децентрализованной периферии;
- компьютер, выступающий в качестве программатора;
- CP 5611 – коммуникационный процессор для программирования логического контроллера и приводов переменного тока;
- привод Sinamics G120;
- привод Sinamics S120;
- АМ – асинхронный двигатель;
- СМ – синхронный двигатель;

- ИД – импульсный датчик;
- Profibus – промышленная информационная сеть для коммуникации компьютера, программируемого логического контроллера и приводов.

Исследуемый асинхронный двигатель имеет следующие данные: номинальная мощность $P_N=0,75$ кВт, номинальное напряжение $U_{SN}=380$ В, номинальный ток $I_{SN}=2,12$ А, коэффициент мощности $\cos\phi_N=0,8$, номинальная частота статора $f_{SN}=50$ Гц, номинальная скорость вращения вала двигателя $n_N=1395$ об/мин. В литературе [5] приведена методика расчета параметров Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 2) на основе паспортных данных.

Потокообразующая компонента вектора тока статора в номинальном режиме определяется по формуле:

$$\hat{I}_{sdN} \approx \sqrt{2} \cdot I_{sN} \cdot \sqrt{1 - \cos \phi_N}$$

Аналогично определяются: моментобразующая компонента вектора тока статора

$$\hat{I}_{sqN} \approx \sqrt{2 \cdot I_N^2 - \hat{I}_{sdN}^2};$$

абсолютное скольжение

$$\omega_{rN} = 2 \cdot \pi \cdot \left(f_N - \frac{z_p \cdot n_N}{60} \right);$$

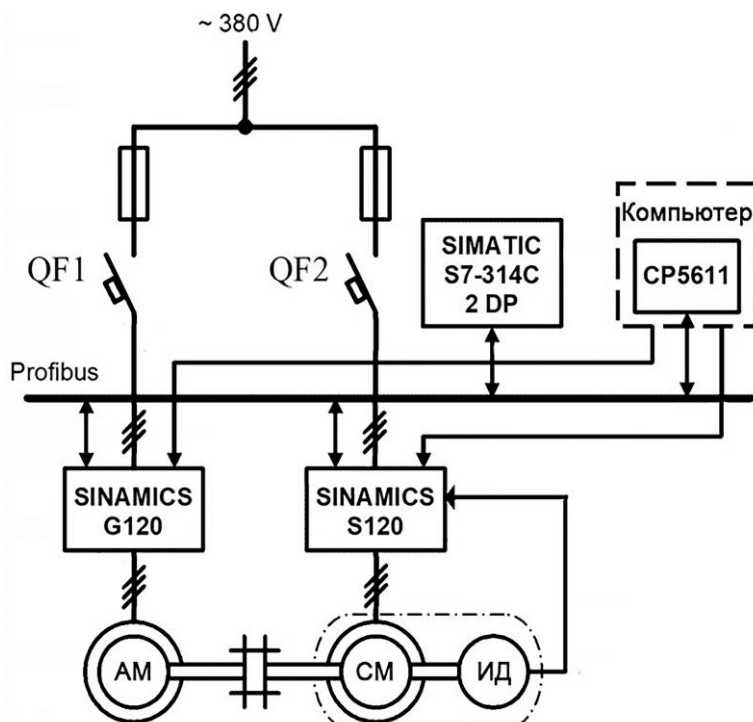


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

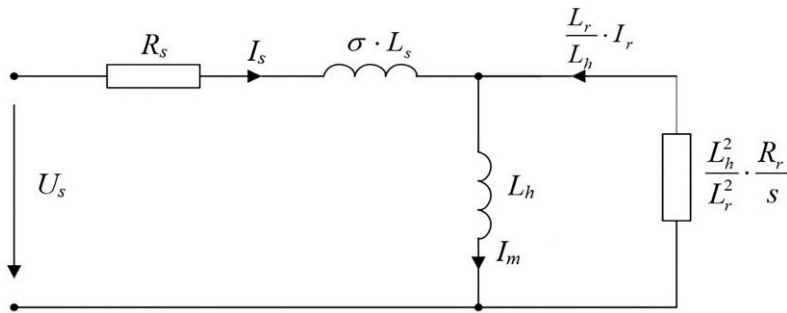


Рис. 2. Г-образная схема замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

постоянная времени ротора

$$T_r = \frac{\hat{I}_{sqN}}{\omega_{rN} \cdot \hat{I}_{sdN}};$$

индуктивное сопротивление рассеяния

$$X_\sigma \approx \left(\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \frac{\hat{I}_{sdN}}{\hat{I}_{sqN}} \right) \cdot \frac{U_{sN}}{\sqrt{3} \cdot I_{sN}};$$

индуктивное сопротивление главного контура намагничивания

$$X_h \approx \frac{\sqrt{2} \cdot U_{sN}}{\sqrt{3} \cdot \hat{I}_{sdN}} - X_\sigma;$$

активное сопротивление статора

$$R_s \approx \frac{\omega_{rN}}{2 \cdot \pi \cdot f_N} \cdot \frac{\hat{I}_{sdN}}{\hat{I}_{sqN}} \cdot X_h;$$

коэффициент рассеяния

$$\sigma \approx \frac{X_\sigma}{X_h};$$

значение главной индуктивности

$$L_h = \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f_N};$$

значение индуктивности статора

$$L_s = \frac{X_h}{(1 - \sigma) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N}.$$

В процессе исследований были рассчитаны

параметры исследуемого двигателя по выше приведенной методике, а также определены аналогичные параметры в результате автоматической настройки. Результаты этих исследований приведены в табл. 1.

Таким образом, можно сделать вывод, что расчетные и измеренные параметры конкретного асинхронного двигателя существенно отличаются друг от друга. Это обуславливает необходимость применения программной самонастройки.

В приводах поколения SINAMICS заложены следующие способы регулирования скорости:

- U/f с линейной характеристикой;
- U/f с контролем тока намагничивания (FCC);
- U/f с программируемой зависимостью;
- U/f² с квадратичной зависимостью;
- U/f для текстильных машин;
- U/f с FCC для текстильных машин;
- U/f с независимым заданием напряжения;
- векторное регулирование без датчика скорости;
- векторное регулирование с датчиком скорости;
- бездатчиковое регулирование момента;
- датчиковое регулирование момента.

В данной работе приводится анализ наиболее распространенных систем регулирования:

- U/f с линейной зависимостью;
- U/f с FCC-управлением;
- векторное регулирование без датчика скорости.

В качестве критериев регулирования принято:

- максимальный диапазон регулирования $D = \omega_{\max} / \omega_{\min}$ при номинальном моменте нагрузки;
- максимальный момент (момент вблизи момента опрокидывания);
- ток статора двигателя I_s .

Табл. 1. Сравнение расчетных и измеренных параметров асинхронного двигателя

Параметр	Измеренные параметры	Расчетные параметры	Δ
R_s	10,658 Ом	7,375 Ом	30,81 %
L_h	488,107 мГц	671 мГц	27,25 %
σ	0,065	0,098	33,67 %

Исследования проводились для частот поля статора $f=50$ Гц, $f=25$ Гц, $f=10$ Гц, $f=5$ Гц, $f=1$ Гц. На рис. 1...5 приведены механические характеристики привода $\omega_m=f(M_m)$ и зависимость

тока статора от момента двигателя $I_s=f(M_m)$ для различных систем управления/регулирования и различных значений частоты поля статора.

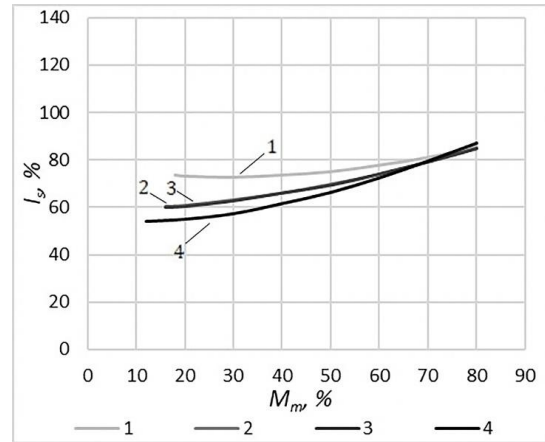
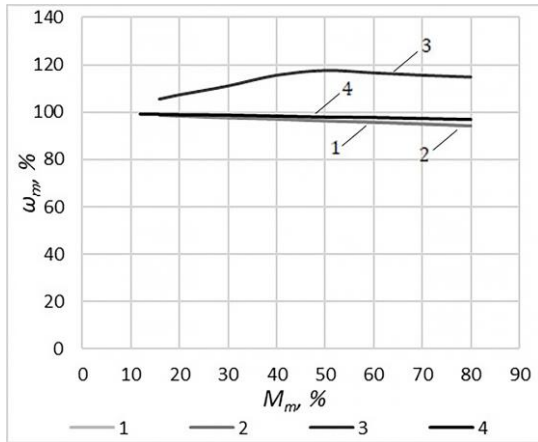


Рис. 1. Характеристики привода при частоте поля статора $f=50$ Гц для различных систем управления/регулирования:
 1 – U/f с линейной зависимостью; 2 – FCC без компенсации скольжения; 3 – FCC с компенсацией скольжения; 4 – векторное регулирование

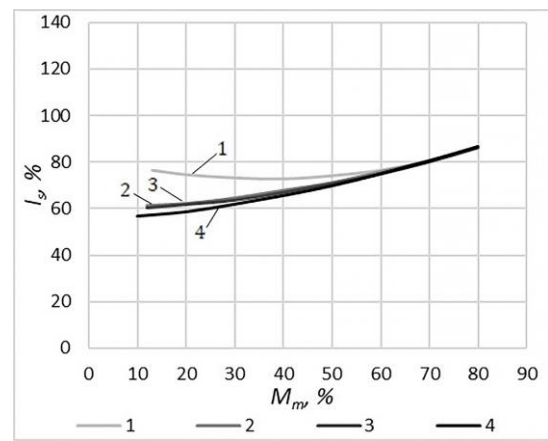
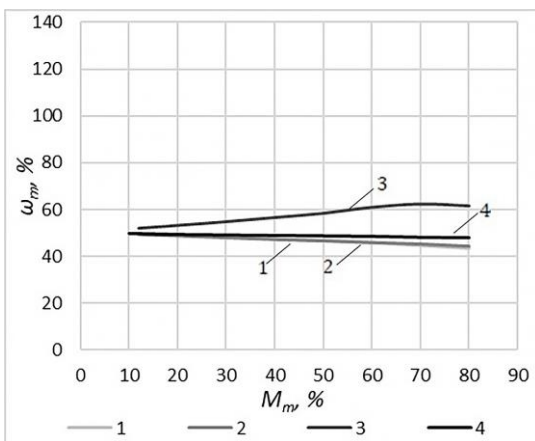


Рис. 2. Характеристики привода при частоте поля статора $f=25$ Гц для различных систем управления/регулирования:
 1 – U/f с линейной зависимостью; 2 – FCC без компенсации скольжения; 3 – FCC с компенсацией скольжения; 4 – векторное регулирование

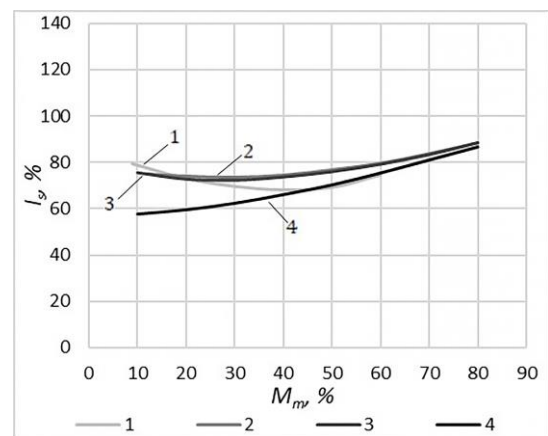
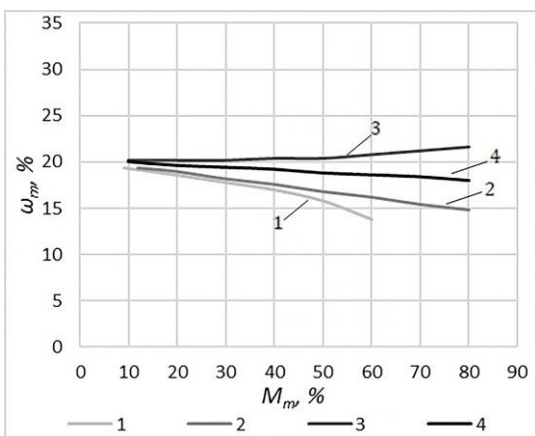


Рис. 3. Характеристики привода при частоте поля статора $f=10$ Гц для различных систем управления/регулирования:
 1 – U/f с линейной зависимостью; 2 – FCC без компенсации скольжения; 3 – FCC с компенсацией скольжения; 4 – векторное регулирование

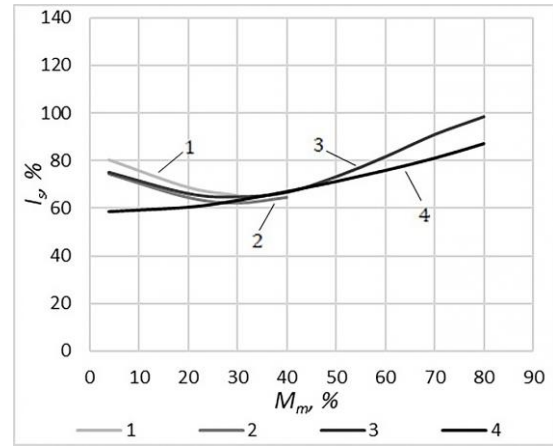
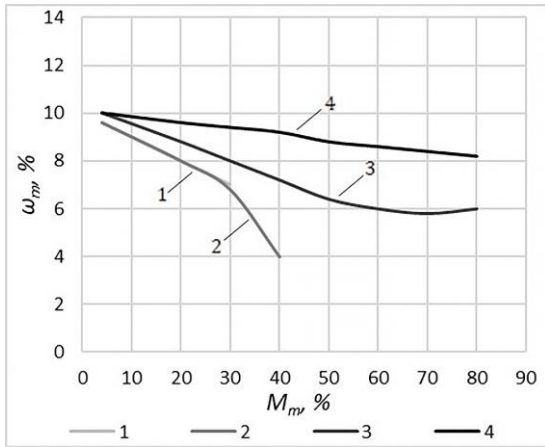


Рис. 4. Характеристики привода при частоте поля статора $f=5$ Гц для различных систем управления/регулирования:
 1 – U/f с линейной зависимостью; 2 – FCC без компенсации скольжения; 3 – FCC с компенсацией скольжения; 4 – векторное регулирование

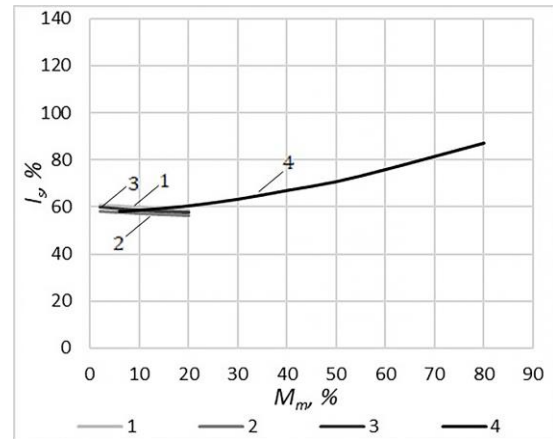
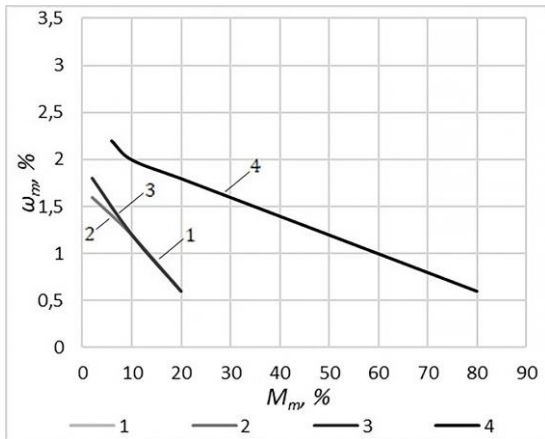


Рис. 5. Характеристики привода при частоте поля статора $f=1$ Гц для различных систем управления/регулирования:
 1 – U/f с линейной зависимостью; 2 – FCC без компенсации скольжения; 3 – FCC с компенсацией скольжения; 4 – векторное регулирование

Приведенные зависимости $\omega_m=f(M_m)$ и $I_s=f(M_m)$ однозначно свидетельствуют о преимуществе применения векторного регулирования в широком диапазоне изменения скорости как с точки зрения обеспечения развиваемого момента двигателя, так и с точки зрения минимума тока статора.

Выводы

Анализ зависимостей $\omega_m=f(M_m)$ и $I_s=f(M_m)$ частотно-регулируемого привода показывает, что при выборе способа регулирования/управления скорости предпочтение следует отдать векторному регулированию без датчика скорости как с точки зрения стабильности механической характеристики, так и с точки зрения минимума потерь в двигателе. Учитывая, что параметры конкретного асинхронного короткозамкнутого двигателя существенно отличаются от аналогичных параметров, рассчитанных по табличным данным, при сравнении рекомендуется выбирать

приводы с автоматической идентификацией параметров двигателя.

Список литературы

1. Schröder, D. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen. Auflage 4. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. – 1909 s.
2. Glumineau, A. Sensorless AC Electric Motor Control / A.Glumineau, J. de Leon Morales. – Cham: Springer, 2015. – 258 p.
3. Marino, R. Induction Motor Control Design / R.Marino, P.Tomei, M.Verrelli Cristiano. – London: Springer-Verlag, 2010. – 371 p.
4. Bin, Wu. High-Power Converters and AC Drive / Wu Bin, Narimani Mehdi. – New Jersey: IEEE Press, 2017. – 466 p.
5. Quang, Nguyen. Vector Control of Three-Phase AC Machines / Phung Quang Nguyen, Jörg-Andreas Dittrich. – Berlin: Springer-Verlag, 2015. – 374 p.

V.I. Kalashnikov /Cand. Sci. (Eng.)/, V.G. Chernikov, A.A. Gorbunov
 Donetsk National Technical University (Donetsk)

**COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF METHODS FOR FREQUENCY CONTROL
 OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE**

Background. The analysis of mechanical characteristics of an asynchronous drive for the same motor with different methods of frequency control over a wide range of speed changes allows a qualitative assessment of various control systems. Electric drives with microprocessor control systems allow determining the parameters of a specific motor automatically. The technical literature provides methods for determining engine parameters based on passport data. A comparative analysis is required to assess the difference between parameters obtained from passport data and those obtained as a result of self-tuning.

Materials and/or methods. Frequency-controlled electric drives were studied on an experimental stand. The stand is based on combining an asynchronous machine with a short-circuited rotor and a synchronous machine with permanent magnets. Each machine is connected to its own frequency converter. The investigated machine was loaded with a controlled moment through a loading machine. The parameters for the L-shaped replacement circuit of an asynchronous motor with a short-circuited rotor were calculated based on the passport data. Automatic determination of engine parameters was performed in the STARTER software package.

Results. The obtained dependences $\omega_m=f(M_m)$ and $I_s=f(M_m)$ have shown that scalar control does not provide a stable torque and engine speed over a wide range of speed changes. Vector control provides a stable torque and a set speed under load as well as a minimum stator current.

Conclusion. Analysis of the dependencies of the frequency-controlled drive $\omega_m=f(M_m)$ and $I_s=f(M_m)$ shows that vector control without a speed sensor is optimal both in terms of stability of the mechanical characteristic and in terms of minimum losses in the engine.. When comparing, it is recommended to select drives with automatic identification of engine parameters.

Keywords: frequency regulation, sensorless control, variable speed drive, speed-torque characteristics.

Сведения об авторах

В.И. Калашников

SPIN-код: 8002-9286
 Author ID: 855701
 ORCID ID: 0000-0001-5116-1486
 Телефон: +380 (71) 334-92-91
 Эл. почта: viktor_kalashnikov@donntu.org

А.А. Горбунов

Телефон: +380 (71) 331-54-83
 Эл. почта: alekseygorbunov@hotmail.com

В.Г. Черников

Телефон: +380 (71) 378-61-67
 Эл. почта: vinodel12@ukr.net

Статья поступила 10.03.2020 г.
 © В.И. Калашников, В.Г. Черников, А.А. Горбунов, 2020
 Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич