

УДК 621.316.761, 62-533.6

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_19

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВАХ СО СМЕШАННОЙ НАГРУЗКОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В.Н. Крысанов

ООО ПКФ «Современные Технологии»

Воронеж, Россия

sovteh2000@mail.ru

И.А. Хайченко

Воронежский государственный технический университет

Воронеж, Россия

ii740@yandex.ru

В.В. Бабенко

Воронежский государственный технический университет

Воронеж, Россия

vova.babenko.94@mail.ru

Ю.В. Нефедов

Воронежский государственный технический университет

Воронеж, Россия

dharma_lost@bk.ru

Исследуются вопросы реализации нормируемого государственными стандартами уровня электромагнитной совместимости статических преобразователей в сетях со смешанной нагрузкой. Рассмотрены современные производства, в рамках технологического процесса которых необходима дополнительная корректировка режима работы статических преобразователей, использующих принципы импульсно-фазового и частотно-импульсного управления. Определена критериальная оценка оптимального режима работы преобразователей с учетом таких факторов качества электроснабжения потребителей, как уровень генерации высших гармонических и колебаний напряжения. Предложен алгоритм работы системы управления статическими преобразователями типа «тиристорные регуляторы мощности», который обеспечивает основные показатели качества электроснабжения и электромагнитной совместимости во всем диапазоне регулирования выходной мощности. Разработана блок-схема системы управления тиристорными ключами тиристорных регуляторов мощности. Методологически определены основные факторы, влияющие на вели-

чину уставки перехода от режима частотно-импульсного управления к режиму импульсно-фазового управления статических регуляторов мощности. Проведено имитационное моделирование в программной среде *MatLab Simulink* на примере промышленной установки производства полимерно-композитных материалов. При моделировании изменялись параметры производственных установок (тип, мощности статических преобразователей и асинхронных двигателей), требования технологии (диапазоны регулирования и быстродействие) и системы электроснабжения (структура, установленные мощности и типы нагрузок). На основе анализа полученных результатов имитационного моделирования определено оптимальное значение сигнала на изменение режима работы тиристорных регуляторов мощности в соответствии с предложенными критериями.

Ключевые слова: алгоритм, качество электроэнергии, режимы управления статическими преобразователями, система управления, электромагнитная совместимость.

Для цитирования: Крысанов В.Н., Хайченко И.А., Бабенко В.В., Нефедов Ю.В. Алгоритм управления статических преобразователей в производствах со смешанной нагрузкой для повышения уровня электромагнитной совместимости электрооборудования // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 19-30. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_19

CONTROL ALGORITHM OF STATIC CONVERTERS IN MANUFACTURING WITH MIXED LOAD TO INCREASE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRICAL EQUIPMENT

V.N Krysanov

LLC PKF "Modern Technologies"
Voronezh, Russia
sovteh2000@mail.ru

I.A. Khaichenko

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
li740@yandex.ru

V.V. Babenko

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
vova.babenko.94@mail.ru

Y.V. Nefedov

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
dharma_lost@bk.ru

Abstract. The article discusses the implementation of the standardized level of electromagnetic compatibility of static converters in networks with mixed load. Modern production is considered, during the technological process of which additional adjustment of the operation mode of static converters using the principles of pulse-phase and frequency-pulse control is necessary. A criterion assessment of the optimal operation mode of the converters is determined taking into account factors of power quality such as the level of generation of higher harmonic and voltage fluctuations. Control algorithm for "thyristor power regulators" type static converters is proposed, which provides the main parameters of power quality and electromagnetic compatibility in the whole range of output power control. A block diagram of the thyristor key control system of the thyristor power regulators has been developed. The main factors affecting the setting value of the transition from the frequency-pulse control mode to the pulse-phase control mode of static power regulators are methodologically determined. Simulation modeling in MatLab Simulink on the example of the plant of production of polymeric and composite materials have been carried out. During the simulation, the parameters of production plants (type, capacities of static converters and asynchronous motors), technology requirements (control ranges and speed) and power supply systems (structure, installed capacities and types of loads) have been varied. Based on analysis of obtained results of simulation, optimal value of signal for change of operation mode of thyristor power regulators is determined in accordance with proposed criteria.

Keywords: algorithm, control system, power quality, electromagnetic compatibility, static converter control modes.

For citation: V.N Krysanov, I.A. Khaichenko, V.V. Babenko and Y.V. Nefedov. Control algorithm of static converters in manufacturing with mixed load to increase electromagnetic compatibility of electrical equipment // *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 19-30, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_19

I. Введение

Технология многих промышленных предприятий предполагает использование разнотипной электрической нагрузки: асинхронные электродвигатели (АД), термические и гальванические установки, индукционные печи и т.д. Питание таких потребителей электроэнергии (ЭЭ) зачастую осуществляется через статические преобразователи, от одной системы электропитания (СЭС), от одной цеховой подстанции. Режимы потребления ЭЭ, в соответствии с технологическими циклами, у потребителей изменяются независимо друг от друга. В случае, когда СЭС не имеет необходимого запаса установленной мощности трансформатора цеховых подстанций, как

правило, возникают проблемы качества ЭЭ и электромагнитной совместимости (ЭМС) для потребителей по ряду нормативных показателей: уровень высших гармонических, колебания напряжения, уровень асимметрии напряжения, токов и т.д. [1-3].

Наиболее частым случаем является невыполнение критерия качества функционирования потребителей ЭЭ при воздействии электромагнитных помех от работы, например, управляемых выпрямителей или тиристорных регуляторов мощности (создающих мощные электромагнитные помехи). При этом происходит ухудшение функциональных характеристик параллельно работающим асинхронным двигателям во время воздействия помех. Хотя после прекращения воздействия функционирование полностью восстанавливается без каких-либо дополнительных мероприятий, это приводит к ухудшению технико-экономических характеристик производства в целом.

II. Цели и задачи исследования

Учитывая широкое использование статических преобразователей для регулирования разнообразных параметров технологического процесса современных производств, актуальным вопросом является определение путей обеспечения нормативных условий электромагнитной совместимости электрооборудования.

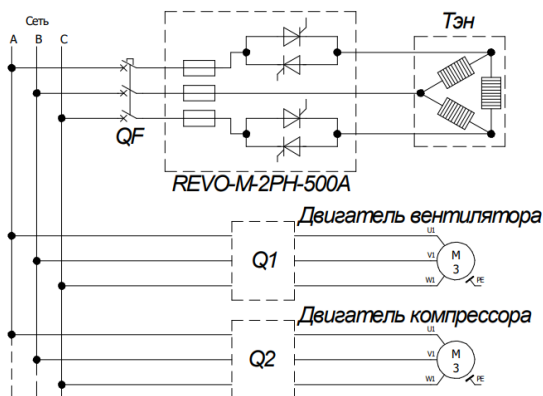


Рис. 1. Схема подключения группы силовых элементов установки автоклава

Fig. 1. Connection diagram of the group of power elements of the autoclave installation

Для анализа данной проблемы в качестве примера будет рассмотрен такой энергоемкий технологический процесс, как автоклавное производство композитных материалов. В типовой установке автоклава присутствуют: станция управления, мощные термоэлектрические нагреватели (управляемые тиристорными регуляторами мощности – ТРМ), асинхронные двигатели вентилятора и компрессора (рис. 1) [4, 5].

Источником электромагнитных помех в данной установке является тиристорный регулятор мощности (ТРМ), который может работать в двух режимах управления. В первом режиме импульсно-фазового управления (ИФУ), изменение нагрева реализуется изменением продолжительности включенного состояния тиристоров в течении каждого полупериода питающего напряжения сети. В этом режиме в питающей сети генерируются высшие гармонические напряжения, вызывающие сбои систем управления и дополнительные потери электроэнергии в силовом оборудовании [6]. Поэтому в управлении ТРМ зачастую используется алгоритм работы тиристорных ключей в формате частотно-импульсного режима. В основе второго (частотно-импульсного) режима управления (ЧИУ) ТРМ лежит алгоритм изменения количества полных интервалов (синхронизированных по напряжению сети) включенного и выключенного состояния термоэлектрических нагревателей (ТЭН).

Включение тиристорных ключей реализуется только в начале выbranного полупериода сетевого напряжения, что исключает появление высших гармонических тока и напряжения. Однако при реализации всего диапазона регулирования ТРМ возникают значительные субгармонические колебания напряжения с частотой 5-25 Гц (фликер), оказывающие негативное воздействие на асинхронные двигатели всего цеха. Влияние такой электромагнитной помехи существенно в случае небольших производств, с ограниченной мощностью цеховой подстанции по отношению к мощности всех потребителей цеха.

III. Решение поставленной задачи

Решение проблемы находится в плоскости выбора экономически обоснованных технических решений, направленных на улучшение характеристик ЭМС электрооборудования, в частности, на асинхронные электродвигатели.

Зачастую нет финансовой и технической возможности значительно увеличить мощность цеховой подстанции или обеспечить раздельное питание статических регуляторов мощности и асинхронных электроприводов. И тогда целесообразно предусмотреть дополнительные технические решения, направленные на улучшения параметров электромагнитной совместимости статических преобразователей в сетях со смешанной нагрузкой.

Так, для промышленных производств, положительный эффект на качество ЭМС оказывает вариант реализации средств индивидуальной компенсации реактивной мощности, позволяющий не только снизить потери ЭЭ от циркуляции реактивных токов в системе электроснабжения, но и значительно уменьшить уровень высших гармонических напряжения [7]. Однако, с учетом затрат на реализацию данного варианта (динамическая компенсация на основе тиристорных конденсаторных установок требует вложений более 42 руб. на каждый кВАр компенсируемой мощности АД), предложено менее затратное техническое решение. Оно находится не в аппаратной (как правило, затратной), а в алгоритмической плоскости.

IV. Теоретическая часть

В рамках существующей структуры силовой части ТРМ группы нагревателей (рис. 1) предложена реализация специального алгоритма, совмещающего основной режим (ЧИУ) работы тиристорных ключей с режимом ИФУ. Структура системы управления, реализующая предложенный алгоритм, основывается на имеющихся типовых блоках системы управления тиристорными ключами (ТК), обеспечивающих описанные выше режимы импульсно-фазового управления (БИФУ) и частотно-импульсного управления (БЧИУ) (рис. 2).

Алгоритм обеспечивает оптимальное (по критерию минимума генерации высших гармонических и уровня субгармонических колебаний напряжения на асинхронной нагрузке) соотношение работы ТРМ в режимах ИФУ и ЧИУ.

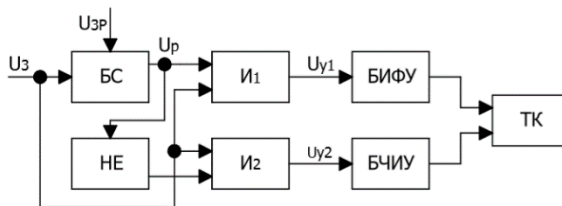


Рис. 2. Блок-схема системы управления тиристорными ключами ТРМ

Fig. 2. Block diagram of the thyristor power regulator's thyristor key control system

При формировании такого алгоритма использовалась методика многофункционального анализа: параметров производственных установок (тип, мощности статических преобразователей и асинхронных двигателей), требований технологии (диапазоны регулирования и быстродействие) и системы электроснабжения (структура, установленные мощности и типы

нагрузок). Реализация подобной методики исследования работы статических преобразователей типа ТРМ (управляемых выпрямителей, тиристорных регуляторов напряжения, устройств плавного пуска) на нагрузку, дают возможность, в первом приближении, определить некий порог перехода от одного режима управления к другому [8, 9]. Этот переход осуществляется при сравнении сигналов задания выходного параметра (действующее значение напряжения на выходе ТРМ) U_z и сигнала задания режима $U_{зр}$ (определяется для конкретного варианта) в блоке сравнения БС. На его выходе формируется дискретный сигнал U_p , который, благодаря логическим элементам «НЕ», «И1», «И2», определяет зону прохождения аналоговых сигналов управления U_{y1} , U_{y2} для блоков БИФУ и БЧИУ.

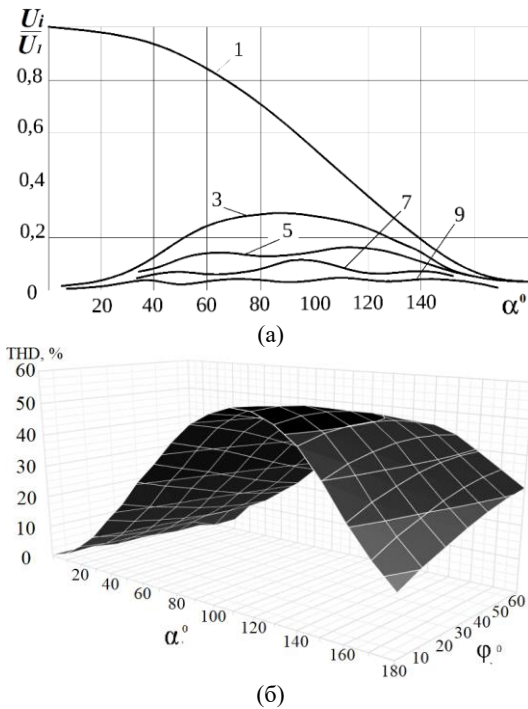


Рис. 3. Зависимости уровня нечетных гармоник напряжения №№ 1-9 (а) и THD напряжения (б) от угла нагрузки и угла управления α в режиме ИФУ

Fig. 3. Dependences of the level of odd voltage harmonics no. 1-9 (a) and voltage THD (b) on the load angle and control angle α in the pulse-phase control mode

Переход работы от одного режима к другому определяется следующими условиями:

Если $U_3 \leq U_{зр}$, то $U_p = 1$ и функционирует режим ИФУ.

Если $U_3 > U_{зр}$, то $U_p = 0$ и функционирует режим ЧФУ.

Для количественной оценки эффективности предложенного алгоритма управления ТРМ и определения оптимальных пороговых значений $U_{зр}$, было проведено имитационное моделирование в программной среде *MatLab Simulink*. Для примера взята промышленная установка автоклавирования *D-48653*, имеющая две группы термоэлектрических нагревателей с *ТРМ REVO M 2Ph* (диапазон регулирования напряжения 24-1000 В, токовая нагрузка – до 500 А) производства *CD Automation* (Италия), каждая мощностью $P = 275$ кВт, вентилятор с асинхронным электроприводом мощностью 45 кВт, запитанные на напряжении 380 В от цеховой подстанции мощностью 630 кВА. С помощью программного блока *Fast fourier transform* были получены данные спектрального состава и суммарного коэффициента ТДН напряжения на шинах питания установки автоклавирования в режиме ИФУ (рис. 3).

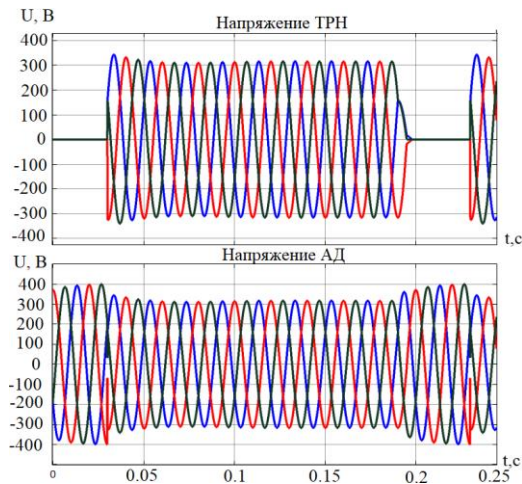


Рис. 4. Диаграмма напряжений $U_{сг}$ на выходе ТРМ в режиме ЧИУ и на входе АД

Fig. 4. Voltage diagram $U_{сг}$ at the thyristor power regulator output in the frequency-pulse control mode and at the input of the asynchronous motor

Имитационное моделирование для всех вариаций режимов работы ТРМ, АД и мощности питающей цеховой подстанции дает возможность

оценки величины субгармонических колебаний напряжения U_{cr} на входе АД при режиме ЧИУ (пример работы ТРМ в режиме 80 % номинальной мощности, тактовый интервал в 10 периодов напряжения при включенных ТЭН в течении 8 периодов напряжения (рис. 4).

Анализ полученных результатов имитационного моделирования позволяет определить оптимальное значение сигнала задания режима $U_{зр}$, в соответствии с ранее предложенными критериями, в пределах $(0,2-0,35) U_3$ max. При этом уровень коэффициента нелинейных искажений от высших гармонических ТНД и субгармонических колебаний напряжения U_{cr} на выходе ТРМ не превышает нормативные показатели ($THD \leq 8 \%$, $U_{cr} \leq 10\%$) во всем диапазоне регулирования мощности ТЭН автоклава, в соответствии с ГОСТ [1, 2].

VI. Практическая значимость

Основные практические результаты состоят в части реализации проектными и производственными организациями, занимающимися разработкой, модернизацией и выпуском статических преобразователей рассмотренного выше типа, схемотехнических решений по использованию предложенного алгоритма оптимального, с точки зрения ЭМС и режима их работы. Реализация предложенных аппаратных решений позволяет получить значительный технический и экономический эффект на уровне широкого класса энергоемких промышленных производств.

VII. Заключение

Для достижения нормируемого уровня ЭМС электрооборудования в производствах со смешанной нагрузкой необходима дополнительная корректировка режима работы статических преобразователей.

При критериальной оценке оптимального (с точки зрения норм ЭМС) режима работы целесообразен учет не только энергоэкономических факторов, но и связанных с ними факторов качества электроснабжения потребителей – уровня генерации высших гармонических и колебаний напряжения. Для статических преобразователей, использующих принципы импульсно-фазового и частотно-импульсного управления целесообразно реализовать возможность изменения типа управления в режиме реального времени технологического процесса.

Предложен алгоритм работы системы управления статическими преобразователями типа ТРМ, обеспечивающий основные нормируемые показатели качества ЭМС во всем диапазоне регулирования мощности: $THD \leq 8 \%$, $U_{cr} \leq 10 \%$.

Определены методика выбора и основные факторы влияния на величину уставки перехода от режима частотно-импульсного управления к режиму импульсно-фазового управления статических регуляторов мощности. Как правило, величину уставки изменения режима, целесообразно задавать в диапазоне $(0,2-0,35) U_{з \max}$.

© Крысанов В.Н., 2021

© Хайченко И.А., 2021

© Бабенко В.В., 2021

© Нефедов Ю.В., 2021

Поступила в редакцию 24.02.2021

Received 24.02.2021

Библиографический список

- [1] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
- [2] ГОСТ 30804.3.11-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 75 А (в одной фазе), подключаемые к низковольтным системам электроснабжения при определенных условиях. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартиформ, 2020. – 12 с.
- [3] ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. Введ. 2012-09-01. М.: Стандартиформ, 2020. – 56 с.
- [4] Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3 (20). С. 20–26.
- [5] Крысанов В.Н., Нефедов Ю.В., Романов А.В. Контроль параметров электромагнитной совместимости модернизированного оборудования автоклавной установки // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15. № 2. С. 77-81. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.009.
- [6] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б. Исследования влияния несинусоидальности питающего напряжения на энергетические характеристики асинхронного двигателя // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2014. № 2. С. 6-11.
- [7] Нефедов Ю.В., Хайченко И.А., Бабенко В.В. Повышение энергоэффективности силового оборудования автоклавных установок // *Межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы и современные тенденции развития науки: от теоретических парадигм к практике»*. М.: НИЦ МИСИ, 2020.
- [8] Крысанов В.Н. Зависимость гармонического состава напряжений высоковольтного регулятора от режимов управления // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2009. № 3. С. 16-18.

- [9] Крысанов В.Н., Кирилов А.Б., Дурнев С.А. Анализ гармонического состава выходного напряжения математической модели статического регулятора // Труды Всерос. студ. науч.-техн. конф. «Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники». Инженерные идеи XXI века. Воронеж: ВГТУ, 2013. С. 157-159.

References

- [1] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [2] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Voltage fluctuations and flicker caused by equipment with rated current 75 A (per phase) connected to low-voltage supply systems under certain conditions. Limits and test methods. GOST 30804.3.11-2013, Jan. 2014.
- [4] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Terms and definitions. GOST R 50397-2011, Sept. 2012.
- [4] M.I. Dushin, A.V. Khrulkov and R.R. Mukhametov, "Selected technological parameters for the autoclave molding of polymer composites materials", *Aviation Materials and Technologies*, no. 3 (20), pp. 20-26, 2011.
- [5] V.N. Krysanov, Yu.V. Nefedov and A.V. Romanov, "EMC parameters control of modernized equipment of autoclave installation", *Bulletin of Voronezh State Technical University*, vol. 15, no. 2, pp. 77-81, 2019. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.009.
- [6] V.N. Krysanov and A.B. Kirilov, "Issledovanie vliyaniya nesinusoidal'nosti pitayushchego napryazheniya na energeticheskie harakteristiki asinhronnogo dvigatelya [Research on the effect of non-sinusoidity of supply voltage on the energy characteristics of an asynchronous motor]", *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya [Electrical Complexes and Control Systems]*, no. 2. pp. 6-11, 2014 (in Russian).
- [7] Yu.V. Nefedov, I.A. Khaychenko and V.V. Babenk, "Povyshenie energoeffektivnosti silovogo oborudovaniya avtoklavnyh ustanovok [Improving energy efficiency of power equipment of autoclave plants]", in proc. *Int. conf. «Aktual'nye problemy i sovremennye tendencii razvitiya nauki: ot teoreticheskikh paradig k praktik [Current problems and modern trends in the development of science: from theoretical paradigms to practice]»*. Moscow: ICI Research Center, 2020 (in Russian).
- [8] V.N. Krysanov, "Dependence of the harmonic composition of voltages of the high-voltage regulator on control modes", *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya [Electrical Complexes and Control Systems]*, no. 3, pp. 16-18, 2009 (in Russian).
- [9] V.N. Krysanov, A.B. Kirilov and S.A. Durnev, Analiz garmonicheskogo sostava vyhodnogo napryazheniya matematicheskoy modeli staticheskogo regulyatora [Analysis of harmonious structure of output voltage of mathematical model of the static regulator]", in proc. *All-Russian students scientific and technical conf. "Prikladnye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki. Inzhenernye idei XXI veka [Applied Problems of Electromechanics, Power, Electronics Engineering ideas of the 21st century]*", 2013, Voronezh, Russia, pp.157-159 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Крысанов Валерий Николаевич, кандидат технических наук, директор ООО ПКФ «Современные Технологии», г. Воронеж, Российская Федерация.

Valery N. Krysanov, Cand. Sci. (Eng.), director of the LLC PKF "Modern Technologies", Voronezh, Russian Federation.

Хайченко Илья Александрович, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Pyu A. Khaichenko, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Бабенко Владимир Владимирович, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Vladimir V. Babenko, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Нефедов Юрий Васильевич, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Yuri V. Nefedov, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.