

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.53

Н. М. Олиферович, Д. А. Гринюк, И. О. Оробей
Белорусский государственный технологический университет
**АЛГОРИТМЫ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
И ИХ АПРОБАЦИЯ НА ТЕПЛОВОМ ОБЪЕКТЕ**

В статье анализируются возможности использования непрерывной частотной идентификации технологических объектов. Отмечается, что алгоритмы работы системы идентификации могут варьироваться в зависимости от скорости изменения параметров динамики объектов управления. При малых скоростях изменения параметров объекта наиболее стабильно будет давать результат решение с использованием многопериодного усреднения.

В случае, если изменения достаточно быстры, а вычислительные ресурсы микропроцессорной системы управления ограничены, то хорошим решением может быть формирование последовательной серии контрольных гармоник. Для данного решения проанализированы различные варианты формирования серий и их влияние на точность определения. Доказано, что понижение частот контрольных гармоник позволяет уменьшить погрешность идентификации параметров объекта. При переходе на новый цикл измерения для самой высокочастотной гармоники требуется выдержка 6–10 периодов для обеспечения достоверности результатов.

Еще быстрее можно получать данные о параметрах объекта, если формировать воздействие ансамбля контрольных гармоник. Для данного подхода предложены алгоритмы использования с кратными и некратными периодами. На основании численного моделирования сделан вывод о преимуществе использования гармонической идентификации с использованием ансамбля из контрольных гармоник с кратными периодами.

Приведены результаты апробации гармонической идентификации для воздушного теплообменника с использованием метода гармонической идентификации.

Ключевые слова: объект управления, амплитудно-частотная характеристика, квадратурный демодулятор, идентификация, гармоническая идентификация.

N. M. Oliferovich, D. A. Hryniuk, I. O. Orobei
Belarusian State Technological University
**HARMONIC IDENTIFICATION ALGORITHMS
FOR TECHNOLOGICAL OBJECTS AND THEIR APPROBATION
ON A THERMAL OBJECT**

The possibilities of using continuous frequency identification of technological objects are analyzed in the article. It is noted that the algorithms of the identification system can vary depending on the rate of change in the parameters of the dynamics of control objects. At low rates of change in the parameters of the object, the solution with multiperiod averaging using will be most stable.

If the changes are fast enough, and the computer power of the microprocessor control system is limited, then a formation of series of control harmonics can be a good solution. For this solution, different variants of series formation and their influence on the accuracy of the determination are analyzed. It is proved that lowering the frequencies of the control harmonics makes it possible to reduce the error in identifying object's parameters. When switching to a new measurement cycle for the highest-frequency harmonic, an exposure of 6–10 periods to ensure the confidence of the results is required.

It is possible to receive data about the parameters of the object even faster, if the effect of the group of control harmonics is formed. For this approach, algorithms for use with multiple and non-multiple periods are proposed. On the basis of numerical modeling, the conclusion about the advantage of using harmonic identification with using of reference harmonic's group with multiple periods is made.

The results of approbation of harmonic identification for air heat exchanger using the method of harmonic identification are presented.

Key words: control object, amplitude-frequency characteristic, quadrature demodulator, identification, harmonic identification.

Введение. При построении систем управления реальными технологическими процессами актуальной является задача идентификации динамики каналов регулирования и возмущения. Основные вопросы постановки задачи идентификации были сформированы в 70-х годах [1]. С прикладной точки зрения задачей идентификации является получение параметров модели, которая устанавливает связь между основными переменными, характеризующими динамические и статические свойства объекта управления. Существует много типов моделей. Для решения вопросов, связанных с управлением производственным процессом, оператор должен знать параметры модели. Для применения современных систем и теории управления необходимо использовать математические модели, описывающие взаимосвязи между системными переменными в терминах разностных или дифференциальных уравнений. Идентификация системы (процесса) – это область математического моделирования из тестовых или экспериментальных данных.

Основная часть. В работе [2] были показаны существенные преимущества использования активной частотной идентификации в сравнении с меандровой в условиях ограничения на отклонения выходного параметра. Сравнение методов проводилось в условиях вычислительного эксперимента в пакете MatLab. Частотная идентификация была реализована с использованием нескольких контрольных гармоник (КГ), параметры которых выбирались исходя из критерия минимизации взаимного влияния КГ вследствие прохождения через квантователь. Для выделения параметров модели применялось классическое решение – усреднение путем использования фильтра низкой частоты с большой постоянной времени. Методика, использованная в [2], применима для объектов, у которых скорость изменения параметров модели значительно меньше, чем полоса пропускания усредняющих фильтров. С другой стороны, фильтры с большой постоянной времени позволяют нивелировать влияние возмущений на объект управления.

Для объектов с быстрой динамикой надо использовать другие подходы. Программируемые логические контроллеры (ПЛК) и другие микропроцессорные средства позволяют в пол-

ной мере воспользоваться достоинствами цифровой обработки данных.

Алгоритмы гармонической идентификации. Последовательная гармоническая идентификация (ПГИ). Для объектов со сравнительно быстроменяющимися свойствами могут быть предложены различные подходы. Ограничение на время усреднения не позволяет просто напрямую нивелировать влияние одной контрольной гармоники на другую, как это делалось в [2]. Одним из простых решений может быть формирование последовательности гармоник одной за другой и разделение идентификации по частоте. Для обеспечения точности идентификации и уравнивания влияния квантователя требуется осуществлять выбор амплитуды на каждой частоте таким образом, чтобы на выходе при разных частотах значения амплитуд не отличались более чем на 10–15%.

Это уменьшит требования по вычислительной мощности для реализации алгоритмов. Данное решение легко реализуется с помощью ПЛК средней мощности.

Метод имеет некоторые особенности. При переходе с одной частоты на другую будет наблюдаться переходной процесс. Для объекта с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (1)$$

уравнение для динамики при ступенчатом изменении частот будет иметь общий вид

$$y(t) = a \sin(\omega t + \varphi) + b \exp\left(\frac{-t}{T_1}\right) + c \exp\left(\frac{-t}{T_2}\right), \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени; p – оператор дифференцирования d/dt .

Расчеты для T_1 и T_2 со значениями 100 и 500 с показали следующую зависимость погрешности в определении амплитуды на разных периодах после перестройки частоты (рис. 1–2). Для получения графиков использовалось условие, что значение амплитуды после прохождения должно оставаться одинаковым.

Графики показывают, что при использовании данного алгоритма лучше начинать с низкой частоты. Для большинства технологических решений определять коэффициент пере-

дачи можно уже на первом периоде. Наибольшая погрешность наблюдается при кратности частот 1,6–1,7. При начале нового цикла измерения амплитуд, фиксировать коэффициент передачи на наиболее высокочастотной КГ можно будет только на 6–9 периоде.

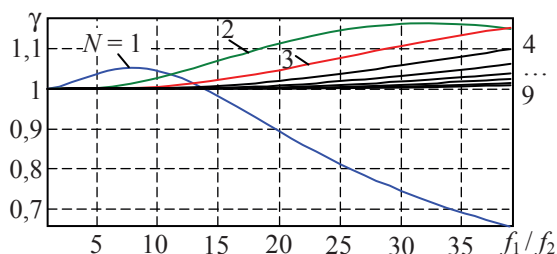


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности γ от отношения частот до f_2 и после f_1 при их ступенчатом повышении на разных периодах N определения амплитуды

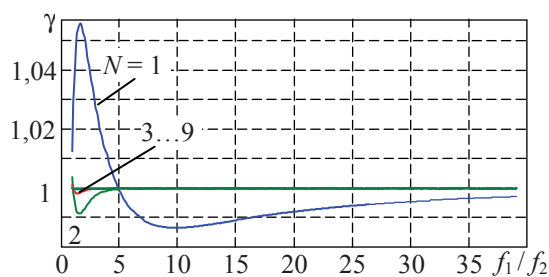


Рис. 2. Относительная погрешность γ от отношения частот до f_2 и после f_1 при ступенчатом понижении на разных периодах N определения амплитуды

Произведено моделирование системы с ПГИ с повторением после каждого изменения частоты двух (рис. 3) и одного периодов при повышении частоты и семи периодов перед повышением. Коэффициент передачи определялся по последнему периоду перед изменением частоты.

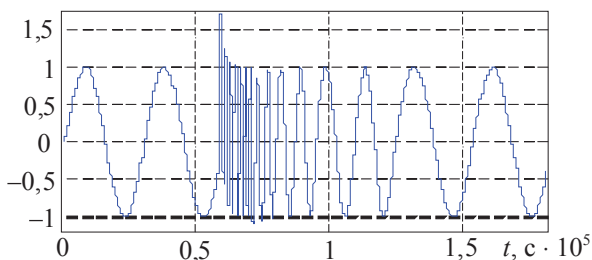


Рис. 3. Переходной процесс при перестройке частот

Из-за переходных процессов при перестройке частоты относительное отклонение амплитуды и фазы от исходного значения на двух периодах максимально при переходе от самой высокочастотной к следующей – 0,7%, и менее 0,02% – во всех остальных случаях. При одном периоде в

ССИ погрешность возрастает до 3,6% при переходе от самой высокочастотной к следующей и меньше 1% – во всех остальных случаях.

Смешанная гармоническая идентификация (СГИ). Другим решением будет использование процедуры разложения в ряд Фурье для всех гармоник по периоду самой медленной. Однако следует учитывать, что при выборе контрольных гармоник с некратной частотой для снижения эффекта квантования потребуется корректировка результатов на каждом периоде для уменьшения влияния одной контрольной гармоники на другую.

Так для объекта второго порядка при использовании пяти контрольных гармоник на активном изменении амплитудночастотных характеристик (АЧХ) погрешность может достигать до 30% (рис. 4). Больше всего этому подвержены высокочастотные гармоники. При усреднении по большому количеству тактов идентификации значение сходится. Для нивелирования данной погрешности следует рассчитывать поправочные коэффициенты путем одновременного моделирования и разложения. Алгоритм работы данной процедуры похож на известное решение – управление по модели. Другим решением может быть использование контрольных гармоник с кратными периодами.

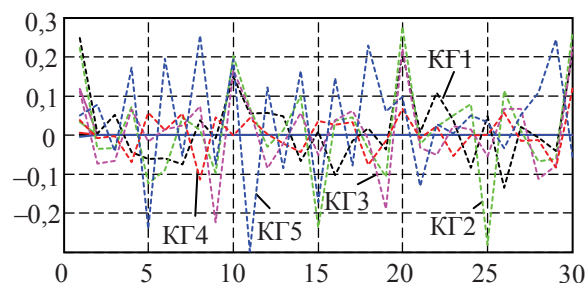


Рис. 4. Вариации амплитуд КГ на различных тактах определения

Постановка вычислительного эксперимента. Для сравнения двух последних решений произведено моделирование в пакете MatLab при работе в одинаковых условиях. Для динамической системы с близкими к тепловому объекту свойствами установлено влияние на точность определения амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) при различных значениях уровня квантования. Объект идентификации представлял аperiodическое звено второго порядка с постоянными времени 500 и 100 с. Соответственно, для первого решения (V1) периоды гармоник были $A_2 = [8784 \ 4184 \ 1992 \ 1020 \ 460]$ с, а для варианта два (V2) $A_1 = [T/2 \ T/4 \ T/8 \ T/16]$, где T – период самой медленной КГ (рис. 5). Во втором случае фазы КГ были различными, соответственно $[0, \pi, \pi/2, \pi/4, \pi/8]$.

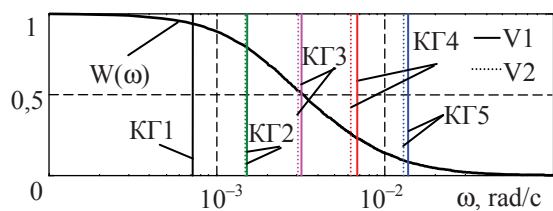


Рис. 5. Модельный объект с выбранным КГ

Отличия в фазах контрольных гармоник позволяют исключить большие отклонения при идентификации. В вычислительном эксперименте это позволяет обеспечивать максимально одинаковые условия прохождения сигнала через квантователь (рис. 6). Амплитуды были подобраны с учетом коэффициента передачи объекта, чтобы на выходе они были одинаковыми. Уровень квантования Z задавался исходя из полного размаха исходного сигнала.

Моделирование проводилось на протяжении 20 периодов самой медленной КГ. На каждом периоде определялись параметры амплитуды и фазы гармоник. Относительная ошибка γ определялась на каждом периоде для объекта с передаточной функцией (1) как разница между значением амплитуды на выходе до и после квантователя, отнесенная к истинному. Для вычисления результирующего значения γ и дисперсии (рис. 7–10) использовалось среднее значение за все периоды, за вычетом первого, для исключения влияния переходных процессов, указанного ранее.

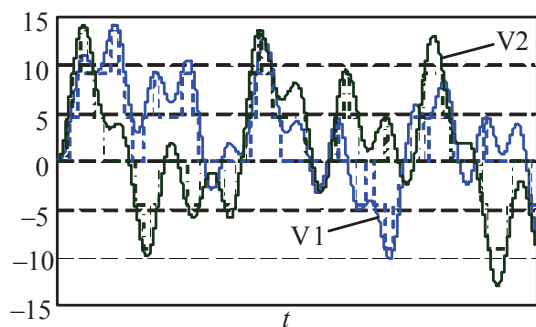


Рис. 6. Выходные тренды до и после квантователя для двух вариантов формирования КГ

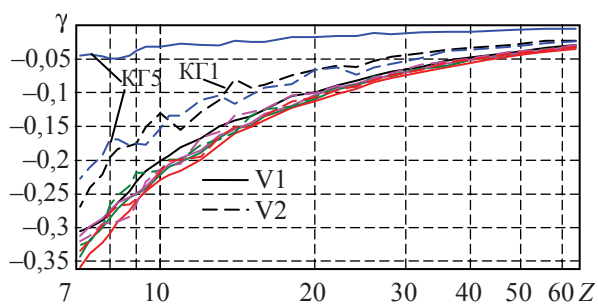


Рис. 7. Зависимость γ амплитуды от уровня квантования для КГ

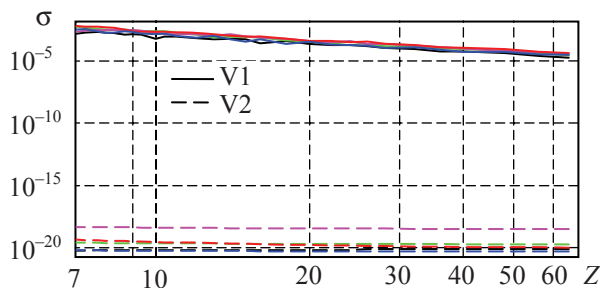


Рис. 8. Дисперсия ошибки определения амплитуды от уровня квантования

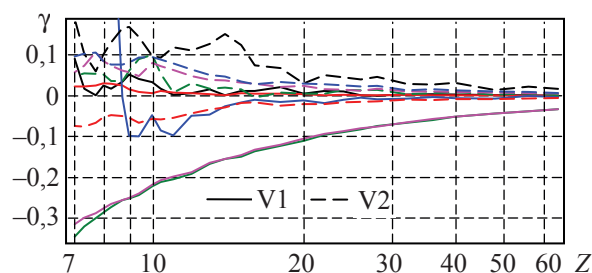


Рис. 9. Зависимость ошибки определения фазы от уровня квантования

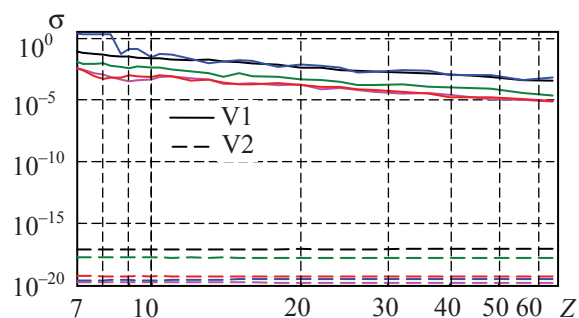


Рис. 10. Дисперсия ошибки определения фазы от уровня квантования

Результаты и обсуждение математических экспериментов. Уменьшение количества разрядов квантователя на амплитуду сигналов приводит к увеличению ошибки. При этом кривые хорошо аппроксимируются функцией вида

$$\gamma(Z) = \exp(k \ln Z + b). \quad (3)$$

Это следует учитывать при проведении идентификации на реальных объектах. Одним вариантом может быть совместное моделирование с использованием квантователя и учет через минимизацию рассогласования. Вторым вариантом – определение коэффициентов k и b заранее.

Квантование по уровню в меньшей степени оказывает влияние на самую высокочастотную и низкочастотную КГ. При этом влияние уровня при непропорциональных периодах более существенно по сравнению с другими вариантами. Еще больше отличий наблюдается при рассмотрении дисперсии отклонений амплитуды и фазы. Отличие в значениях между двумя

вариантами достигает нескольких порядков. Однако следует отметить, что такие отличия наблюдаются только в условиях вычислительного эксперимента. Шумовые составляющие в измерительном тракте, которые всегда присутствуют на реальных объектах, практически уравнивают различия между алгоритмами.

Но в целом, следует констатировать, что для практического использования лучше рекомендовать контрольные гармоники с пропорциональными периодами.

Проверка на тепловом объекте. Тестирование метода гармонической идентификации предполагалось осуществить на базе учебного стенда. Он представляет собой модель воздушного теплообменника. Выходным параметром является температура, а каналом управления – изменение расхода воздуха. Для изменения расхода воздуха используется частотный привод. Объект обладает нелинейными свойствами как по статическому коэффициенту передачи, так и по динамическим свойствам. Интеграция системы управления объектом с пакетом Matlab позволила проводить анализ предложенных алгоритмов. Помимо частотной идентификации (рис. 11), были проведены измерения путем формирования меандрового сигнала (рис. 11–13).

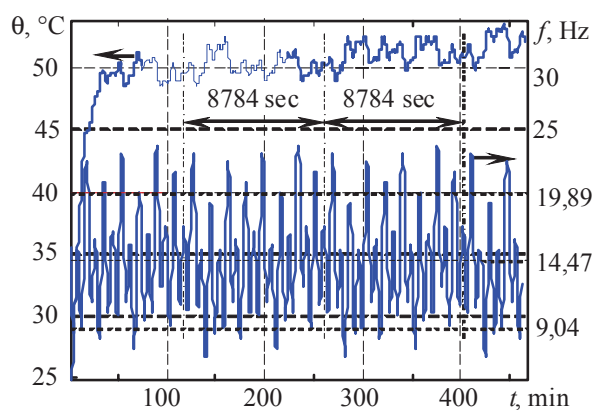


Рис. 11. Тренд частотной идентификации

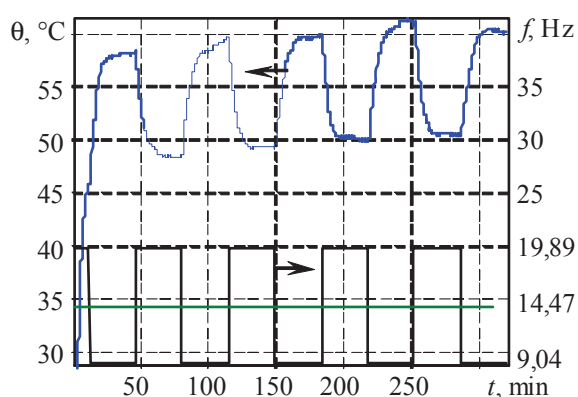


Рис. 12. Тренд идентификации при периоде меандра 8368 с

В процессе эксперимента стенд подвергался неконтролируемым возмущениям: изменение гидродинамических и теплофизических параметров воздуха вокруг стенда (отопление, проветривание, изменение погоды).

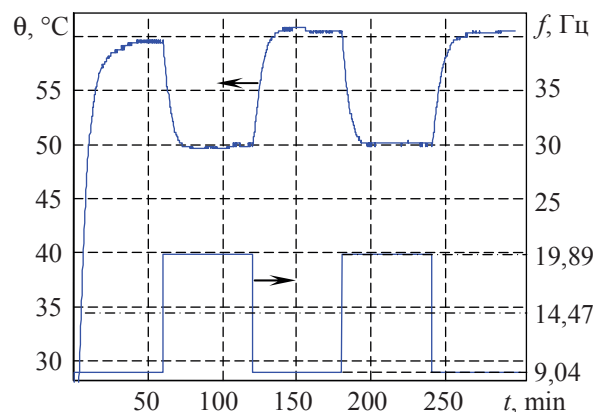


Рис. 13. Тренд идентификации при периоде меандра 14400 с

При определении параметров передаточных характеристик (1) по тренду (рис. 12) разброс значений составил более 40%. Параметры k , T_1 , T_2 находились путем минимизации среднеквадратического отклонения экспериментальных данных от теоретического. АЧХ передаточных функции объекта, которые получены при удлинении периода меандра до 14400 с, представлены на рис. 14. Увеличение длительности периода переходного процесса позволило уменьшить разброс параметров передаточной функции объекта.

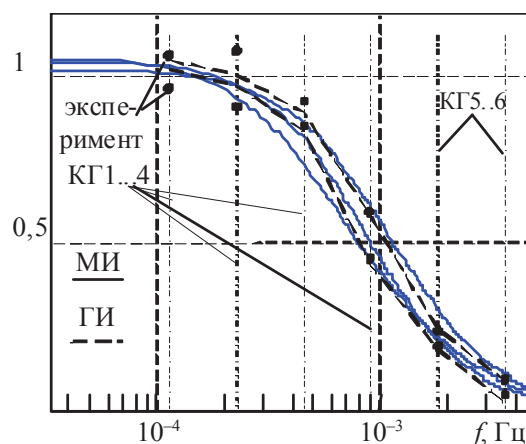


Рис. 14. АЧХ теплового объекта, определенного гармонической идентификацией (ГИ) и с помощью меандра (МИ)

При обработке ГИ доступными были только два такта идентификации ввиду ограничения на время работы. Как и при МИ, кривая имеет устойчивый повышающий тренд (рис. 11). Это, вместе с помехами, нашло отражение при оп-

ределении низкочастотных составляющих параметров АЧХ. Высокочастотные КГ, которые для разработанного алгоритма имеют многократное усреднение, обладают небольшим разбросом. Низкочастотные составляющие (КГ2 и КГ3) имеют максимальное отклонение по отношению к результирующей АЧХ, которое получено по результатам эксперимента. Результирующая АЧХ (рис. 14) получалось, как и для МИ, путем минимизации отклонения от заданного вида в соответствии с (1).

АЧХ ПГИ дали несколько лучшие результаты по низкочастотной части спектра в сравнении с ГИ и значительно худшие для высокочастотной. Доступное время работы эксперимен-

тальной установки позволяло провести только один цикл идентификации.

Следует отметить, что из-за ограничения на управляющее воздействие для МИ и ГИ не было возможности для обеспечения равноценных мощностей тестовых сигналов, как это было в [2].

Заключение. 1. Доработаны и опробованы на практике различные алгоритмы гармонической идентификации, показана их работоспособность.

2. В случае подверженности объекта влиянию помех, сравнимым с периодом самой низкочастотной контрольной гармоники, следует увеличивать время идентификации.

Литература

1. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления: Оценивание параметров и состояний. М.: Мир, 1975. 680 с.
2. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. Harmonic identification of technological objects in real time // 2016 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 21 April 2016, pp. 1–4.

References

1. Eykhoff P. System Identification: Parameter and State Estimation. New York, John Wiley & Sons, 1974. 674 p. (Russ. ed.: Eykhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya: Otsenivanie parametrov i sostoyaniy*. Moscow, Mir Publ., 1975. 680 p.).
2. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. Harmonic identification of technological objects in real time. 2016 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 21 April 2016, pp. 1–4.

Информация об авторах

Олиферович Надежда Михайловна – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bogosnadya@rambler.ru

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

Оробей Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.by

Information about the authors

Oliferovich Nadezhda Mihaylovna – assistant lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogosnadya@rambler.ru

Hryniuk Dmitry Anatolyevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

Orobei Igor Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

Поступила 25.04.2017