

УДК 681.53

**Н. М. Олиферович, Д. А. Гринюк, И. О. Оробей**  
Белорусский государственный технологический университет

### **ГАРМОНИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

В статье рассмотрены особенности управления технологическими объектами с нестабильными параметрами, изменяющими свои свойства в процессе эксплуатации в широком диапазоне. Коэффициенты эквивалентных передаточных функций таких систем по каналам управления могут изменять значения на порядок. Найти в данных условиях робастные настройки для регулятора практически невозможно. Для поддержания стабильности технологических режимов требуется одновременно с регулированием проводить идентификацию параметров объекта управления.

С целью определения динамических характеристик данных технологических объектов предлагается использовать в качестве воздействия смесь гармонических сигналов, подобранных таким образом, чтобы попадать в области значительных изменений амплитудно-частотных характеристик. В то же время вторичные гармоники, которые образуются при прохождении сигнала через выходной цифроаналоговый и входной аналогово-цифровой преобразователи, должны по минимуму попадать в спектр других гармонических сигналов. Выделение сигнала предполагается производить путем квадратурной демодуляции.

Для сравнения возможностей определения времени динамики технологических объектов в реальном времени в условиях ограничения на количество разрядов на выходе, для аperiodического звена третьего порядка выполнено математическое моделирование гармонической и меандровой идентификации в среде Matlab. Произведен анализ идентификации объекта при отсутствии обратной связи, с обратной связью, при добавлении сигнала после регулятора либо по каналу задания.

**Ключевые слова:** объект управления, амплитудно-частотная характеристика, квадратурный демодулятор, гармоническая и меандровая идентификации, контрольная гармоника.

**N. M. Oliferovich, D. A. Hryniuk, I. O. Orobei**  
Belarusian State Technological University

### **HARMONIC IDENTIFICATION OF TECHNOLOGICAL OBJECTS IN REAL TIME**

The article discusses the features of process control with unstable parameters, which change their properties during the operation over a wide-ranging. The coefficients of the equivalent transfer function of such systems for the control channels may change the values in order of magnitude. To find the robust configuration for controller in such conditions is almost impossible. To maintain the stability of technological conditions required at the same time with regulating to perform the identification of the control object's parameters.

In order to determine the dynamic characteristics of such technological objects is proposed to use in the capacity of action mixture of harmonic signals, which is selected in such a way that the fall in significant changes in the amplitude-frequency characteristic. At the same time, secondary harmonics are generated at passing the signal through an output digital-to-analog and analog-to-digital input converter, the minimum fell to the range of other harmonic signals. Extraction of signal expected to produce by quadrature demodulation.

To compare the possibilities of determining dynamics of technological objects in real time in a limitation on the number of bits at the output, for the third order aperiodic link mathematical simulation of harmonic and meander identifications in Matlab is performed. Produced the analysis of identify identification of object with feedback, in the absence of feedback, when the signal after the controller and channel assignments was carried out.

**Key words:** control object, amplitude-frequency characteristic, quadrature demodulator, harmonic and meander identifications, reference harmonic.

**Введение.** Большинство технологических объектов управления, особенно связанных с процессами тепло- и массообмена, изменяют свои свойства в процессе эксплуатации. Это

обусловлено как распределенностью параметров температуры и концентрации, так и нелинейными свойствами этих процессов. Особенно это касается объектов с широким диапазоном

регулирования. Такими объектами, к примеру, являются системы поддержания климата в жилых и административных зданиях, весьма популярные на сегодняшний день. Коэффициенты эквивалентных передаточных функций по каналам стабилизации могут изменять значения на порядок. Найти в данных условиях робастные настройки регулятора, которые обеспечат приемлемое качество переходного процесса, практически невозможно. Для поддержания стабильности технологических режимов требуется одновременно с регулированием проводить идентификацию параметров объекта управления. Организация периодических активных экспериментов сопряжена с большими экономическими затратами. В то же время пассивные эксперименты на основании корреляционного анализа не всегда позволяют обеспечить определение передаточных функций объекта с приемлемой точностью ввиду влияния метрологических свойств каналов информации. Кроме того, они не пригодны для относительно быстрых изменений объектов управления.

**Основная часть.** На практике широкую популярность нашли системы идентификации реального времени на основе постоянной генерации по каналу управления (или задания) ступенчатого сигнала, который имитирует проведение активного эксперимента. Однако следует учитывать, что данный подход сопряжен с рядом проблем. Реальная разрядность промышленных контроллеров находится в районе 12-bit, а часто и 10-bit, с другой стороны, технологический регламент не допускает существенных колебаний технологических параметров. Поэтому такая идентификация может приводить к большим погрешностям.

С целью определения динамических характеристик технологических процессов предлагается воздействовать на объект смесью гармонических сигналов, выбранных таким образом, чтобы они находились в области значительных изменений амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), и в то же время вторичные гармоники, которые образуются при прохождении сигнала через выходной цифроаналоговый и входной аналого-цифровой преобразователи, по минимуму попадали в спектр других гармонических сигналов. Выделение сигнала предполагается производить путем квадратурной демодуляции [1].

Пропустив гармонический сигнал через квантователь по уровню, можно получить следующие зависимости вторичных гармоник 3, 5, 7, 9, 11, 21, 31, отнесенных к амплитуде первой гармоники от количества разрядов  $N$ , которые припадают на размах полезного сигнала (рис. 1).

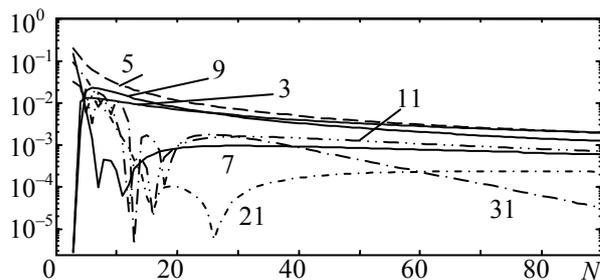


Рис. 1. Отношение амплитуды 3, 5, 7, 9, 11, 21, 31 гармоники к амплитуде первой гармоники в зависимости от количества разрядов, припадающих на размах гармонического сигнала

**Математический эксперимент.** С целью сравнения возможностей определения в реальном времени динамики технологических объектов в условиях ограничения на количество разрядов на выходе проведено математическое моделирование в Matlab гармонической (ГИ) и меандровой (МИ) идентификации. В качестве объекта был выбран апериодический объект третьего порядка с постоянными временами 150; 50; 16,7 с.

Для данного объекта были найдены настройки пропорционально-интегрального регулятора с использованием минимизации критерия [2] с расчетом на отсутствие колебательности переходного процесса (рис. 2).

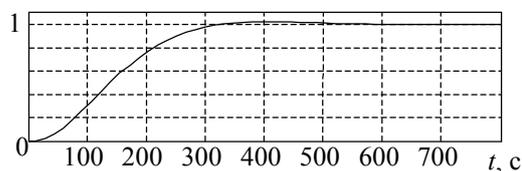


Рис. 2. Переходный процесс объекта управления

При выборе контрольных гармоник (КГ) руководствовались диапазоном частотной характеристики, при котором происходят максимальные изменения коэффициента передачи частотной характеристики объекта (рис. 3 и 4).

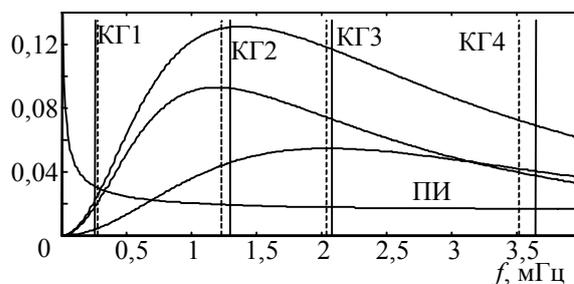


Рис. 3. Относительное изменение АЧХ объекта при вариации его постоянных, положения выбранных КГ для ГИ (сплошные линии), МИ (штрихпунктирные линии) и АЧХ ПИ-регулятора

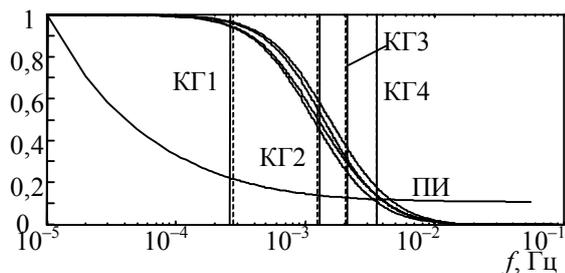


Рис. 4. АЧХ объекта при вариации его постоянных, положения выбранных четырех КГ для ГИ (сплошные линии), МИ (штрихпунктирные линии) и АЧХ ПИ-регулятора

Первоначально выбиралась самая высокочастотная КГ1, затем более низкочастотная, такая, чтобы высокочастотная КГ находилась между вторичными гармониками низкочастотной. Далее выбиралась еще более низкочастотная, опять же с условием отдаления ее спектра от уже выбранных (рис. 5), в частности, в эксперименте использовались КГ с частотами 0,274; 1,23; 2,03; 3,52 мГц.

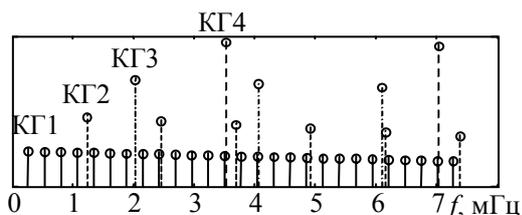


Рис. 5. АЧХ объекта при вариации его постоянных и положения выбранных четырех КГ для ГИ (сплошные вертикальные линии) и МИ (штрихпунктирные вертикальные линии)

Частота меандрового сигнала была выбрана из условия выхода объекта на стационарное состояние с погрешностью не выше 0,5% и составила 0,2604 мГц. В ходе эксперимента определяемые гармоники меандрового сигнала (МС) выбирали исходя из близости к КГ гармонической идентификации, в частности 1, 5, 8 и 14 (рис. 3 и 4). Амплитуда МС  $\pm 1$ .

Амплитуды КГ подбирались таким образом, чтобы на выходе путем перерасчета получались одинаковые значения, исходя из коэффициентов передачи по АЧХ объекта. Суммарная мощность четырех КГ регулировалась общим коэффициентом так, чтобы она была равна мощности МС. Отдельно проводилось моделирование при уменьшении общего коэффициента на 0,5 (ГИ05). Фрагмент тестовых сигналов при дискретизации по уровню 0,5 и без дискретизации показан на рис. 6.

Выполнялся раздельный анализ возможности идентификации объекта при отсутствии

обратной связи и с обратной связью, при добавлении тестового сигнала (ТС) после регулятора либо по каналу задания (SP) (рис. 7).

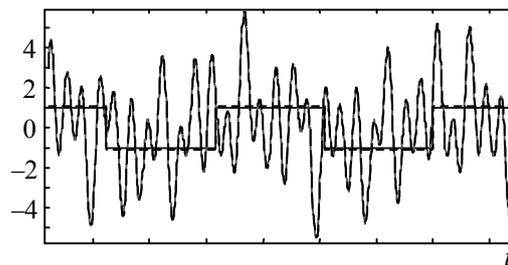


Рис. 6. Фрагмент тестовых сигналов

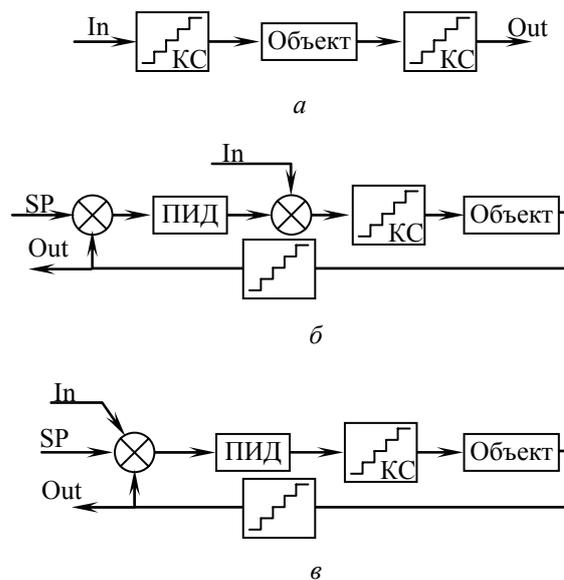


Рис. 7. Структуры моделирования:  
а – при отсутствии обратной связи (S1);  
б – с обратной связью, при подаче ТС после регулятора (S2); в – с обратной связью, при подаче ТС по каналу задания (S3);  
In – точка приложения ТС;  
Out – выходной сигнал для анализа

Уровень квантователя (разница между соседними значениями) менялся синхронно на входе и на выходе с выбором точек по логарифмической зависимости от минимальных значений до 0,514, т. е. немного больше уровня половины МС. Моделирование ГИ и МИ осуществлялось при одном уровне квантователя в рамках одной модели Simulink для обеспечения одинаковой точности. Моделирование проводилось на промежутке, достаточном для выхода сигналов квадратурных демодуляторов на стационарное значение. Амплитуда и фаза сигналов определялись как среднее значение последних 1000 точек. Также выполнялась оценка дисперсии значений.

Результаты (табл. 1–3) оценивались по отношению к амплитуде (фазе) гармоники, полученной

из линейной структуры. В таблицах значение 0,514 говорит о том, что точность в 0,5% обеспечивалась на всем диапазоне исследований. Таблица для дисперсии амплитуды не приводится, поскольку во всех случаях и для всех гармоник отличия от линейной системы не превышали 0,5%.

Таблица 1  
Максимальный уровень квантования для обеспечения точности 0,5% по амплитуде

Тип	КГ1	КГ2	КГ3	КГ4
ГИ – S1	0,514	0,514	0,514	0,514
ГИ – S2	0,514	0,514	0,514	0,514
ГИ – S3	0,514	0,514	0,514	0,256
ГИ05 – S1	0,514	0,514	0,384	0,256
ГИ05 – S2	0,514	0,514	0,514	0,514
ГИ05 – S3	0,514	0,384	0,384	0,384
МИ – S1	0,008	0,008	0,256	0
МИ – S2	0,032	0,096	0,096	0,064
МИ – S3	0,514	0,192	0,384	0,064

Таблица 2  
Максимальный уровень квантования, для обеспечения точности 0,5% по фазе

Тип	КГ1	КГ2	КГ3	КГ4
ГИ – S1	0,514	0,256	0,514	0,256
ГИ – S2	0,514	0,384	0,384	0,384
ГИ – S3	0,514	0,192	0,514	0,514
ГИ05 – S1	0,384	0,128	0,384	0,384
ГИ05 – S2	0,514	0,514	0,256	0,384
ГИ05 – S3	0,384	0,128	0,096	0,514
МИ – S1	0,064	0,008	0	0
МИ – S2	0,008	0,514	0	0
МИ – S3	0,032	0,004	0	0

Таблица 3  
Максимальный уровень квантования, при котором дисперсия фазы меньше 0,5%

Тип	КГ1	КГ2	КГ3	КГ4
ГИ – S1	0,514	0,514	0,514	0,384
ГИ – S2	0,384	0,514	0,514	0,514
ГИ – S3	0,514	0,514	0,514	0,514
ГИ05 – S1	0,256	0,514	0,384	0,384
ГИ05 – S2	0,514	0,514	0,514	0,192
ГИ05 – S3	0,514	0,514	0,514	0,384
МИ – S1	0,514	0,514	0	0
МИ – S2	0,514	0,514	0,096	0
МИ – S3	0,514	0,514	0	0

Анализ результатов показывает, что предложенный способ ГИ имеет большую точность в определении динамики в режиме реального времени. Из всех структур наилучшую

точность демонстрирует вариант идентификации без обратной связи S1. Наихудшие показатели – в случае воздействия на объект по каналу задания. Наличие обратной связи существенно влияет на форму сигналов, которые поступают на вход контроллера для анализа. Если для структуры S1 выход мало отличается от фрагмента, показанного на рис. 6 (только высокочастотные составляющие теряют амплитуду больше, чем низкочастотные), то S2 вносит значительные изменения в форму сигнала (рис. 8) и затрудняет анализ. Наибольшее уменьшение мощности отклонения выходного сигнала происходит в S2 вследствие его подавления обратной связью с регулятором.

Дальнейшая процедура предполагает восстановление всей АЧХ с помощью интерполяции. Одним из лучших вариантов является использование функции  $\sin x / x$ . Однако в большинстве технологических задач можно корректировать настройки регулятора непосредственно по колебаниям амплитуд и фаз КГ. Количество КГ можно также изменять в зависимости от требований точности и структурных особенностей динамики объекта наблюдения.

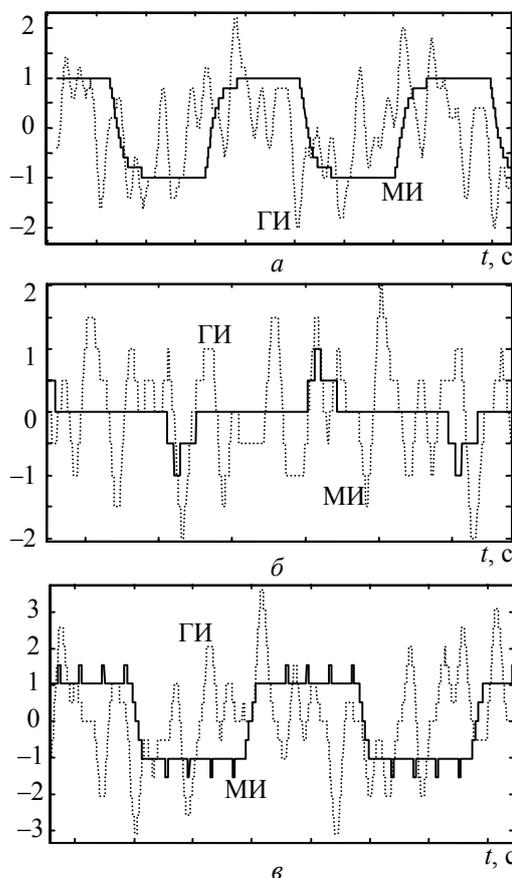


Рис. 8. Фрагмент зависимости Out для ГИ и МИ:  
а – для S1; б – для S2; в – для S3

Для МИ можно повысить точность идентификации путем увеличения количества определяемых гармоник. МИ показывает лучшие результаты при работе по структуре S3. Наибольшие проблемы МИ проявляются в определении высокочастотной АЧХ объекта. В зависимости от особенностей объекта и настроек регулятора результаты могут изменяться. Следует отметить, что погрешность в определении гармоник во втором знаке начинается с уровня 0,05 квантования при МИ, что может быть приемлемо для ряда прикладных задач.

**Заключение.** 1. Результаты эксперимента показали, что ГИ обладает большим потенциа-

лом по сравнению с МИ. Даже в случае уменьшения мощности КГ метод сохраняет хорошую способность к идентификации.

2. Использование узкополосных фильтров квадратурной демодуляции дает возможность существенно уменьшить погрешности, которые вносит квантование. Такой подход также позволяет значительно снизить влияние шумов, которые всегда присутствуют в измерительном тракте на технологических объектах.

3. Раздельная генерация гармоник с индивидуальным изменением амплитуды обеспечивает точность определения частотной характеристики объекта на более широком диапазоне регулирования.

### Литература

1. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2 т. Т. 2. М.: Мир, 1983. 256 с.
2. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости // Труды БГТУ. 2012. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 118–121.

### References

1. Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh. V 2 t. T. 2* [Methods and signal processing techniques and applications to physical measurements]. Moscow, Mir Publ., 1983. 256 p.
2. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Modification of the integral criteria to improve margin stability. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012 no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 118–121 (In Russian).

### 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), Assistant 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), Assistant 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 02.03.2016