

УДК 621.77.016:62178.061

DOI: 10.30987/article\_5bf70312413968.90524685

**С.И. Досько**, к.т.н.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, РФ, г. Москва, ул. Бауманская 2-я, 5/1),

**В.А. Логвин**, к.т.н.

(ГУВПО «Белорусско-Российский университет»  
212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43),

**С.А. Шептунов**, д.т.н., **Е.В. Юганов**, аспирант

(Институт конструкторско-технологической информатики РАН)  
127055, г. Москва, Вадковский пер. 18, стр. 1а)

E-mail: ship@ikti.org.ru

## **Идентификация модели индукционного датчика и деконволюция спектра входного сигнала**

*Представлены результаты исследований по деконволюции сигнала с измерительного тракта индукционного датчика, что позволяет использовать его для мониторинга и контроля процесса обработки в тлеющем разряде в контролируемых технологических средах с целью оптимизации и воспроизводимости результатов в автоматизированных технологических средах. Использование индукционного датчика позволяет установить влияние изменения формы и амплитуды регистрируемых электро-магнитных импульсов на изменение среднеинтегральной величины тока в разряде, а также определять время выхода установки на рабочий режим, осуществлять оперативное вмешательство на ход процесса и контролировать его завершение.*

**Ключевые слова:** плазма; тлеющий разряд; деконволюции; автоматизированная технологическая среда; вакуумные установки.

**S.I. Dosko**, Can. Sc. Tech.,

(Bauman State Technical University of Moscow, 5/1, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, the RF 105005)

**V.A. Logvin**, Can. Sc. Tech.

(SU HVE "Belorussian-Russian University", 43, Mir Avenue, Mogilyov, the Republic of Belarus 212000)

**S.A. Sheptunov**, Dr. Sc. Tech., **E.V. Yuganov**, Post graduate student

(Institute of Design Technological Informatics of RAS, Building 1a, 18. Vadkovsky Alleyway, Moscow 127055)

## **Identification of induction sensor model and deconvolution of input signal spectrum**

*The investigation results on the deconvolution of a signal from the measuring section of an induction sensor that allows using it for monitoring and control of processing in a glow discharge in controlled processing environment with the purpose of optimization and results reproducibility in automated processing environment are presented. The induction sensor use allows defining the impact of changes in a form and amplitude of recorded electromagnetic pulses upon changes of the mean-integral value of current in a discharge and also defining time of a plant operation mode setting and also performing a rapid impact upon a process and controlling its completion.*

**Keywords:** plasma; glow discharge; deconvolution; automated processing environment; vacuum plants.

Основное назначение деконволюции (*deconvolution*) или обратной свертки – восстановление истинной формы сигнала, несущего информацию об исследуемом физическом или технологическом процессе после его искажения при регистрации какой-либо линейной системой, измерительным трактом прибора (аппаратной или приборной функцией) или каналом связи [2, 6].

В ядерной физике методы деконволюции являются основными при количественной интерпретации результатов измерений, чему способствует принцип суперпозиции ядерно-физических полей. Естественно, что для восстановления необходимы сведения о характеристиках «искажающей» системы, а именно об импульсном отклике системы или его частотной передаточной функции.

Для выполнения процедуры деконволюции необходимо реализовать фильтр, частотная характеристика которого является обратной частотной характеристике «искажающей» системы.

Предлагается следующий алгоритм деконволюции входного сигнала измерительного тракта:

- идентификация измерительного тракта, т.е. построение его модели частотной передаточной функции по экспериментальным данным;
- получение обратной частотной передаточной функции;
- собственно деконволюция сигнала.

В качестве инструмента деконволюции предлагается использовать параметрический спектральный анализ на основе метода Прони. Метод Прони – это метод моделирования выборочных данных в виде линейной комбинации экспоненциальных функций. Исторически метод Прони – первый метод спектрального анализа временных рядов (1795 г., Гаспар Рише – барон де Прону [1]), но не имеющий непрерывного аналога. Его широкое использование откладывалось почти 200 лет из-за отсутствия устойчивого с вычислительной точки зрения алгоритма, однако, сегодня это один из самых популярных методов исследования временных рядов [2, 3].

Для нелинейных систем, имеющих хаотическую динамику, естественной является модель локально-переходных порождаемых ими временных рядов, т.е. сегменты ряда – это неквазистационарные составляющие нестационарного временного, а переходные.

Результаты спектрального анализа можно считать информативными, т.е. позволяющими осуществлять физическую интерпретацию.

Оценка параметров нестационарного (экспоненциального) сигнала – одна из самых распространенных задач в различных областях техники. Это связано с тем, что отклик линейной системы на импульсное воздействие является суммой именно таких сигналов, т.е. оценив параметры сигналов на выходе системы, можно решить задачу идентификации системы и ее состояния. Использование в этих целях преобразования Фурье не всегда дает хорошие результаты, так как это преобразование изначально предназначено для оценки спектра сигнала, а не частоты и в классическом варианте не является статистически устойчивым.

В отличие от спектрального анализа Фурье (классический спектральный анализ) спектральный анализ Прони позволяет следующее [2, 3]:

- выполнить без побочных эффектов спектральное оценивание сегментов временных рядов во временных окнах ограниченной продолжительности;
- использовать модель нестационарного временного ряда (например, возрастающего или убывающего во временном окне);
- определить собственный спектр частот и спектр модального демпфирования мод системы проявившихся на данном сегменте временного ряда;
- получить аналитический спектр Фурье сигнала, т.е. без использования БПФ.

В методе Прони [2, 3] отсутствует ряд ограничений, свойственных Фурье-преобразованию, например, в результате Фурье-преобразования временных рядов, представляющих затухающие синусоиды вида

$$Ae^{-\delta t} \times \cos(2\pi ft + \varphi),$$

получают оценки трех параметров:  $A/\delta^{1/2}$  – Фурье-амплитуда;  $\varphi$  – фаза;  $f$  – частота (с учетом диссипативных свойств), точность оценки которой зависит от величины  $\delta$ .

А в методе Прони используется разложение сегментов временных рядов, в результате которого для временных зависимостей вида  $Ae^{-\delta t} \times \cos(2\pi ft + \varphi)$  определяются оценки всех четырех независимых параметров:  $A, \varphi, \delta, f$ .

Метод Прони позволяет аппроксимировать последовательность комплексных данных  $y_i$  моделью, состоящей из  $m$  затухающих комплексных экспонент  $\tilde{y}_i$ :

$$y_n = \sum_{k=1}^m [A_k \exp(j2\pi f_k \Delta t n + j\varphi_k) \exp(-\delta_k \Delta t n)],, \quad n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $A_k$  – амплитуда;  $f_k$  – частота;  $\varphi_k$  – начальная фаза;  $\delta_k$  – коэффициент затухания;  $\Delta t$  – период дискретизации сигнала;  $n$  – номер отсчета;  $N$  – число отсчетов сигнала.

Для работы с реальными сигналами используют метод наименьших квадратов (МНК) Прони, который обладает следующими преимуществами по сравнению с исходным методом [2, 3]:

- количество комплексных экспонент  $m$  (модальная глубина модели) в выражении (1) меньше или равна половине отсчетов в сигнале ( $m \leq N/2$ );

- ошибки аппроксимации минимальны при соответствующем выборе  $m = m_{opt}$ .

В программе SAProny реализован алгоритм, соответствующий МНК Прони, который вложен в оптимизационный цикл по модальной глубине модели ( $m_{opt}$ ), где в качестве целевой функции использована величина относительной погрешности аппроксимации (невязки) временного ряда. Предусмотрена возможность использования нескольких аппроксимационных моделей: полная модель колебаний по Булгакову [5], сумма затухающих синусоид, сумма экспонент и сумма синусоид. Минимизируется относительная невязка по количеству мод, а внутри цикла определяются оценки модальных параметров по несколько модифицированному алгоритму Прони, изложенному в [2]. Реализована интерактивная технология спектрального Прони-анализа сигнала с использованием аналитического спектра Фурье.

Как известно спектральный состав света, излучаемого плазмой в тлеющем разряде зависит от используемой технологической среды, а интенсивность электромагнитного излучения плазмы – от концентрации и энергии движущихся возбужденных атомов и ионов. Постоянство этих и других параметров характеризуют стабильность тлеющего разряда, а, следовательно, и воспроизводимость его воздействия на облучаемые материалы [7].

Поэтому исследование спектрального состава электромагнитного излучения плазмы и установление зависимости интенсивности от электрических параметров плазмы (ток в разряде, напряжение на электродах) и давления газовой технологической среды составляют основу магнитоиндукционных способов контроля стабильности плазмы тлеющего разряда.

В качестве одного из способов контроля стабильности параметров тлеющего разряда предложено использование индукционного

датчика, разработанного на основании закона Фарадея и второго уравнения Максвелла [8].

В соответствии с размерами смотрового окна вакуумной установки был изготовлен индукционный датчик, корпус которого выполнен из диэлектрического материала с пазами для укладки замкнутых контуров из токопроводящего материала (рис. 1). Данная конструкция позволяет регистрировать магнитные поля различной пространственной направленности, образующиеся между электродами. Измеряя внешним прибором напряжение на концах пакетов токопроводящих контуров индукционного датчика, можно судить об изменениях в состоянии плазмы и нарушении стабильности процессов в самом тлеющем разряде.

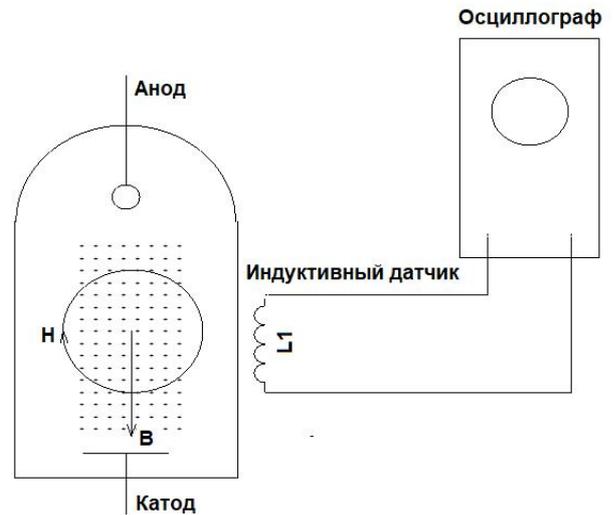


Рис. 1. Схема подключения индукционного датчика

Датчик для контроля электромагнитного излучения плазмы тлеющего разряда (рис. 2) представляет собой устройство, состоящее из корпуса 1 диэлектрического корпуса 2 на котором уложен токопроводящий контур 3 или пакеты токопроводящих контуров 4. Выход 5 токопроводящего контура 3 или пакета токопроводящих контуров 4 присоединены к регистрирующему устройству 6. Расположение пакетов токопроводящих контуров 4 выполнено перпендикулярно оси 7 симметрии токопроводящего контура 3 плоскости 8 смотрового окна 9 вакуумной камеры 10 с равным угловым шагом 11, например, на торовом 12 диэлектрического корпуса 2 [9].

С целью поиска оптимальных конструктивных параметров ИД и возможной коррекции результатов измерений решалась задача идентификации его частотной передаточной

функции. Для получения исходной экспериментальной информации был проведен эксперимент, состоящий в подаче импульсного воздействия на вход датчика и измерение отклика (рис. 3, рис. 4).



Рис. 2. Датчик для контроля электромагнитного излучения плазмы тлеющего разряда

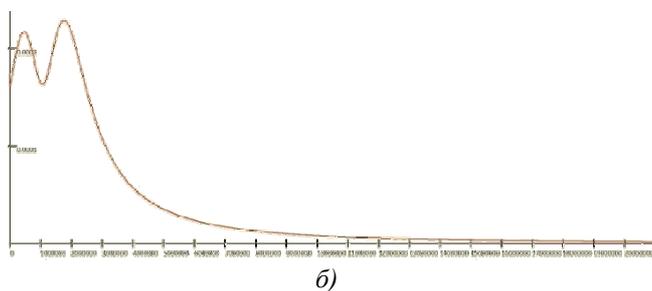
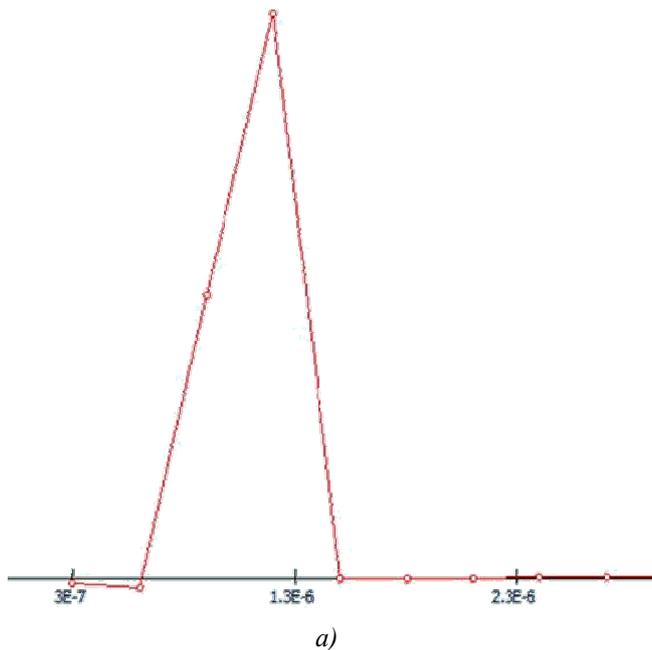


Рис. 3. Тестируемый входной сигнал (ток) (а), спектры входного тестируемого сигнала (б)

На рис. 5 представлены экспериментальный и расчетный сигналы при оптимальном числе модели  $M_{opt} = 62$ . Визуально качество аппроксимации сигнала очень хорошее. Таким образом, получены адекватные модели входного и

выходного сигнала во временной области, далее осуществляется процедура определения их аналитических преобразований Фурье и вычисление прямой и обратной частотных передаточных функций.

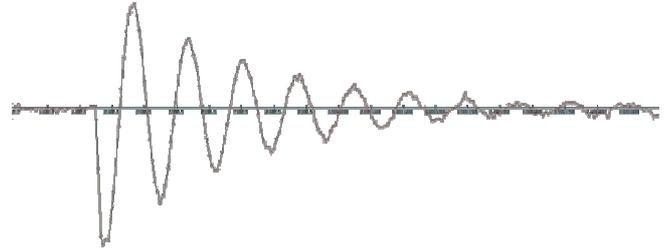


Рис. 4. Отклик на тестирующий сигнал (эксперимент)

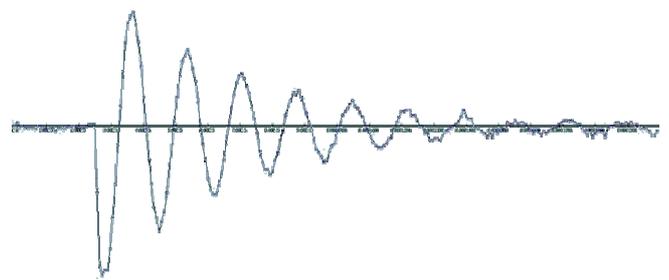


Рис. 5. Экспериментальный (красный) и расчетный (синий) сигналы отклика на тестирующее воздействие при  $M_{opt} = 62$

На рис. 6 представлен аналитический спектр прямой передаточной функции, а на рис. 7 – обратной.

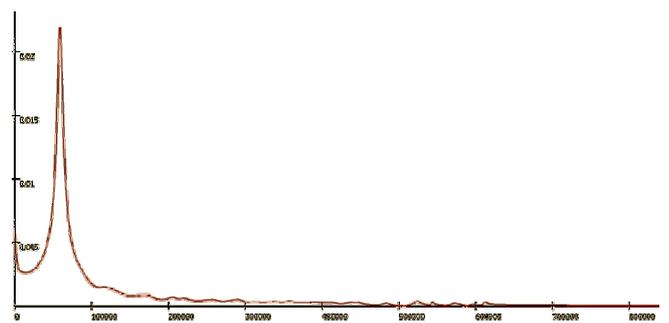


Рис. 6. Спектр прямой частотной передаточной функции датчика

$$W(f) = \frac{X_{\text{вых}}(f)}{X_{\text{вх}}(f)} \text{ в диапазоне до } 8 \cdot 10^6 \text{ Гц}$$

На рис. 8, а представлен график временного сигнала на выходе измерительной системы, а на рис. 8, б – его аналитический спектр.

Результаты деконволюции сигнала в частотной области в виде аналитического спектра представлены на рис. 9. Принципиально не

представляют большого труда деконволюции во временной области, но такая задача менее актуальна, чем первая.

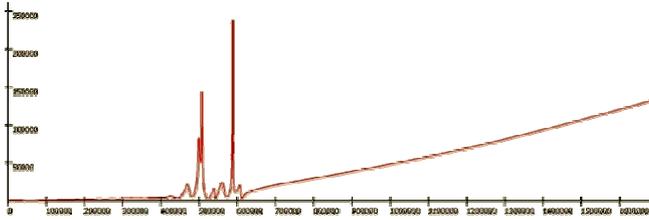
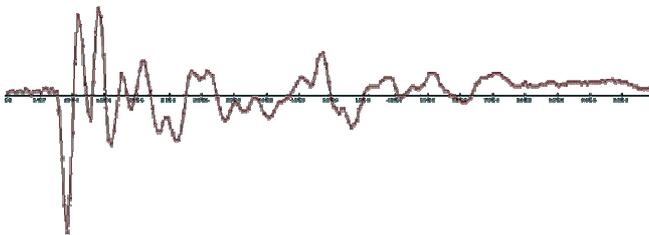
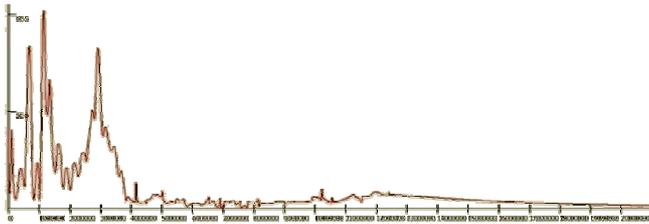


Рис. 7. Спектр обратной передаточной функции датчика

$$W^{-1}(f) = X_{\text{вх}}(f) / X_{\text{вых}}(f) \text{ в диапазоне до } 16 \cdot 10^5 \text{ Гц}$$



a)



b)

Рис. 8. Временной сигнал на выходе измерительной системы (a), аналитический спектр (PF спектр) сигнала на выходе (b)

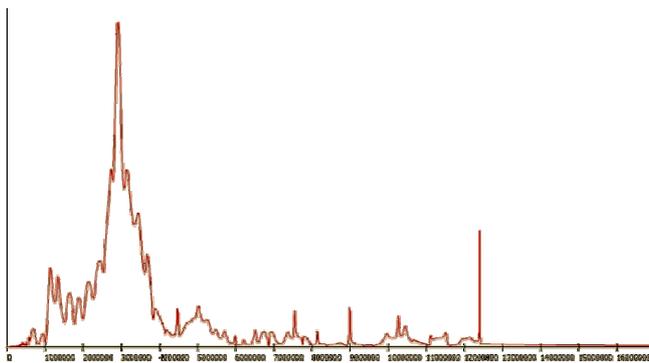


Рис. 9. Восстановленный аналитический спектр (PF спектр) сигнала на входе датчика

$$X_{\text{вх}}(f) = W^{-1}(f) \cdot X_{\text{вых}}(f)$$

Таким образом, показана возможность деконволюции сигнала с измерительного тракта индукционного датчика, что позволяет использовать его для мониторинга и контроля

процесса обработки в тлеющем разряде в контролируемых технологических средах с целью оптимизации и воспроизводимости результатов в автоматизированных технологических средах.

Исследование плазмы тлеющего разряда в контролируемых технологических средах с использованием индукционного датчика позволяет установить влияние изменения формы и амплитуды регистрируемых электромагнитных импульсов на изменение среднеинтегральной величины тока в разряде.

Магнитоиндукционный способ контроля параметров плазмы тлеющего разряда рекомендуется использовать совместно с приборными методами поддержания работы вакуумной установки, для определения выхода установки на рабочий режим и осуществления оперативного вмешательства на ход процесса по характеру изменения электромагнитных импульсов, а также о времени завершения обработки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prony, R. Essai experimental et analytique // Journal de l'Ecole Polytechnique. Paris. 1796. V. 1, I. 2.
2. Марпл, С.Л. – мл., Цифровой спектральный анализ и его применения // пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
3. Кухаренко, Б.Г. Технология спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье // Информационные технологии. – 2008. – № 4. – С. 38–42.
4. Булгаков, Б.В. Колебания. – М.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, –1954.
5. Киренков, В.В., Досько С.И. Типовые обратные задачи и методы их решения при оценке результатов испытаний изделий РКТ // Ракетно-космическая техника. Труды. Сер.ХИ. Вып. 3. Королев: РКК «Энергия». – 2014. – 100 с.
6. Велихов, Е. П. Физические явления в газовой плазме. – М.: Наука, – 1987. – 159 с.
7. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров; ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов [и др.]. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983. – 928 с.
8. Логвин В.А., Редько В.П., Волченков А.В., Логвина Е.В., Терешко И.В. Пат. № 9963 Респ. Беларусь, МПК С23С 14/38. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1. – С. 205.

## REFERENCES

1. Prony, R. Essai experimental et analytique // Journal de l'Ecole Polytechnique. Paris. 1796. V. 1, I. 2.
2. Maple, S.L. – ml. *Digital Spectrum Analysis and Its Use* // transl. from Engl. – М.: Mir, 1990. – pp. 584.

3. Kukhareno, B.G. Spectrum analysis technology based on Prony rapid transformation // *Information Technologies*. – 2008. – No.4. – pp. 38-42.

4. Bulgakov, B.V. *Oscillation*. – M.: State Publishers of Engineering and Theoretical Literature, - 1954.

5. Kirekov, V.V., Dosko, S.I. Standard inverse problems and methods of their solution at assessment of test results of aerospace engineering // *Aerospace Engineering. Proceedings. Series XII*. Issue 3. Korolyov: "Energy" Aerospace Engineering. – 2014. – pp. 100.

6. Velikhov, E.P. *Physical Phenomena in Gas Plasma*. – M.: Science, - 1987. – pp. 159.

7. *Physical Encyclopedic Dictionary* / editor-in-chief A.M. Prokhorov; editorial board: D.M. Alexeev, A.M. Bonch-Bruevich, A.S. Borovik-Romanov [et al.]. – M.: Soviet Encyclopedia, 1983. – pp. 928.

8. Logvin V.A., Redko V.P., Volchenko A.V., Logvina E.V., Tereshko I.V. Pat. No.9963 the Republic of Belarus, IPC C23C 14/38. // National Center of Intellectual Property. – 2014. – No.1 – pp. 205.

Рецензент д.т.н. А.Х. Глибеков

УДК 004.052.3

DOI: 10.30987/article\_5bf702b2d5b4b0.05698577

Н.В. Суханова, к.т.н.

(Институт конструкторско-технологической информатики РАН,  
127055, г. Москва, Вадковский пер. 18, стр. 1а)

E-mail: n\_v\_sukhanova@mail.ru

## Разработка требований к аппаратно-программному комплексу интеллектуальных систем управления в машиностроении

*Представлена разработка обобщенной структурной и функциональной схемы для интеллектуальных систем управления в машиностроении. Выделено инвариантное ядро и прикладная технологическая часть. Сформулированы требования к аппаратно-программному комплексу интеллектуальных систем управления. Предложена новая архитектура, которая объединяет преимущества известных технических систем: высокую производительность, широкие функциональные возможности и искусственный интеллект.*

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы управления; аппаратно-программный комплекс; инвариантное ядро; прикладная технологическая часть.

N.V. Sukhanova, Can. Sc. Tech.

(Institute of Design Technological Informatics of RAS, Building 1a, 18. Vadkovsky Alleyway, Moscow 127055)

## Development of requirements to hardware-software complex of intelligence systems of control in mechanical engineering

*The development of a generalized structural and functional scheme for intelligence control systems in mechanical engineering is presented. The invariant core and applied technological part are emphasized. The requirements to a hardware-software complex of intelligence control systems are formulated. A new architecture is offered which unites the advantages of the well-known engineering systems: high productivity, wide functional potentialities and artificial intelligence.*

**Keywords:** intelligence systems of control; hardware-software complex; invariant core; applied technological part.

В настоящее время быстрыми темпами развиваются и внедряются системы с элементами искусственного интеллекта (ИИ). В системах управления используется один или несколько методов ИИ: искусственные нейронные сети

(ИНС); нечеткая логика (НЛ); генетические алгоритмы (ГА); экспертные системы (ЭС) и др. [1].

Современное машиностроение – это высокотехнологичная отрасль, где широко исполь-