

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

М. В. ГОРБАТКОВ¹, Е. В. ПАРФЕНОВ², С. В. ЖЕРНАКОВ³, Р. Р. НЕВЬЯНЦЕВА⁴

¹mikesg@mail.ru, ²pev_us@yahoo.com, ³zhsviit@mail.ru, ⁴rrnev@mail.ru

Поступила в редакцию 7 марта 2014 г.

Аннотация. Предложена функциональная IDEF0-модель процесса ЭПО с декомпозицией до третьего уровня, проведен анализ элементов системы, рассмотрены методы спектральной диагностики свойств поверхности обрабатываемой детали. Разработан вариант структурной схемы автоматизированной системы управления технологическим процессом ЭПО на основе спектральной диагностики состояния объекта, приведен пример реализации программных элементов АСУ ТП.

Ключевые слова: IDEF0-моделирование; электролитно-плазменная обработка; автоматизация; спектральные методы диагностики.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно развиваются инновационные технологии электролитно-плазменной обработки (ЭПО), позволяющие проводить широкий спектр модификации поверхностных слоев деталей из металлов и сплавов, включающий закалку и упрочнение, нанесение и удаление покрытий, полирование, очистку поверхности, удаление дефектных покрытий [1]. Процесс электролитно-плазменной обработки характеризуется существенной сложностью и нелинейностью, так как на границе раздела «электролит–обрабатываемая поверхность» образуется парогазовая оболочка (ПГО), в которой протекают электроразрядные, электрохимические, плазмохимические, металлургические и гидродинамические процессы, интенсивно модифицирующие поверхностный слой [2]. Сложность и нелинейность процесса ЭПО приводит к неустойчивости поддержания технологических режимов, разбросу результатов обработки, повышенной доле брака. Указанные проблемы могут быть решены с помощью автоматизированных интеллектуальных систем управления при условии, что будет разработана адекватная модель объекта управления [3].

Теоретическая система уравнений, описывающая технологический процесс ЭПО как объект управления, имеет значительную размер-

ность и оказывается неразрешимой на текущем этапе исследования электролитно-плазменных процессов. Это указывает на актуальность создания функциональной модели процесса ЭПО, на основе которой можно получить четкое представление о структуре, значимости и разнообразии элементов и связей в составе исследуемого технологического объекта управления.

Анализ информации по данной тематике показывает, что, несмотря на обилие физико-химических моделей процессов, протекающих в ходе электролитно-плазменной обработки, недостаточно исследованы закономерности, позволяющие идентифицировать состояние поверхности в ходе обработки, и создать таким образом систему управления с обратной связью по параметрам состояния поверхности в условиях неопределенности по исходному состоянию поверхности, качеству питающего напряжения, степени выработки электролита и другим факторам. Поэтому целью данного исследования является разработка функциональной модели процесса ЭПО для формализации закономерностей передачи и преобразования информации в данном сложном и нелинейном объекте управления.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТП ЭПО

Функции, выполняемые блоками и модулями обрабатываемой автоматизированной системы управления технологическим процессом электролитно-плазменной обработки (АСУ ТП

ЭПО), наиболее детально можно формализовать на базе функционального анализа с привлечением IDEF0-технологии [4]. На рис. 1 показана контекстная диаграмма процесса ЭПО с управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта. Процесс автоматизированного управления ТП ЭПО происходит применительно к деталям энергетических машин, преобразуя исходную деталь в обработанную, с использованием рабочего электролита (который может изменяться в зависимости от выбранной детали).

Для протекания процесса необходимы энергетические ресурсы, технологическое и кадровое обеспечение. Протекание процесса регла-

ментируется требованиями технологии к обработанной детали. Основная неопределенность по неконтролируемым переменным состояния поверхности представлена с учетом технологической наследственности. На рис. 2 приведена диаграмма декомпозиции процесса ЭПО с управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.

Требования технологии являются входными для операции задания целей управления, определяющих формирование управляющих воздействий на ТП ЭПО, задающих целевые свойства поверхностного слоя, регламентирующих поддержку принятия решения о начале и окончании обработки.

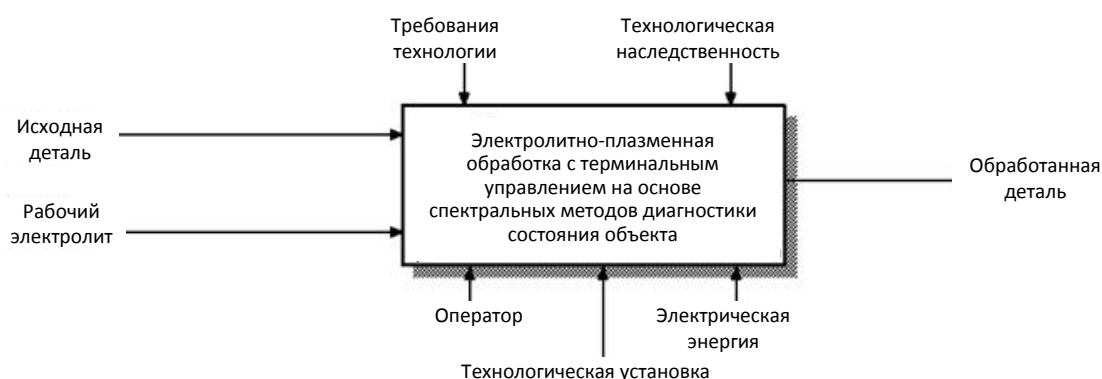


Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса ЭПО с управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта

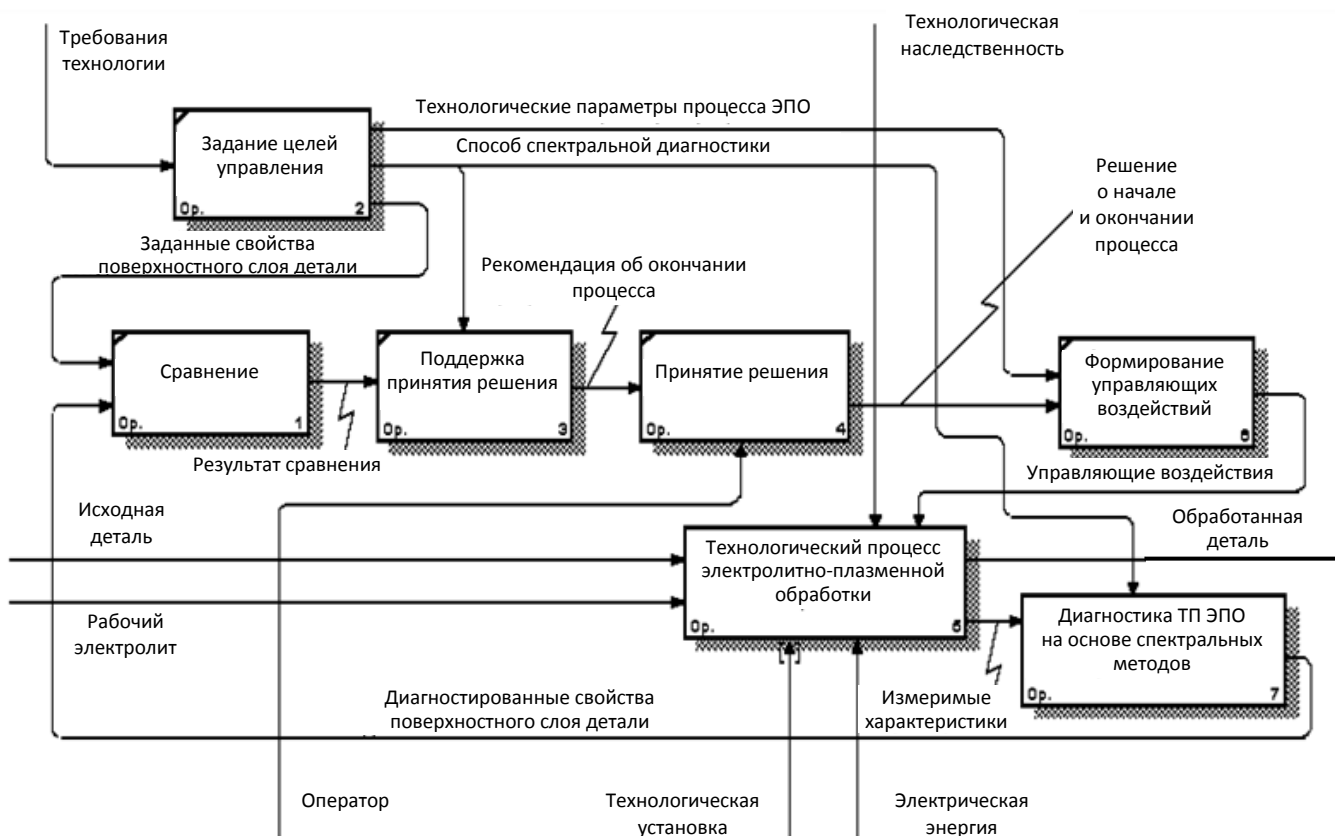


Рис. 2. Диаграмма декомпозиции процесса ЭПО с управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта

Также задание целей управления выбирает способ диагностики объекта управления на основе спектральных методов, формирует входные воздействия на операцию сравнения заданных свойств поверхностного слоя с диагностированными.

Результат сравнения поступает на вход операции поддержки принятия решения, где вырабатывается рекомендация об окончании процесса. Принятие решения осуществляется оператором, который формирует основные управляющие воздействия на технологический процесс ЭПО, такие, как запуск и останов.

Представленная система в результате функционирования блока «Технологический процесс ЭПО» имеет в контуре обратной связи диагностированные значения ненаблюдаемых переменных – свойств поверхностного слоя – вычисляемые в ходе выполнения диагностики процесса на основе спектральных методов применительно к измеримым в ходе обработки электрическим характеристикам объекта.

Рассмотрим диаграмму декомпозиции технологического процесса электролитно-плазменной обработки, приведенную на рис. 3. В технологическом процессе ЭПО, помимо собственно электролитно-плазменного процесса, участвуют процессы обеспечения заданного оптимального сочетания входных воздействий, а именно, подачи электрической и тепловой энергии, перемешивания, охлаждения и фильтрации электро-

лита. Исходная деталь передается в процесс обработки за счет выполнения операций крепления, загрузки и выгрузки детали, причем скорость загрузки также влияет на равномерность результатов обработки. На вход электролитно-плазменного процесса подается регулируемое по заданному закону напряжение, рабочий электролит и обрабатываемая деталь. Поддержание постоянной температуры или ее изменение по заданному закону обеспечивается ресурсами тепловой энергии и охлажденного электролита.

На выходе процесса ЭПО имеется обработанная деталь, характеристики которой неизмеримы общепринятыми методами в ходе обработки, а также измеримые характеристики, включающие напряжение, ток и температуру электролита. Неопределенность результата электролитно-плазменной обработки детали напрямую зависит от степени неопределенности технологической наследственности и опосредованно – от качества электрической энергии и текущего состава рабочего электролита.

Рассмотрим диаграмму декомпозиции процесса электролитно-плазменной обработки (рис. 4), составленную на основе структуры феноменологической модели [5]. Процесс ЭПО содержит 5 основных процессов, объединенных контуром протекания электрического тока, появляющегося при подаче напряжения на рабочий электрод и противоэлектрод.

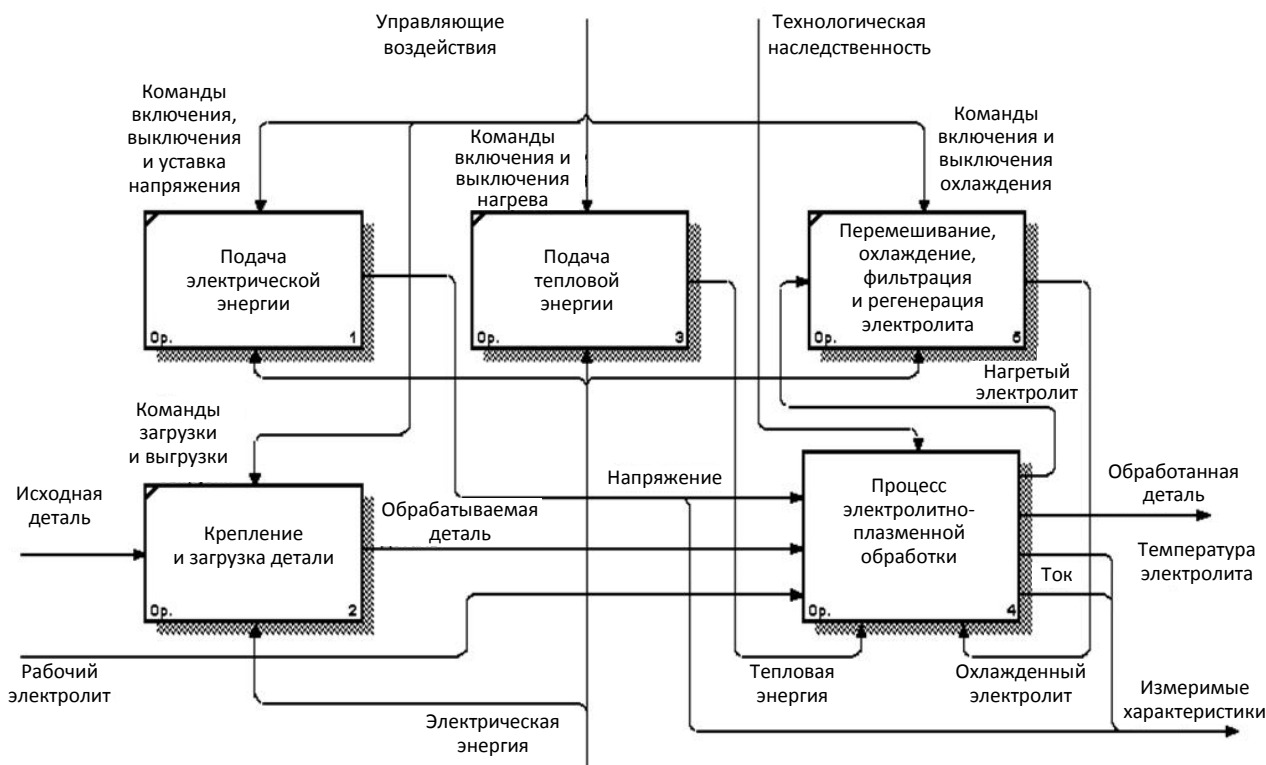


Рис. 3. Диаграмма декомпозиции технологического процесса ЭПО

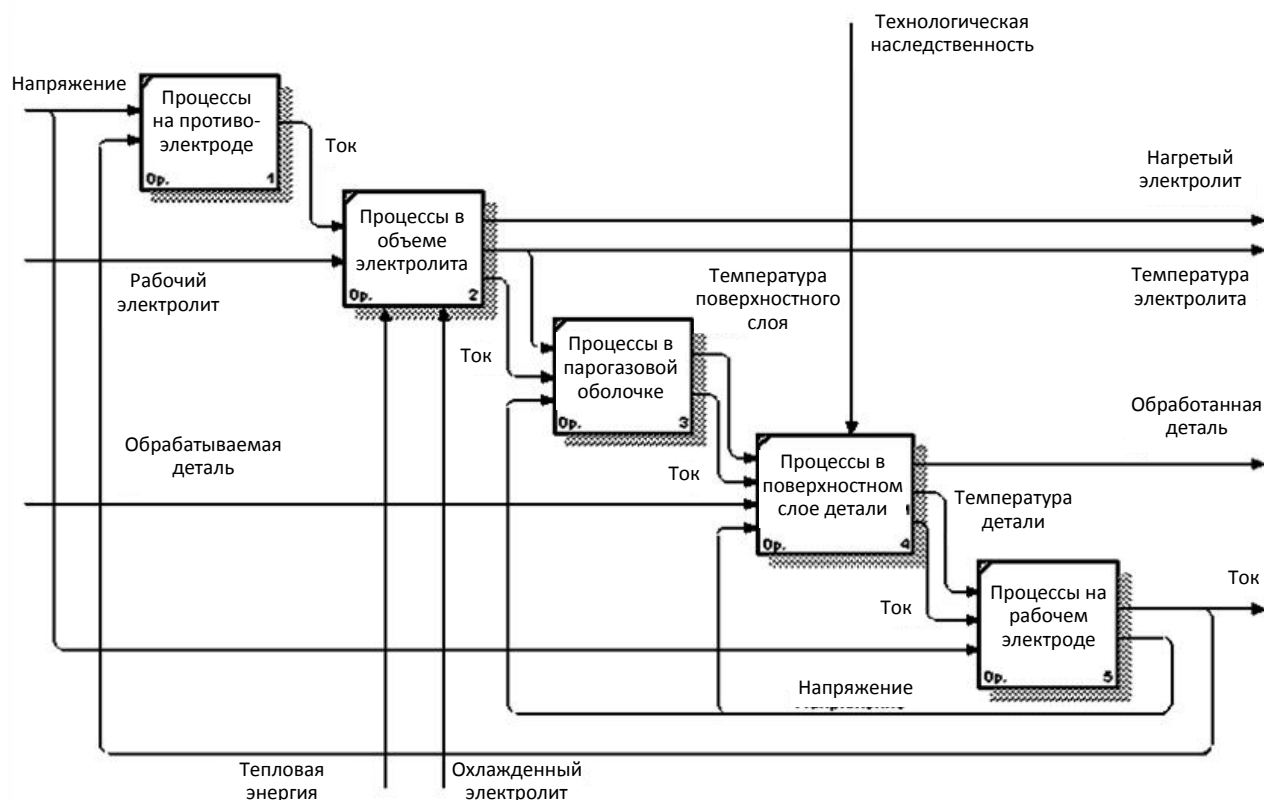


Рис. 4. Диаграмма декомпозиции процесса электролитно-плазменной обработки

Тепловые процессы, происходящие в системе, описываются полем распределения температуры, которое при описании с сосредоточенными параметрами может быть охарактеризовано температурой электролита, температурой объема детали и температурой поверхностного слоя детали, причем для различных процессов ЭПО эти температуры могут отличаться на тысячи градусов [1]. Влияние подводимой тепловой энергии и охлажденного электролита непосредственно сказывается на процессах в объеме электролита, и опосредованно – на остальных процессах. Преобразование обрабатываемой детали в обработанную происходит за счет воздействия процессов в поверхностном слое детали, определяемых процессами в ПГО и на рабочем электроде в условиях неопределенности технологической наследственности. Характеристики этих процессов не поддаются прямым измерениям, поэтому и имеется насущная необходимость в разработке спектральных методов диагностики состояния объекта управления.

Рассмотрим диаграмму декомпозиции операции диагностики ТП ЭПО по спектральным характеристикам (рис. 5). На вход данной операции поступают значения наблюдаемых переменных объекта управления – измеримые характеристики ТП ЭПО. Как было показано выше, данные характеристики представляют собой напряжение, ток и температуру электролита.

Методология спектральной диагностики электролитно-плазменных процессов представлена в работах [6, 7]. Для ее осуществления необходимо измерение мгновенных значений напряжения и тока в «быстром» масштабе времени, определяемом спектральными характеристиками объекта управления и теоремой В. А. Котельникова. Постоянные времена, характеризующие этот масштаб времени, имеют порядок 10^{-1} – 10^{-4} с. Указанные измерения при анализе на интервале эргодичности, составляющем для электролитно-плазменных процессов величины порядка 10–100 с, можно усреднить спектральными методами измерения в «компромиссном» масштабе времени с постоянными времени порядка 10–100 с. К этому масштабу времени с помощью интерполяции также можно привести модели изменения ненаблюдаемых свойств поверхностного слоя в «медленном» масштабе времени с постоянными времени порядка 100–500 с. Следует обратить внимание, что прямые измерения электрических характеристик в «компромиссном» времени, таких как, например среднее значение тока, не несут информации о динамике ненаблюдаемых переменных объекта управления. Расчет спектральных характеристик мгновенных значений тока и напряжения осуществляется в соответствии со способом спектральной диагностики (как правило, запатентованном).

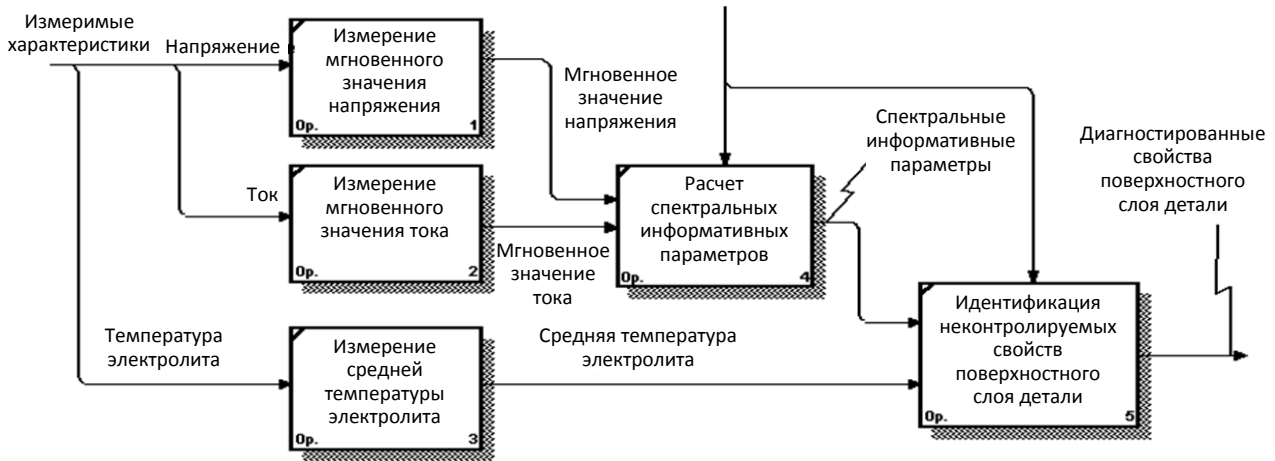


Рис. 5. Диаграмма декомпозиции процесса диагностики ТП ЭПО на основе

Полученные в результате реализации способа спектральной диагностики информативные параметры наряду с информацией о среднем значении температуры электролита поступают на вход операции идентификации неконтролируемых свойств поверхностного слоя. Данная операция может быть реализована как инверсными нейросетевыми моделями, так и способами на основе установленных логических связей между динамикой свойств поверхностного слоя и динамикой спектральных информативных параметров.

Использование инверсных нейросетевых моделей позволяет непосредственно оценить значения неконтролируемых свойств поверхно-

стного слоя. Однако их применение требует специфических программных средств, а также значительного объема экспериментальных данных для составления таблицы обучающих примеров [8]. В условиях серийного производства данные требования являются сравнительно легко реализуемыми.

Использование логических связей между динамикой свойств поверхностного слоя и динамикой спектральных информативных параметров имеет большую универсальность, но меньшую информативность по сравнению с нейросетевыми способами. Однако их использование может проводиться уже в условиях мелкосерийного производства.

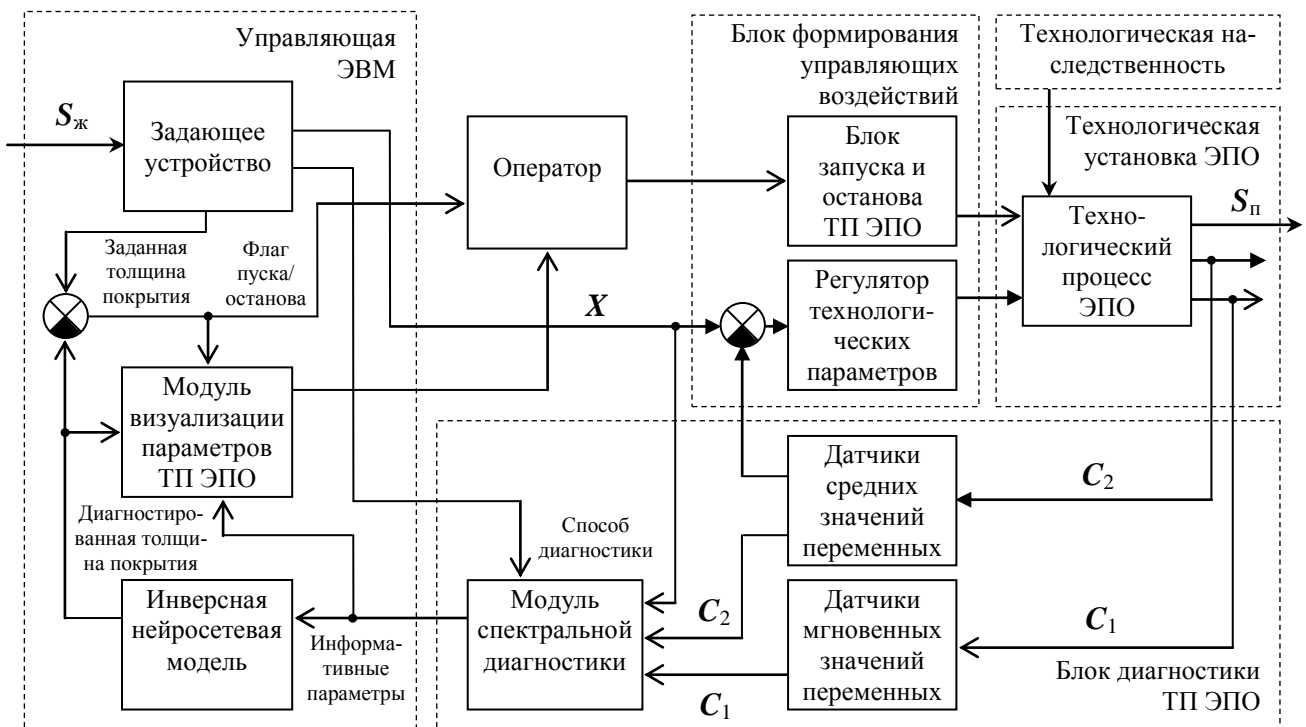


Рис. 6. Структурная схема АСУ ТП ЭПО на примере удаления хромового покрытия

Как правило, выходным параметром процесса идентификации неконтролируемых свойств поверхностного слоя в данном случае является бинарное состояние «целевые свойства поверхности достигнуты» – «целевые свойства поверхности не достигнуты».

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ТП ЭПО

В соответствии с разработанной IDEF0-моделью технологического процесса ЭПО предложен вариант структурной схемы человеко-машинной АСУ ТП, реализующей метод управления на основе спектральных методов диагностики состояния объекта, показанный на рис. 6. Данная система содержит оператора установки, управляющую ЭВМ, блок формирования управляющих воздействий, блок диагностики ТП ЭПО и технологическую установку ЭПО, на которую воздействуют возмущения, и которая функционирует в условиях неопределенности. Наиболее типичными возмущениями являются случайные отклонения параметров питающего напряжения от паспортных. Неопределенность заключается в неполной информации о технологической наследственности состояния поверхности и о параметрах выработки электролита.

Данная система содержит два контура регулирования – по технологическим параметрам X и по длительности процесса. Первый контур построен по стандартному принципу компенсации возмущений с отрицательной обратной связью. Второй контур формирует научную новизну данной системы. Контур управления длительностью ТП ЭПО обеспечивает функционирование системы поддержки принятия решения об окончании процесса с инверсной нейросетевой моделью. Контур работает на основе спектральных методов диагностики состояния объекта и позволяет нейросетевой модели оценивать свойства поверхности (например, толщину покрытия). Время завершения процесса определяется, например, по достижению заданной толщины покрытия. Оператор обеспечивает пуск и останов ТП ЭПО, а также общий мониторинг системы.

Рассмотренная структура АСУ ТП ЭПО обеспечивает останов процесса, проводимого при неизменных во времени оптимальных сочетаниях управляющих воздействий X , при достижении свойствами поверхности $S_{п}$ заданной окрестности желаемых свойств $S_{ж}$.

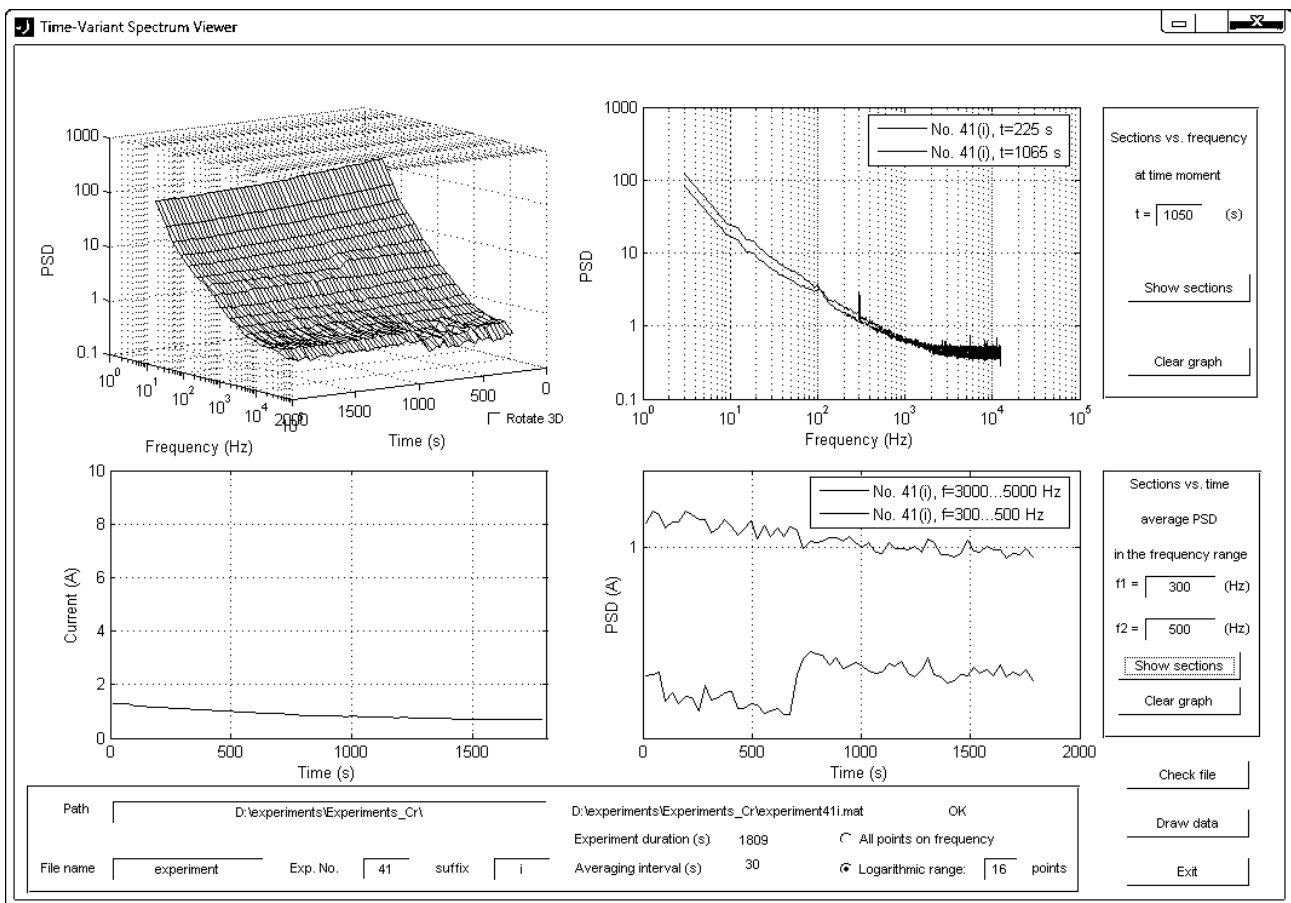


Рис. 7. Визуализация параметров ЭПО в процессе удаления хромового покрытия

Блок диагностики ТП ЭПО обеспечивает оценку неконтролируемых переменных состояния объекта S_n на основе разработанных спектральных методов диагностики, реализующих сбор и обработку данных о контролируемых переменных C_1 и C_2 .

Оценка неконтролируемых переменных состояния объекта, например толщины покрытия, осуществляется инверсной нейросетевой моделью [5]. Элемент сравнения и модуль визуализации параметров ТП ЭПО обеспечивают поддержку принятия решения оператором установки о начале и окончании процесса.

На рис. 7 представлен пример интерфейса программы обработки данных в составе модуля визуализации параметров ТП ЭПО с экспериментальными данными, характеризующими процесс удаления хромового покрытия с поверхности никелевого сплава ХН60ВТ. Приведены графики среднего значения тока и спектральной плотности мощности колебаний тока (СПМ) в различных системах координат. Наиболее информативной здесь является зависимость СПМ в диапазоне частот 3000–5000 Гц от времени, на которой ясно виден скачок кривой при времени 700...800 с, отвечающий времени освобождения поверхности от покрытия, что соответствует способу определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия [9]. Данный эффект проявляется лишь в указанном диапазоне частот и отсутствует на относительно низких частотах и в среднем значении тока. Момент времени появления скачка на кривой служит рекомендацией к завершению процесса ремонта детали при удалении покрытия электролитно-плазменным методом.

ВЫВОДЫ

Проведен функциональный анализ технологического процесса электролитно-плазменной обработки с управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта. Предложена функциональная IDEF0-модель, произведена декомпозиция системы до третьего уровня и выделены необходимые функции для осуществления управления на основе методов спектральной диагностики. Составлена структура АСУ ТП ЭПО с использованием инверсных нейросетевых моделей процесса, осуществляющих поддержку принятия решения об окончании процесса, позволяющая разрабатывать автоматизированные установки электролитно-плазменной обработки с компьютерным управлением и диагностикой свойств поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плазменно-электролитическое** модифицирование поверхности металлов и сплавов / Под общ. ред. И. В. Суминаова. В 2 т. М.: Техносфера, 2011. Т. 1. 464 с.; Т. 2. 512 с. [*Plasma electrolytic surface modification for metals and alloys*, (in Russian), Ed. I. V. Souminov. Moscow: Technosfera, 2011.]
2. **Nevyantseva R. R., Gorbakov S. A., Parfenov E. V., Bybin A. A.** The influence of vapor-gaseous envelope behavior on plasma electrolytic coating removal // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 148, no. 11. P. 30–37. [R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbakov, E. V. Parfenov and A. A. Bybin, "The influence of vapor-gaseous envelope behavior on plasma electrolytic coating removal," in *Surface and Coatings Technology*, vol. 148, no. 11, pp. 30-37, 2001.]
3. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 392 с. [V. I. Vasilyev and B. G. Ilyasov, *Intelligent control systems. Theory and practice*, (in Russian). Moscow: Radiotekhnika, 2009.]
4. **Дубейковский В. И.** Эффективное моделирование с СА Erwin Process Modeler. М.: Диалог-МИФИ, 2009. 384 с. [V. I. Dubeikovskiy, *Effective modelling with CA Erwin Process Modeler*, (in Russian). Moscow: Dialog-MIPhI, 2009.]
5. **Горбатков С. А., Парфенов Е. В., Невьянцева Р. Р.** Управление технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия // *Вестник УГАТУ*. 2003. Т. 4, № 1. С. 145–152. [S. A. Gorbakov, E. V. Parfenov and R. R. Nevyantseva, "Control for technological process of plasma electrolytic coating removal," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 4, no. 1, pp. 145-152, 2003.]
6. **Parfenov E. V., Yerokhin A. L.** Methodology of data acquisition and signal processing for frequency response evaluation during plasma electrolytic surface treatments // *Process Control: Problems, Techniques and Applications* / Ed. S. P. Werther. New York: Nova Publ., 2011. P. 63–96. [E. V. Parfenov and A. L. Yerokhin, "Methodology of data acquisition and signal processing for frequency response evaluation during plasma electrolytic surface treatments," in *Process Control: Problems, Techniques and Applications*, Ed. S. P. Werther. New York: Nova Publ., 2011, pp. 63-96.]
7. **Парфенов Е. В.** Управление технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе пассивной идентификации свойств поверхностного слоя // *Вестник УГАТУ*. 2011. Т. 15, № 4. С. 215–224. [E. V. Parfenov, "Control for technological processes of plasma electrolytic treatments on the base of passive identification of surface layer properties," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 4, pp. 215-224, 2011.]
8. **Жернаков С. В.** Идентификация характеристик ГТД на основе технологии нейронных сетей // *Информационные технологии*. 2010. № 3. С. 39–47. [S. V. Zhernakov, "Identification of gas turbine engine characteristics on the base of neural network technologies," (in Russian), in *Information Technologies*, no. 3, pp. 39-47, 2010.]
9. **Патент РФ № 2227181.** Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Опубл. 20.04.2004. [Nevyantseva R. R., Gorbakov S. A., Parfenov E. V. and Bybin A. A., *Method for determining an ending moment for process of plasma electrolytic coating removal*, (in Russian), Patent RU No. 2227181, Publ. 20.04.2004.]

ОБ АВТОРАХ

ГОРБАТКОВ Михаил Викторович, м-нт каф. электроники и биомед. техники. Б-р в обл. электроники и микроэлектроники (УГАТУ, 2012).

ПАРФЕНОВ Евгений Владимирович, проф. каф. теор. основ электротехн. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по автомат. и упр. технол. проц. и произв. (там же, 2012). Иссл. в обл. управления технол. процессами электролитно-плазменной обработки.

ЖЕРНАКОВ Сергей Владимирович, зав. каф. электроники и биомед. техн. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

НЕВЬЯНЦЕВА Римма Рахимзяновна, доц. каф. общ. химии. Дипл. инж.-металлург и физ.-химик (Челяб. политехн. ин-т, 1965). Канд. хим. наук по неорг. химии (защ. в ИФП СО АН СССР, 1972). Иссл. в обл. ремонта лопаток авиац. двиг. электролитно-плазменным методом.

METADATA

Title: Functional model of plasma electrolytic treatment process as a control plant.

Authors: M. V. Gorbatkov¹, E. V. Parfenov², S. V. Zhernakov³, R. R. Nevyantseva⁴

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ²pev_us@yahoo.com.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 181-188, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: A functional IDEF0 model has been proposed for plasma electrolytic treatment process. The model analyses the process and its elements up to the third level of decomposition and incorporates methods of spectral diagnostics for estimation of surface properties of the treated workpiece. A structure of an automated process control system has been proposed and an example of SCADA software prototype has been shown.

Key words: IDEF0 modelling; plasma electrolytic treatment; automation; spectral methods of diagnostics.

About authors:

GORBATKOV, Mikhail Victorovich, Grad. (MSc) Student, Dept. of Electronic and Biomedical Engineering. Bachelor of Technics & Technology (UGATU, 2012).

PARFENOV, Evgeny Vladimirovich, Prof., Dept. of Theoretical Basis of Electrical Engineering. Dipl. Eng. in Industrial Electronics (UGATU, 1997). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2012).

ZHERNAKOV, Sergey Vladimirovich, Prof., Head of Dept. of Electronic and Biomedical Engineering. Dipl. Eng. in Industrial Electronics (UGATU, 1984). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2005).

NEVYANTSEVA, Rimma Rakhimzyanovna, Assoc. Prof., Dept. of General Chemistry. Dipl. Eng.-Metallurgist (Chelyabinsk polytech. inst., 1965). Cand. of Chem. Sci. (Inst. of Semicond. Phys. Siberian Branch of USSR Acad. of Sci., 1972).