

## РОЗДІЛ V. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5:004.94

**В.В. Казимир**, д-р техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### МНОГОАГЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В УСТАНОВКАХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

**В.В. Казимир**, д-р техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### БАГАТОАГЕНТНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ В УСТАНОВКАХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

**V.V. Kazymyr**, Doctor of Technical Sciences

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

### MULTI-AGENT CONTROL OF THE ELECTRON BEAM IN THE ELECTRON BEAM WELDING MACHINES

*Описывается метод управления электронным пучком в установках электронно-лучевой сварки, оборудованных несколькими электронными пушками, на основе использования многоагентного подхода. В качестве исходной информации, рассматриваются компьютерные модели профиля электронного пучка, полученные в результате предварительной диагностики. Управление параметрами пучка осуществляется по алгоритму, представленному в виде управляющей E-сети, которая является моделью интеллектуального агента. В результате использования многоагентной системы достигается управление всеми электронными пушками установки по заданной программе, устойчивое к отклонениям в физических параметрах пучка.*

**Ключевые слова:** многоагентная система, модель профиля пучка, управляющая E-сеть.

*Описується метод керування електронним пучком в установках електронно-променевого зварювання, обладаних декількома електронними гарматами на основі використання багатоагентного підходу. Як вихідна інформація, розглядаються комп'ютерні моделі профілю електронного пучка, отримані в результаті попередньої діагностики. Управління параметрами пучка здійснюється за алгоритмом, який представляється у вигляді керуючої E-мережі, що є моделлю інтелектуального агента. У результаті використання багатоагентної системи досягається управління всіма електронними гарматами установки за заданою програмою з урахуванням відхилень у фізичних параметрах пучка.*

**Ключові слова:** багатоагентна система, модель профілю пучка, керуюча E-мережа.

*Here is described the method of control of the electron beam in the electron beam welding machines equipped by several electron guns through the use of multi-agent approach. As background information there are considered the computer models of electron beam profile obtained as the result of preliminary diagnostics. Control of the parameters of the beam is carried out according to the algorithm presented in the form of control E-net, which is a model of an intelligent agent. In the result of use of multi-agent system the control of all electronic guns are achieved according to a given program, taking into account variations in the physical parameters of the beam.*

**Key words:** multi-agent system, the model of the beam profile, the Control E-net.

**Постановка проблемы.** Установки электронно-лучевой сварки (ЭЛС) являются яркими представителями класса промышленных роботов [1], на основе которых, при соответствующем уровне их разработки и применения, может быть сформирована интеллектуальная производственная система [2]. Повышенные требования к качеству управления установкой ЭЛС объясняются не только сложностью решаемых задач, но и особенностями самого процесса электронно-лучевой сварки. Электронная сварка, как правило, выполняется автоматически по заранее составленной программе и состоит в прохождении сфокусированного электронного луча большой мощности точно по линии стыка. При этом обязательным условием получения качественного сварного шва является стабильное поддержание заданных программой параметров токов пучка, фокусировки и бомбардировки.

В уникальных установках ЭЛС КЛ117, предназначенных для сваривания буровых долот, используются три электронно-лучевые пушки, которые должны производить сварку трех стыков одновременно. Пушки установлены стационарно и расположены по кругу на

удалении 120 градусов друг от друга, так что их лучи сориентированы на три стыка. Внешний вид установки КЛ117 и образцы долот показаны на рис. 1 и 2, соответственно.

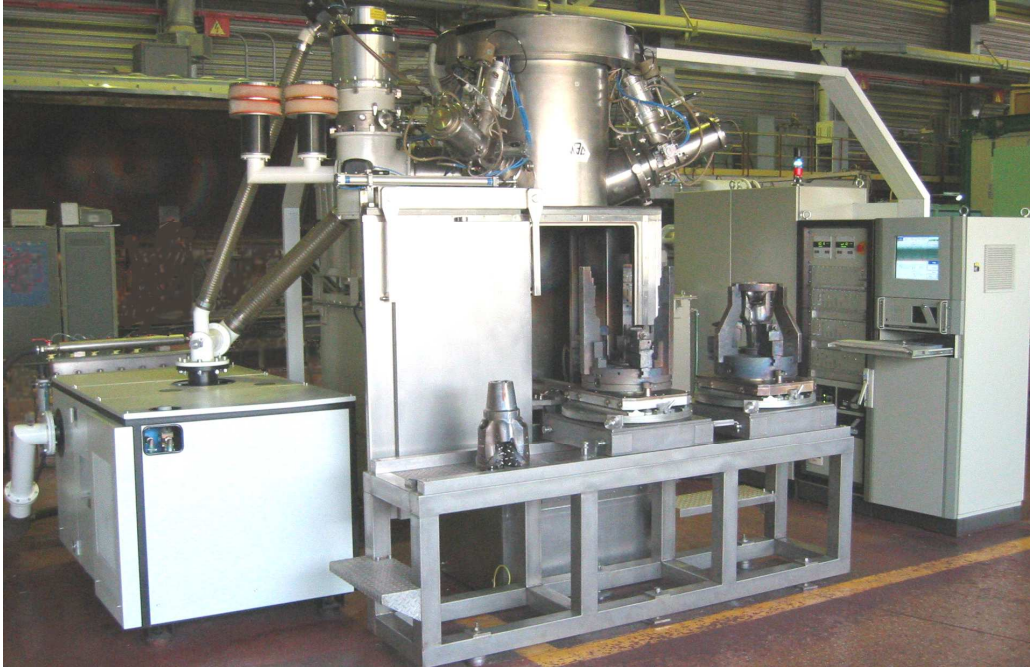


Рис. 1. Внешний вид установки ЭЛС КЛ117

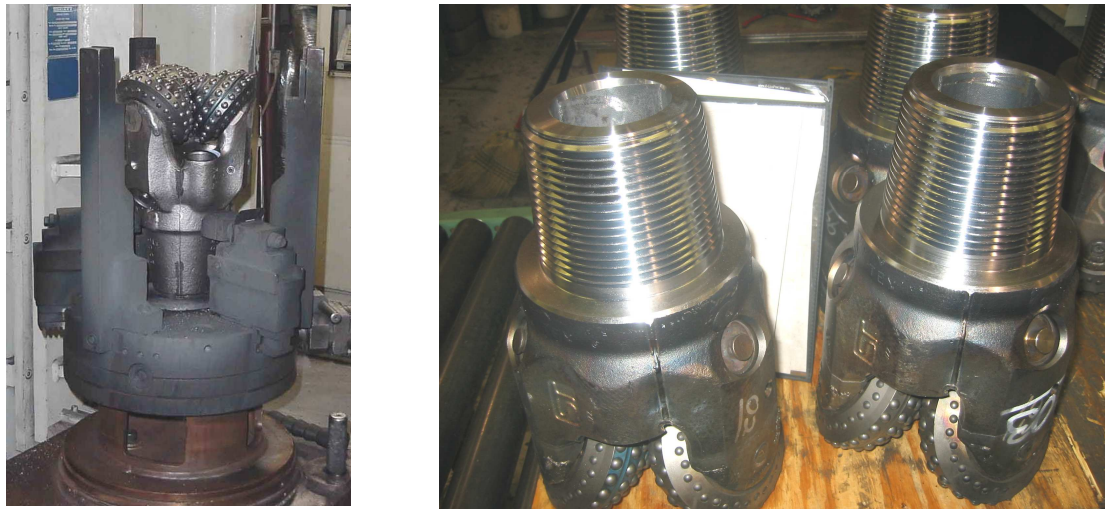


Рис. 2. Образцы свариваемых долот

Каждая электронная пушка управляется своим модулем компьютеризированной системы управления (КСУ), но программа сварки составляется общая и включает задание скорости перемещения изделия, тока пучка и тока фокусировки, значения которых определяются профилем изделия. Проблема, которая возникает в процессе сварки, состоит в том, что вследствие неконтролируемых отклонений в работе электрического оборудования и постепенного неравномерного износа катодов, наблюдается расхождение в физических параметрах электронных пушек. По этой причине заданное значение тока фокусировки обрабатывается каждой из пушек на своем уровне, и получаемые сварные швы отличаются по качеству, что является недопустимым. Задача состоит в том, чтобы, используя встроенные компьютерные модели физических процессов в пушках, обеспечить их согласованную работу по получению швов одинакового качества, несмотря на существующие отклонения в параметрах пушек.

В данной статье описывается метод программного управления, который обеспечивает за счет применения интеллектуальных агентов получение высококачественных сварных швов при одновременной работе трех электронных пушек в составе одной установки ЭЛС.

**Суть многоагентного управления.** Интеллектуальные агенты (ИА) позволяют реализовать задачи, связанные с горизонтальным взаимодействием элементов одного и того же уровня управления. Существует множество определений ИА [3], но все они, в основном, сводятся к свойствам автономности и целенаправленности. При этом характерными для ИА являются три основные функции [4]: 1) восприятие динамики среды; 2) действия, изменяющие среду; 3) рассуждения в целях интерпретации наблюдаемых явлений, решения задач и определения действий. Первые две возможности напрямую отвечают задачам, решаемым элементами управления, в частности связанным с «наделением ответственностью». Третья же функция значительно расширяет внутреннюю структуру элементов управления и создает предпосылки для их взаимодействия.

Взаимодействие агентов организуется в рамках многоагентных систем (МАС). Подробно вопросы теории МАС освещены во множестве работ, которые подробно проанализированы в [5]. Значительно меньше публикаций посвящено вопросу практической реализации МАС, особенно в области управления производством.

Среди множества известных архитектур агентов наиболее подходящей в плане обеспечения их взаимодействия является InterRap-архитектура [6], которая включает три уровня управления: реактивный, плановый и кооперативный. На реактивном и плановом уровнях управления агента логично использовать модели объектов управления, попадающие в его зону ответственности. На кооперативном уровне наличие модели локального объекта управления может стать недостаточным. Поэтому здесь агент формирует собственную модель управляемой системы путем информационного обмена между агентами. Это требует определенных действий и вычислений по определению состояний объектов управления системы, например, посылки запросов другим агентам по информационному каналу, получению ответов о состоянии объектов управления, определению наиболее актуальной информации и т. д. При выработке общего решения роль координатора может взять на себя один из агентов.

**Построение моделей электронного пучка.** Для получения исходной информации об объекте управления будем использовать модели профилей плотности тока пучка, получаемые с помощью системы диагностики, предложенной в [7]. Принцип работы данной системы основан на измерениях распределения мощности в пучке электронов при изменении тока фокусировки. Для этого используется специальный датчик, который пересекается пучком при различных значениях тока фокусировки. В результате строится распределение плотности тока в  $n$  поперечных сечениях луча. В пределах каждого  $k$ -го сечения плотность тока  $J_k$  принимается постоянной. Для нахождения неизвестных  $J_k$  строится система из  $n$  линейных алгебраических уравнений вида

$$S \cdot J = A, \quad (1)$$

где  $S$  – матрица размерности  $n \times n$  с элементами, пропорциональными площадям сечений;

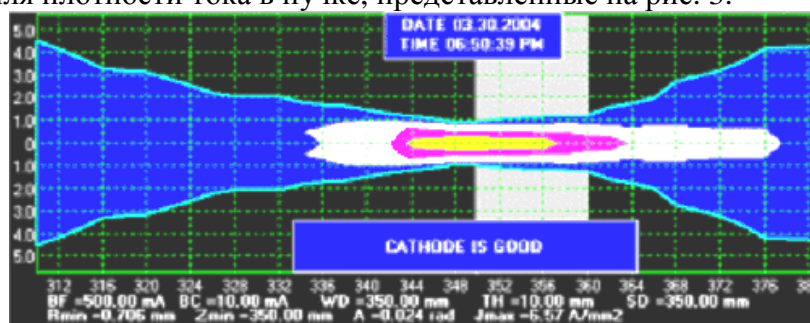
$J$  –  $n$ -мерный вектор искомых значений плотности пучка;

$A$  –  $n$ -мерный вектор амплитуд импульсов в каждом сечении.

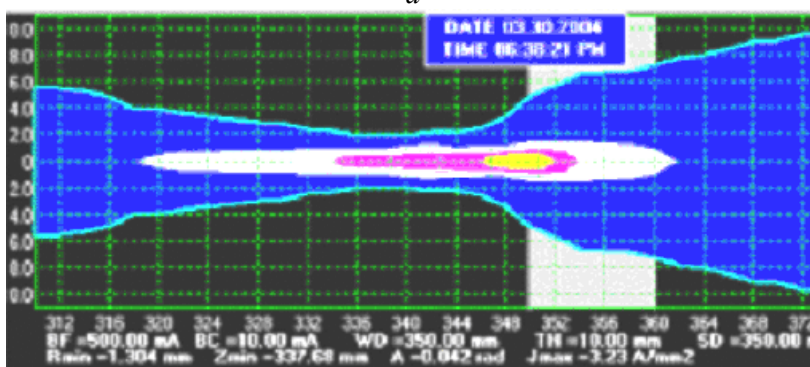
По найденным значениям  $J_k, k = 1, n$  строится распределение плотности тока для каждого поперечного сечения пучка. Сечение с наибольшей плотностью тока на оси  $J_{\max}$  соответствует острой фокусировке пучка. Для каждого распределения рассчитывается значе-

ние эффективного радиуса луча  $R$  в предположении, что распределение плотности тока можно аппроксимировать нормальным законом. В пределах этого радиуса проходит 63 % всего тока луча. Таким образом, острой фокусировке с наибольшей плотностью тока будет соответствовать наименьший эффективный радиус пучка  $R_{\min}$ .

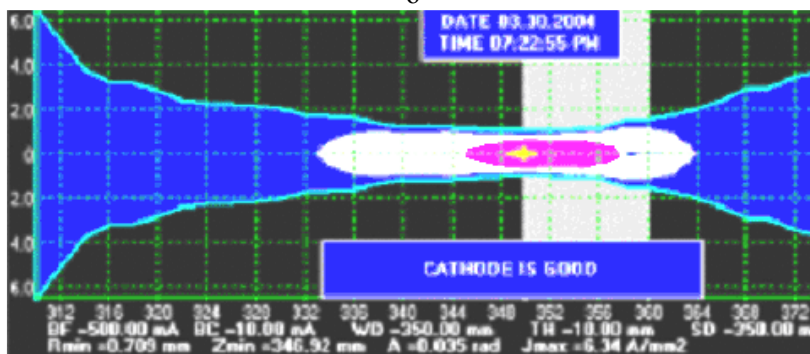
Для трех различных пушек в составе одной установки ЭЛС могут быть получены модели профиля плотности тока в пучке, представленные на рис. 3.



а



б



в

Рис. 3. Модели восстановления профилей плотности тока в пучке:  
а – пушка 1; б – пушка 2; в – пушка 3

Распределение плотности тока по сечениям пучка вдоль его оси отображается четырьмя областями: 10-25 %, 25-50 %, 50-75 % и 75-100 % максимальной плотности. Данные диаграммы являются компьютерными моделями физических процессов в пушках.

**Алгоритм многоагентного управления.** Схема, поясняющая расчеты, используемые при работе предлагаемого алгоритма управления, приведена на рис. 4.

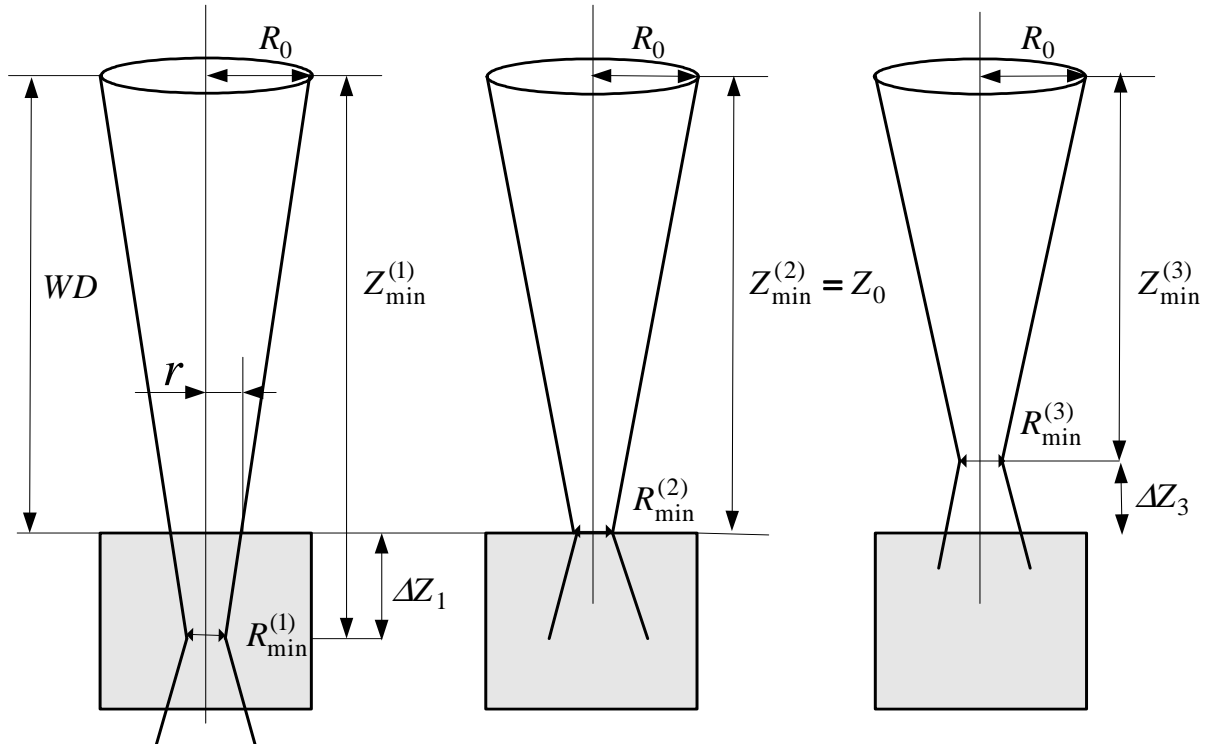


Рис. 4. Схема расчетов алгоритма многоагентного управления

На рис. 4 обозначены:

- $R_0$  – радиус луча в плоскости фокусирующей линзы;
- $R_{\min}^{(i)}$  – наименьший эффективный радиус  $i$ -й пушки;
- $Z_{\min}^{(i)}$  – расстояние до зоны максимальной плотности пучка  $i$ -й пушки;
- $WD$  – расстояние до поверхности изделия (рабочее расстояние);
- $\Delta Z^{(i)}$  – удаление зоны максимальной плотности пучка  $i$ -й пушки от поверхности изделия;
- $r$  – радиус пучка на поверхности изделия.

При рассогласовании  $Z_{\min}^{(i)}$  необходимо привести их к общему показателю, чтобы обеспечить работу всех пушек при выполнении программы сварки, например, на остром фокусе. Для этого рассчитаем поправки для программного значения тока фокусировки  $I_f$  по формуле

$$\Delta I_f^{(i)} = \Delta Z^{(i)} \cdot K_1^{(i)} \cdot K_2^{(i)}, \quad (2)$$

где  $\Delta Z^{(i)} = Z_{\min}^{(i)} - Z_0$ ;

$K_1^{(i)}$  – коэффициент, учитывающий изменение фокусного расстояния при изменении  $Z_{\min}^{(i)}$ ;

$K_2^{(i)}$  – коэффициент, учитывающий изменение фокусного расстояния при изменении тока фокусировки.

При существующих малых значениях углов сходимости лучей коэффициент  $K_1^{(i)}$  определяется по формуле

$$K_1^{(i)} = \frac{R_0 - R_{\min}^{(i)}}{R_{\min}^{(i)}}. \quad (3)$$

Коэффициент  $K_2^{(i)}$  для каждой конкретной пушки оценивается по специальной методике при установке нового катода и используется в расчетах в качестве исходного параметра. Важно отметить, что при увеличении тока фокусировки значение  $Z_{\min}^{(i)}$  уменьшается, т. е. всегда  $K_1^{(i)} < 0$ .

При реализации описанного выше механизма согласования токов фокусировки трех пушек будем использовать систему многоагентного управления, включающую три модуля, работающие на принципах интеллектуальных агентов. Каждый агент будем описывать с помощью модели, представленной в виде управляющей Е-сети. Пример такой модели агента приведен на рис. 5.

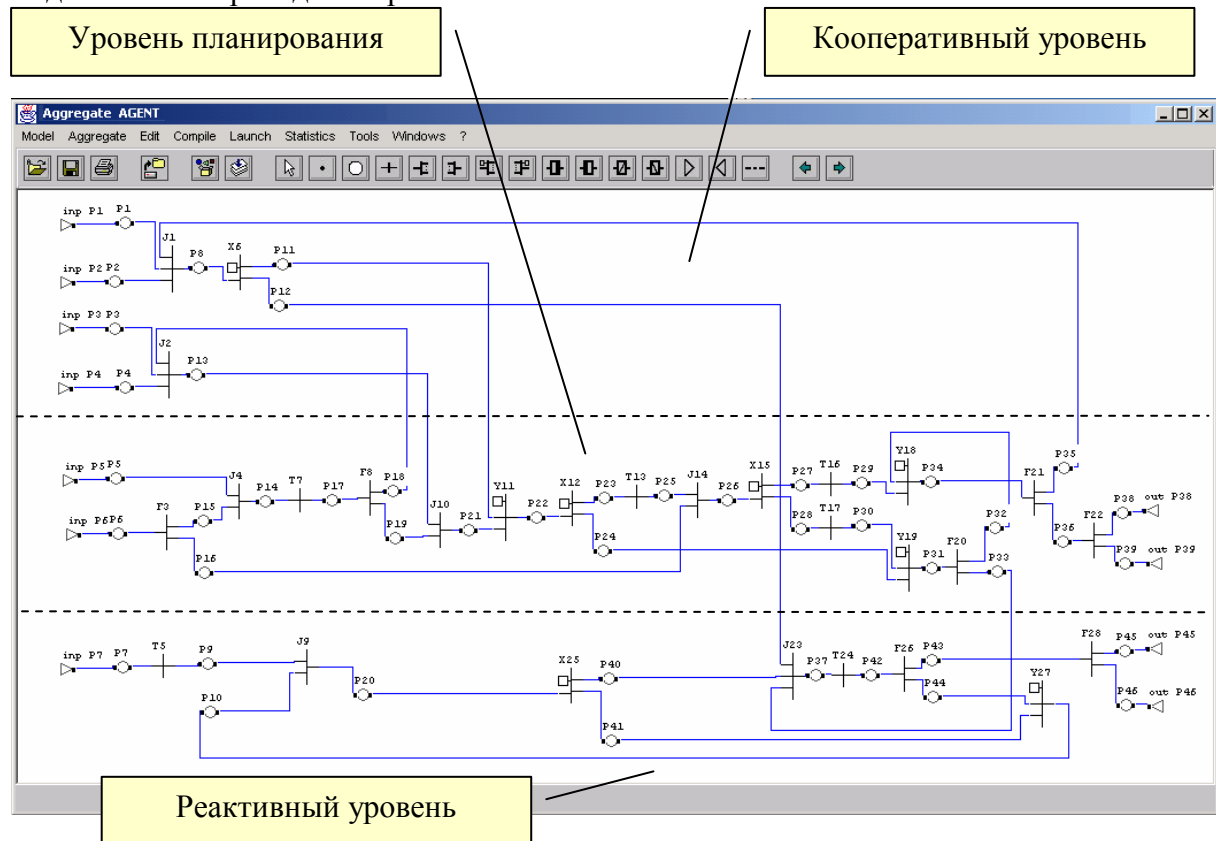


Рис. 5. Модель агента

Управляющие Е-сети (СЕН – control E-net) [8] являются расширением сетей Петри, ориентированные на задачи управления. Как и во всех разновидностях сетей, Петри структура СЕН эквивалентна ориентированному двудольному графу, в котором одно множество вершин есть  $P$  (позиции), другое  $T$  (переходы). Однако позиции Е-сети могут содержать метки с множеством атрибутов  $M = (M(p_1), M(p_2), \dots, M(p_n))$ . Переходы могут быть различных пяти типов  $\{ "T_T", "T_F", "T_j", "T_X", "T_Y" \}$ , которые отличаются правилами перемещения меток из входных позиций перехода в выходные.

От обыкновенных E-сетей [9] управляющие E-сети отличаются введением дополнительных переходов-очереди " $T_{OL}$ " и " $T_{OF}$ ", дополнительным использованием множества переменных сети (входных и выходных сигналов), представленных как в аналоговой, так и цифровой форме, а также множества управляющих отображений, которые определяют правила срабатывания переходов сети, в том числе и с учетом состояния объекта управления. SEN является моделью алгоритма управления: при срабатывании переходов изменяется маркировка переходов, определяющая состояние алгоритма.

Модель агента, представленная на рис. 5, задает три уровня управления током фокусировки пушки:

На кооперативном уровне решаются задачи обмена информацией между агентами, управляющими пушками, с целью определения согласованного уровня фокусного расстояния. Исходные данные поступают в виде меток от смежных агентов через входные граничные позиции  $P1-P4$ . В частности, позиции  $P1$  и  $P2$  получают метки, содержащие два атрибута  $(N, NA)$ , где  $N$  означает номер агента (пушки), а  $NA$  – принятое данным агентом решение о номере ведущей пушки, к уровню фокуса которой должны приводиться остальные агенты. Позиции  $P3$  и  $P4$  получают метки, содержащие набор атрибутов  $(N, DF)$ , где  $DF$  означает вычисленное агентом  $N$  требуемое для него изменение тока фокусировки. Указанные знания кооперативного уровня сравниваются на переходах  $J1$  и  $J2$ , после чего согласованные результаты передаются на плановый уровень агента. При этом возможны два варианта согласования:

- всеми агентами принимается решение о назначении ведущей пушки со средним уровнем  $Z_{WD} = Z_{\min}^k, (Z_{\min}^i \leq Z_{\min}^k \leq Z_{\min}^j), k, j \in \{1, 2, 3\}$ ;

- ведущей принимается пушка, для которой не выполняются установленные ограничения для значений токов фокусировки  $Z_{WD} = Z_{\min}^k, (Z_{\min}^k < Z_{\min}^j) \vee (Z_{\min}^k > Z_{\min}^j), k \neq j; k, j \in \{1, 2, 3\}$ .

На уровне планирования на основе информации о результатах диагностики по данной пушке (метка во входной позиции  $P5 = (Z_{\min}, R_{\min})$ ) и граничных значениях тока фокусировки, определяемых программой сварки (метка во входной позиции  $P6 = (I_{f \min}, I_{f \max}, WD)$ ), производится:

- проверка возможности отработки указанного интервала токов при существующем фокусе (переход  $T7$ ) на удовлетворение существующих ограничений для токов фокусировки  $I_{f \min}^0 \leq (I_f + \Delta I_f) \leq I_{f \max}^0$ ;

- вычисление по формуле (2) на основе согласованного уровня  $Z_{\min}$  требуемого изменения тока  $\Delta I_f$  (переход  $T16$ ), которое на переходе  $X18$  снова проверяется на заданные ограничения;

- выдача данных о результатах расчетов в другие агенты (через позиции  $P38$  и  $P39$  передаются признаки принятия/непринятия согласованного решения данным агентом, а через позиции  $P45$  и  $P46$  – рассчитанное значение  $\Delta I_f$ ).

На реактивном уровне заданное программой значение тока фокусировки  $I_f$  (поступает в позицию  $P7$ ) с помощью функции преобразования перехода  $Y27$  корректируется в соответствии с выработанной поправкой  $(I_f = I_f + \Delta I_f)$  и через выходной сигнал передается для исполнения в модель управления источником питания пушки. От-

работка программных значений тока фокусировки производится в цикле по мере их поступления от модуля управления движением.

Представленная графическая модель агента, полученная с помощью системы имитационного моделирования JESS [10], после обработки препроцессором встраивается в контур управления ЭЛС в виде файла в формате XML, который исполняется специальным интерпретатором сети. Для каждой электронной пушки используется свой модуль управления с аналогичной моделью агента.

**Выводы.** Описанный выше метод управления несколькими электронными пушками в составе одной установки ЭЛС позволяет реализовать многоагентное управление электронным пучком каждой из пушек по одной заданной программе сварки с учетом отклонений в физических параметрах пушек. Это обеспечивает получение однотипных сварных швов в процессе сварки одного изделия несколькими пушками одновременно. В результате существенно сокращается время процесса сварки и достигается ее высокое качество.

#### Список использованных источников

1. Патон Б. Е. Промышленные роботы для сварки / Б. Е. Патон, Г. А. Спыну, В. Г. Тимошенко. – К. : Наукова думка, 1977. – 228 с.
2. Литвинов В. В. Модельно-ориентированное управление как стратегия функционирования интеллектуальных производственных систем / В. В. Литвинов, В. В. Казимир // Математические машины и системы. – 2004. – № 4. – С. 143-156.
3. Тарасов В. Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте / В. Б. Тарасов // Новости искусственного интеллекта. – М. : Ассоциация искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 5-63.
4. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents : Theory and Practice // The Knowledge Engineering Review. – 1995. – Vol. 10, № 2. – P. 115-152.
5. Городецкий В. И. Многоагентные системы (обзор) / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов // Новости искусственного интеллекта. – М. : Ассоциация искусственного интеллекта, 1998. – № 2. – С. 64-116.
6. Muller J. P., Pishel M., Thiel M. Modelling Reactive Behaviour in Vertically Layered Agent Architecture // Intelligent Agents. Proc. of ECAI-94. – Berlin : Springer Verlag, 1994. – P. 261-276.
7. Система диагностики электронного луча в установках для электронно-лучевой сварки / К. С. Акопянц, О. К. Назаренко, В. В. Гумовский, В. П. Чернякин // Автоматическая сварка. – 2002. – № 10. – С. 30-33.
8. Казимир В. В. Моделирование синтетического окружения для реактивных систем / В. В. Казимир // Математичне моделювання. – 2003. – № 2 (10). – С. 24-32.
9. Nutt G.J. Evaluation Nets for Computer Systems Performance Analysis. FJCC, AFIPS PRESS. – 1972. – Vol. 41. – P. 279-286.
10. Kazylyr V., Demshevska N. Application of Java-Technologies for Simulation in the Web // Lecture Notes in Informatics (LNI) Proceedings. Series of the German Informatics Society (GI) : Bohn. – 2001. – Vol. P-2. – P. 173-184.