

Модель функционирования и регулирования процесса раздувки канала алюминиевых испарителей

В. А. Мустафаев • С. И. Курбанова • К. И. Султанова

*Сумгаитский государственный университет, Азербайджан
Азербайджанский университет архитектуры и строительства*

В работе представлен интегрированный подход моделирования и регулирования процесса раздувки канала в действующем производстве алюминиевых испарителей. Разработана гибридная модель функционирования активных элементов модуля вскрытия «колокольчика» и образования канала алюминиевых испарителей в виде модификации сетей Петри. Представлены множество позиций, переходов и граф-схемы модели. На основе входных и выходных позиций переходов сети сформирована база правил продукции в виде «условие–действие». Создана база нечетких продукционных правил для регулирования давления воды в канале испарителя. С применением интервальных трапециевидных функций принадлежности установлена зависимость между давлением воды в канале испарителя и углом поворота вентиля крана водяного насоса гидропресса

Модель; сети Петри; давление воды; функция принадлежности; раздувка канала.

ВВЕДЕНИЕ

В действующем производстве [Mus24] образование канала алюминиевых испарителей выполняется по следующей технологии. Заготовка алюминиевого испарителя после правильной машины поступает к позиции устройства вскрытия «колокольчика». Рабочий берет заготовку испарителя и на специальном приспособлении выполняет операцию вскрытия «колокольчика», высота которого не должна превышать 10 ± 1.0 мм, подбрасывает его на конвейер, который перемещает заготовку испарителя к одной из позиций гидропрессов, снабженных специальными штампами. Прессовщик, обслуживающий гидропресс, подхватывает заготовки испарителя по одной штуке и выполняет операцию образования канала. Укладывает заготовку испарителя на матрицу штампа гидропресса и подравнивает его таким образом, чтобы «колокольчик» находился против иглы гидроцилиндра, продольные стороны его располагались на бортиках плиты. При этом продольная ось заготовки испарителя должна быть параллельна оси плиты (при выполнении этих операций рука рабочего находится между верхней и нижней плитами штампа). Включает верхнюю плиту (пуансон) штампа. После опускания пуансона необходимо следить за тем, чтобы не было сплющивания «колокольчика». В случае сплющивания заготовка испарителя вынимается из штампа, и «колокольчик» вскрывается вручную заново. Кромки заготовок испарителя при образовании канала должны быть зажаты выступами штампа, ширина которых не менее 10 ± 1.0 мм. Далее последовательно включаются гидрошприц, водяной насос, и под давлением 12.0 МПа образуется канал в испарителе.

Мустафаев В. А., Курбанова С. И., Султанова К. И. Модель функционирования и регулирования процесса раздувки канала алюминиевых испарителей // СИИТ. 2026. Т. 8, № 2(26). С. 47-58. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no2-p47](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no2-p47). EDN: QJHCBM.

Mustafaev V. A., Gurbanova S. I., Sultanova K. I. "Model of operation and regulation of the process of blowing the channel of aluminum evaporators." // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 2(26), pp. 47-58. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no2-p47](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no2-p47). EDN: QJHCBM (In Russian).

При достижении установленного давления (определяется по показанию манометра) обслуживающий персонал последовательно отключает водяной насос, гидрошприц и исполнительный механизм пуансона, снимает испаритель с матрицы штампа и подбрасывает его на конвейер. Далее операция повторяется аналогично вышеизложенному.

Как видно, основные операции, выполняемые на данном модуле, носят характер загрузки и разгрузки технологического оборудования, контроль за ходом их выполнения и операции перемещения испарителей с одной позиции на другую. Следовательно, для автоматизации работы данного участка необходимо применять промышленные роботы и специальные манипуляторы. Для управления работой и координации взаимодействия и синхронизации функционирования активных элементов участка необходимы сбор и обработка большого объема информации и выработка управляющих воздействий на множество исполнительных механизмов в реальном масштабе времени с применением современных математических средств, в первую очередь, сетей Петри и продукционных систем.

ИССЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКА ОБРАЗОВАНИЯ КАНАЛА АЛЮМИНИЕВЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ

Исследование участка показало следующее. Обслуживающий персонал гидропресса выполняет монотонно повторяющиеся операции в агрессивных условиях (высокая влажность рабочего места), и их работа является наиболее трудоемкой, так как за смену они подают под пресс 1.0–1.2 тыс. штук заготовок алюминиевых испарителей (около 2–3 т металла по 2.0–2.5 кг каждый). Установка заготовки испарителя на матрицу штампа гидропресса, снятие ее с матрицы должны совмещаться с операцией снятия заготовки испарителя с конвейера и установкой его в накопитель, что часто приводит к несчастным случаям (в среднем 2–3 зарегистрированных случая в год). Недопустим с точки зрения экономичности простой дорогостоящих и мощных гидравлических прессов, которые рассчитаны для работы в непрерывном режиме.

Участок отличается большим количеством неисправимого брака (12–15%) по вине работников в общем производстве, а именно: забоины и вмятины на испарителе при небрежной установке и снятии его с матрицы штампа при образовании канала: образование низких или высоких (также ребристых) каналов, соответственно при малых и высоких давлениях, зависящие от времени между включением и отключением гидрошприца; прокол иглой «колокольчика» при неправильной установке испарителя на матрицу штампа и др. Следовательно, производительность каждого гидропресса и в целом всего участка зависят от опыта и физического состояния занятого на данном участке обслуживающего персонала. При переходе на выпуск других типоразмеров испарителей осуществляется ручная переналадка технологического оборудования: демонтируют матрицу и пуансон штампа; снимают его с гидропресса с помощью крана; устанавливают матрицу и пуансон нового штампа на гидропресс; открепляют с упора устройство вскрытия «колокольчика» и устанавливают на новое место; перемещают гидрошприц вдоль боковой кромки матрицы штампа на необходимое расстояние.

Система управления (СУ) данного участка должна решать следующие основные задачи [Myc12, Stry18]: прием и обработку информации от множества датчиков дискретного и аналогового характера и вырабатывать управляющие воздействия на множество исполнительных механизмов также дискретного и аналогового характера. Алгоритмическое и программное обеспечение СУ участком должно обеспечить его функционирование в реальном масштабе времени. Схема роботизации, обеспечивающая перечисленные технические условия, должна выполнять следующие функции: автоматическую транспортировку заготовок испарителей к устройствам позиционирования; позиционирование и перемещение их к столам устройства вскрытия «колокольчика»; выполнение операции вскрытия «колокольчика» и перемещение заготовок испарителей к позиции образования канала; выполнение операции образования канала алюминиевых испарителей; захватывание и перемещение испарителей к позиции готовой продукции; транспортировку испарителей к позиции загрузки конвейера печи сушки; перемещение испарителей в контейнер бракованной продукции (если «колокольчик» открыт неправильно).

Схема роботизации участка образования канала алюминиевых испарителей для выполнения перечисленных функций включает: автономно функционирующие модули вскрытия «колокольчика» и образования канала испарителей; модуль АТС: модуль разгрузки АТС и загрузки конвейера печи сушки.

В состав каждого модуля вскрытия «колокольчика» и образования канала испарителей входят: гидропресс ГП-200; промышленный робот (ПР) РД-105; устройство вскрытия «колокольчика»; накопитель для бракованных испарителей.

Модуль работает следующим образом: при наличии заготовки испарителя на столе подъемно-позиционирующего устройства (ППУ) автоматических транспортных систем (АТС) ПР захватывает заготовку испарителя и перемещает его к столу устройства вскрытия «колокольчика»: последний включается, и по окончании технологической операции вскрытия «колокольчика» ПР перемещает заготовку испарителя к позиции гидропресса (при неудачном вскрытии «колокольчика» заготовка испарителя перекладывается в накопитель для бракованных изделий); после установки заготовки испарителя на матрицу штампа рука ПР возвращается в исходное положение, и при необходимости загружает устройство вскрытия «колокольчика» новой заготовкой испарителя, далее включается пуансон штампа гидропресса и гидрошприц; при этом гидрошприц перемещается к «колокольчику» испарителя; по окончании этих операций включается водяной насос, и под давлением раздувается канал испарителя; по сигналу от контактного манометра при достижении установленного давления последовательно отключаются водяной насос, гидрошприц и исполнительный механизм пуансона штампа; по достижении пуансоном своего исходного состояния рука ПР перемещается к позиции раздувки гидропресса, захватывает испаритель и перемещает последний к позиции готовой продукции: далее цикл повторяется аналогично вышеизложенному.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗДУВКИ КАНАЛА АЛЮМИНИЕВЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ

Гибридная модель функционирования модуля образования канала алюминиевых испарителей представляется в виде интегрированной модификации сетей Петри [Пит84, Мам17, Лом04]:

$$C = (P, T, I, O, \mu_0, R),$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, n > 0$ – конечное непустое множество условий;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}, m > 0$ – конечное непустое множество переходов;

$I: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}, O: T \times P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ – соответственно функции входных и выходных инцидентов;

$\mu_0: P \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ – начальное состояние;

R – база продукции, представленных в виде «ЕСЛИ ..., ТО».

Множество позиций:

p_1 – отсутствие испарителя на столе ППУ;

p_2 – наличие испарителя на столе ППУ;

p_3 – ППУ находится в конечном положении, и на его столе имеется испаритель;

p_4 – ППУ находится в конечном положении, и на его столе отсутствует испаритель;

p_5 – подъемное устройство ПР в конечном положении, рука и поворотное устройство ПР в исходном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_6 – подъемное, поворотное устройство и рука ПР в исходном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_7 – подъемное, поворотное устройство и рука ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_8 – подъемное устройство ПР в конечном положении, рука и поворотное устройство ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_9 – подъемное устройство ПР и упор в конечном положении, поворотное устройство и рука ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{10} – подъемное устройство ПР и упор в конечном положении, поворотное устройство ПР в среднем положении, рука ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{11} – подъемное устройство, рука, упор ПР в конечном положении, поворотное устройство ПР в среднем положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{12} – подъемное устройство ПР в исходном положении, рука и упор ПР в конечном положении, поворотное устройство ПР в среднем положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{13} – устройство вскрытия «колокольчика» и игла устройства вскрытия «колокольчика» в исходном положении, отсутствует испаритель на столе устройства вскрытия «колокольчика»;

p_{14} – подъемное устройство ПР в исходном положении, поворотное устройство ПР в среднем положении, рука и упор ПР в конечном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{15} – устройство вскрытия «колокольчика» и его игла в исходном положении, имеется испаритель на столе устройства вскрытия «колокольчика»;

p_{16} – устройство вскрытия «колокольчика» в конечном положении и его игла в конечном положении, имеется испаритель на столе устройства вскрытия «колокольчика»;

p_{17} – устройство вскрытия «колокольчика» и его игла в конечном положении, имеется испаритель на столе устройства вскрытия «колокольчика»;

p_{18} – устройство вскрытия «колокольчика» в конечном положении и его игла в исходном положении, имеется испаритель на столе устройства вскрытия «колокольчика»;

p_{19} – устройство вскрытия «колокольчика» и его игла в конечном положении, имеется испаритель на столе устройства вскрытия «колокольчика»;

p_{20} – подъемное устройство ПР в исходном положении, поворотное устройство ПР в среднем положении, рука ПР в конечном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{21} – подъемное устройство, рука и упор ПР в конечном положении, поворотное устройство ПР в среднем положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{22} – подъемное устройство и упор ПР в конечном положении, поворотное устройство ПР в среднем положении, рука ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{23} – подъемное и поворотное устройство ПР в конечном положении, рука и упор ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{24} – пуансон штампа гидропресса и гидрошприц в исходном положении, отсутствует испаритель на матрице штампа гидропресса;

p_{25} – подъемное устройство, поворотное устройство и рука ПР в конечном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{26} – поворотное устройство и рука ПР в конечном положении, подъемное устройство ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{27} – поворотное устройство и рука ПР в конечном положении, подъемное устройство ПР в исходном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{28} – пуансон штампа гидропресса и гидрошприц в исходном положении, имеется испаритель на матрице штампа гидропресса;

p_{29} – подъемное и поворотное устройство и рука ПР в конечном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{30} – подъемное и поворотное устройство ПР в конечном положении, рука ПР в исходном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{31} – пуансон штампа гидропресса в конечном положении, гидрошприц в исходном положении и имеется испаритель на матрице штампа гидропресса;

p_{32} – пуансон штампа гидропресса и гидрошприц в конечном положении, имеется испаритель на матрице штампа гидропресса;

p_{33} – пуансон штампа гидропресса в конечном положении, гидрошприц в исходном положении, имеется готовое изделие на матрице штампа гидропресса;

p_{34} – пуансон штампа гидропресса и гидрошприц в исходном положении, имеется готовое изделие на матрице штампа гидропресса;

p_{35} – подъемное и поворотное устройство и рука ПР в конечном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{36} – подъемное устройство ПР в конечном положении, рука и поворотное устройство ПР в конечном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{37} – подъемное устройство ПР в исходном положении, рука и поворотное устройство ПР в конечном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{38} – подъемное и поворотное устройство и рука ПР в конечном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{39} – подъемное и поворотное устройство ПР в конечном положении, рука и поворотное устройство ПР в конечном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{40} – поворотное устройство и рука ПР в исходном положении, подъемное устройство ПР в конечном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{41} – подъемное устройство и рука ПР в конечном положении, поворотное устройство ПР в исходном положении, захватное устройство ПР закрыто;

p_{42} – подъемное устройство и рука ПР в конечном положении, поворотное устройство ПР в исходном положении, захватное устройство ПР открыто;

p_{43} – наличие испарителя на столе ППУ и К1 отключено.

Множество переходов:

t_1 – включение конвейера К1;

t_2 – отключение конвейера К1;

t_3 – включение подъемного устройства ППУ;

t_4 – отключение подъемного устройства ПР по первой рабочей зоне;

t_5 – включение захватного устройства ПР по первой рабочей зоне;

t_6 – отключение подъемного устройства ППУ;

t_7 – включение подъемного устройства ПР по первой рабочей зоне;

t_8 – включение упора ПР;

t_9 – включение поворотного устройства ПР по первой рабочей зоне;

t_{10} – включение с руки ПР по первой рабочей зоне;

t_{11} – отключение подъемного устройства ПР по второй рабочей зоне;

t_{12} – отключение захватного устройства ПР по второй рабочей зоне;

t_{13} – включение устройства вскрытия «колокольчика»;

t_{14} – включение игла устройства вскрытия «колокольчика»;

t_{15} – отключение игла устройства вскрытия «колокольчика»;

t_{16} – отключение устройства вскрытия «колокольчика»;

t_{17} – включение захватного устройства ПР по второй рабочей зоне;

t_{18} – включение подъемного устройства ПР по второй рабочей зоне;

t_{19} – отключение руки ПР по второй рабочей зоне;

t_{20} – отключение упора ПР;

t_{21} – включение руки ПР по второй рабочей зоне;

t_{22} – отключение подъемного устройства ПР по третьей рабочей зоне;

t_{23} – отключение захватного устройства ПР по третьей рабочей зоне;

t_{24} – включение подъемного устройства ПР по третьей рабочей зоне;

t_{25} – отключение руки ПР по третьей рабочей зоне;

t_{26} – включение пуансона штампа гидропресса;

t_{27} – включение гидропресса;

- t_{28} – отключение гидрошприца гидропресса;
- t_{29} – отключение пуансона штампа гидропресса;
- t_{30} – включение руки ПР по третьей рабочей зоне;
- t_{31} – отключение подъемного устройства ПР по четвертой рабочей зоне;
- t_{32} – включение захватного устройства ПР по четвертой рабочей зоне;
- t_{33} – включение подъемного устройства ПР по четвертой рабочей зоне;
- t_{34} – отключение руки ПР по четвертой рабочей зоне;
- t_{35} – отключение поворотного устройства ПР по четвертой рабочей зоне;
- t_{36} – включение руки ПР по четвертой рабочей зоне;
- t_{37} – отключение захватного устройства ПР по четвертой рабочей зоне;
- t_{38} – отключение руки ПР по первой рабочей зоне.

Граф-схема модели функционирования модуля образования канала показана на рис. 1.

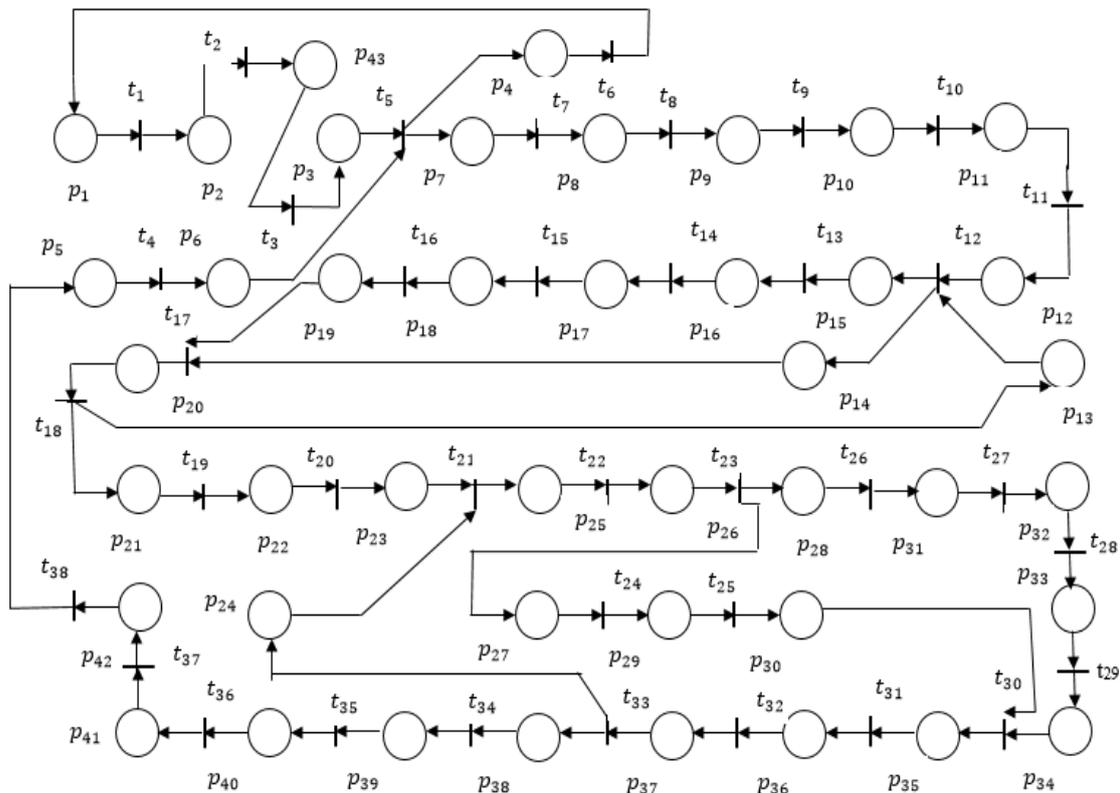


Рис. 1 Граф-схема модели функционирования модуля образования канала

Учитывая входные и выходные функции каждого перехода сети, продукция в виде «условие–действие» состоит из следующих импликаций [Mam13, Zho16]:

$$\begin{aligned}
 & p_1 \rightarrow t_1; p_2 \rightarrow t_2; p_{43} \rightarrow t_3; p_5 \rightarrow t_4; p_3 \& p_6 \rightarrow t_5; p_4 \rightarrow t_6; p_7 \rightarrow t_7; p_8 \rightarrow t_8; \\
 & p_9 \rightarrow t_9; p_{10} \rightarrow t_{10}; p_{11} \rightarrow t_{11}; p_{12} \& p_{13} \rightarrow t_{12}; p_{15} \rightarrow t_{13}; p_{16} \rightarrow t_{14}; p_{17} \rightarrow t_{15}; \\
 & p_{18} \rightarrow t_{16}; p_{14} \& p_{19} \rightarrow t_{17}; p_{20} \rightarrow t_{18}; p_{21} \rightarrow t_{19}; p_{22} \rightarrow t_{20}; p_{23} \& p_{24} \rightarrow t_{21}; \\
 & p_{25} \rightarrow t_{22}; p_{26} \rightarrow t_{23}; p_{27} \rightarrow t_{24}; p_{29} \rightarrow t_{25}; p_{28} \rightarrow t_{26}; p_{31} \rightarrow t_{27}; p_{32} \rightarrow t_{28}; \\
 & p_{33} \rightarrow t_{29}; p_{30} \& p_{34} \rightarrow t_{30}; p_{35} \rightarrow t_{31}; p_{36} \rightarrow t_{32}; p_{37} \rightarrow t_{33}; p_{38} \rightarrow t_{34}; p_{39} \rightarrow t_{35}; \\
 & p_{40} \rightarrow t_{36}; p_{41} \rightarrow t_{37}; p_{42} \rightarrow t_{38}.
 \end{aligned}$$

БАЗА ПРАВИЛА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ В КАНАЛЕ ИСПАРИТЕЛЯ

Приняты следующие обозначение:

A – «давление воды в канале испарителя»; диапазон изменения $[0.15]$.

B – «усилие пуансона штампа гидропресса»; диапазон изменения [0.30].

C – «вентиль крана водяного насоса гидропресса»; диапазон изменения [0.90].

Продукционные системы регулирования давления воды в канале испарителя состоят из следующих правил:

1. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя отрицательное большое, и усилие пуансона штампа гидропресса максимально ниже допуска, ТО повернуть вентиль крана водяного насоса гидропресса на большой угол вправо.

2. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя отрицательное среднее, и усилие пуансона штампа гидропресса существенно ниже допуска, ТО повернуть вентиль крана водяного насоса гидропресса на небольшой угол вправо.

3. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя отрицательное малое, и усилие пуансона штампа гидропресса ниже допуска, ТО повернуть вентиль крана водяного насоса гидропресса на небольшой угол вправо.

4. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя отрицательное, близко к нормальному, и усилие пуансона штампа гидропресса чуть ниже допуска, ТО оставить вентиль крана водяного насоса гидропресса без изменения.

5. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя соответствует нормальному, близко к нормальному, и усилие пуансона штампа гидропресса в пределах допуска ТО оставить вентиль крана водяного насоса гидропресса без изменения.

6. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя положительное, близко к нормальному, и усилие пуансона штампа гидропресса чуть выше допуска, ТО оставить вентиль крана водяного насоса гидропресса без изменения.

7. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя положительное малое, и усилие пуансона штампа гидропресса выше допуска, ТО повернуть вентиль крана водяного насоса гидропресса на небольшой угол влево.

8. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя положительное среднее, и усилие пуансона штампа гидропресса существенно выше допуска, ТО повернуть вентиль крана водяного насоса гидропресса на небольшой угол влево.

9. ЕСЛИ давление воды в канале испарителя положительное большое, и усилие пуансона штампа гидропресса максимально выше допуска, ТО повернуть вентиль крана водяного насоса гидропресса на большой угол влево.

Элементы множества входного переменного «давление воды в канале испарителя»:

T_1 = (отрицательное большое; отрицательное среднее; отрицательное малое; отрицательное, близко к нормальному; соответствует нормальному, близко к нормальному; положительное, близко к нормальному; положительное малое; положительное среднее; положительное большое).

Элементы множества входного переменного «усилие пуансона штампа гидропресса»:

T_2 = (максимально ниже допуска; существенно ниже допуска; ниже допуска; чуть ниже допуска; в пределах допуска; чуть выше допуска; выше допуска; существенно выше допуска; максимально выше допуска).

Элементы множества выходного переменного «вентиль крана водяного насоса гидропресса»:

T_3 = (на большой угол вправо; на небольшой угол вправо; без изменения; на небольшой угол влево; на большой угол влево).

НЕЧЕТКИЙ ВЫВОД ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ В КАНАЛЕ ИСПАРИТЕЛЯ

На универсуме $X_1 = [0; 15]$ реализована процедура фаззификации входной переменной A с использованием [Бор12, Сал25] трапецевидной функции принадлежности (рис. 2), получены следующие интервалы:

$A_1 = [0, 1, 1, 2]$ – отрицательное большое;

- $A_2 = [1.5, 2.5, 3.5, 4.5]$ – отрицательное среднее;
 $A_3 = [3.6, 4.7, 5.6, 6.5]$ – отрицательное малое;
 $A_4 = [5.5, 6.5, 7, 7.5]$ – отрицательное, близко к нормальному;
 $A_5 = [6.8, 7.5, 8, 8.5]$ – соответствует нормальному, близко к нормальному;
 $A_6 = [6.8, 7.5, 9.2, 10.1]$ – положительное, близко к нормальному;
 $A_7 = [9, 10, 11, 12]$ – положительное малое;
 $A_8 = [11, 12, 13, 14]$ – положительное среднее;
 $A_9 = [13, 14, 14.5, 15]$ – положительное большое.

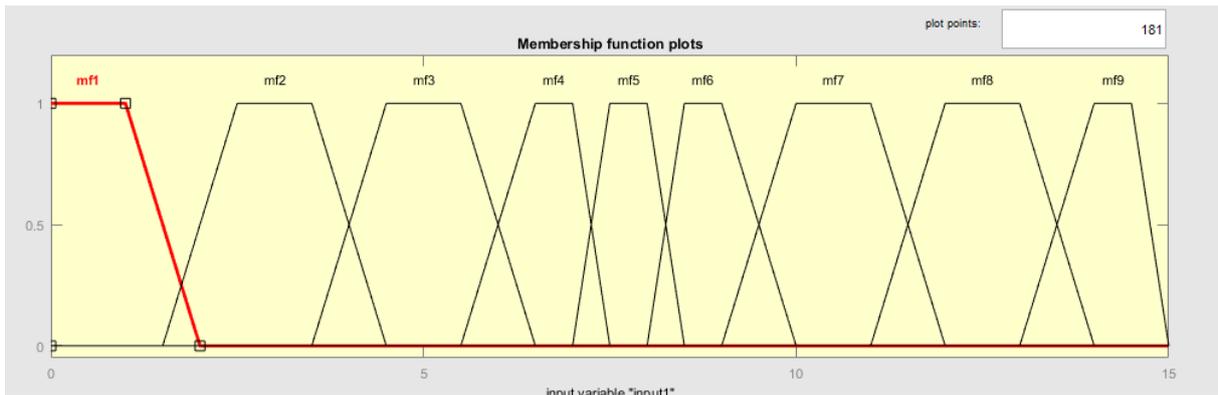


Рис. 2 График функции принадлежности входных переменных «давление воды в канале испарителя»

На универсуме $X_2 = [0; 30]$ реализована процедура фаззификации входной переменной B с использованием трапецевидной функции принадлежности (рис. 3), получены следующие интервалы:

- $B_1 = [0, 1, 2, 4]$ – максимально ниже допуска;
 $B_2 = [3, 5, 7, 9]$ – существенно ниже допуска;
 $B_3 = [8, 10.4, 12.1, 13.7]$ – ниже допуска;
 $B_4 = [12, 13, 14, 15]$ – чуть ниже допуска;
 $B_5 = [14, 14.5, 15.5, 16]$ – в пределах допуска;
 $B_6 = [15, 16, 17, 18.5]$ – чуть выше допуска;
 $B_7 = [17.5, 19, 21, 23]$ – выше допуска;
 $B_8 = [22, 24, 26, 28]$ – существенно выше допуска;
 $B_9 = [27, 28.5, 30, 30]$ – максимально выше допуска.

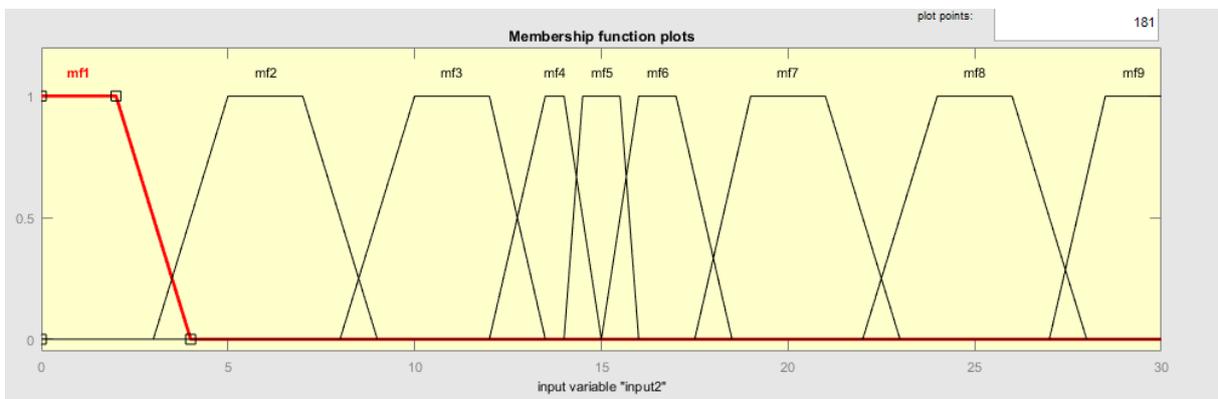


Рис. 3 График функции принадлежности входных переменных «усилие пуансона штампа гидропресса»

На универсуме $X_3 = [0; 90]$ реализована процедура фазсификации выходной переменной C с использованием трапецевидной функции принадлежности (рис. 4), получены следующие интервалы:

- $C_1 = [0, 10, 10, 20]$ – на большой угол вправо;
- $C_2 = [15, 25, 30, 40]$ – на небольшой угол вправо;
- $C_3 = [38, 42, 45, 50]$ – без изменения;
- $C_4 = [48, 55, 60, 65]$ – на небольшой угол влево;
- $C_5 = [63, 70, 77, 90]$ – на большой угол влево.

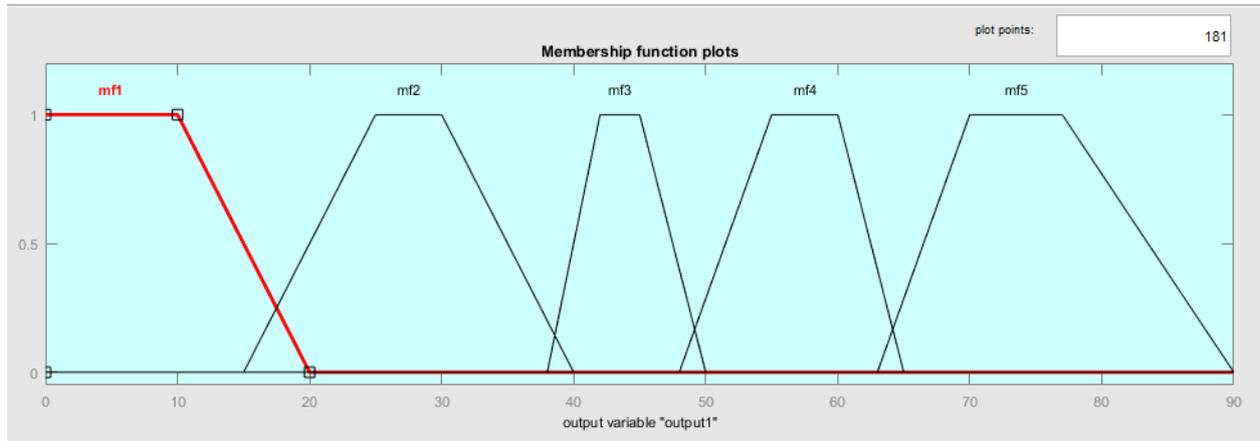


Рис. 4 График функции принадлежности выходных переменных «вентиль крана водяного насоса гидропресса»

Элементы множества входной переменной «давление воды в канале испарителя» представляется в виде:

- $\check{A}_1(x_1) = \{(0.0/0.0), (0.2/0.2), (0.5/0.5), (0.8/0.8), (1.0/1.0), (0.7/1.3), (0.4/1.6), (0.0/2.0)\};$
- $\check{A}_2(x_1) = \{(0.5/1.5), (0.3/1.7), (0.0/2.0), (0.0/3.0), (0.0/3.8), (0.0/4.0)(0.0/5.0)\};$
- $\check{A}_3(x_1) = \{(0.0/3.7), (0.0/4.0), (0.0/4.8), (0.0/5.4), (0.0/6.0), (0.0/6.3)\};$
- $\check{A}_4(x_1) = \{(0.0/5.5), (0.2/5.7), (0.6/6.1), (1.0/7.0), (0.2/7.4)\};$
- $\check{A}_5(x_1) = \{(0.428571/7.1), (0.857143/7.4), (1.0/8.0), (0.0/8.5)\};$
- $\check{A}_6(x_1) = \{(0.142857/8.0), (0.857142/8.5), (1.0/9.2), (0.666667/9.5), (0.111111/10.0)\};$
- $\check{A}_7(x_1) = \{(0.777778/9.4), (0.111111/10.0), (0.0/10.3), (0.0/11), (0.0/11.5); (0.0/12.0)\};$
- $\check{A}_8(x_1) = \{(0.0/11.5), (0.0/11.5), (0.0/12.0), (0.0/12.4), (0.0/12.8), (0.0/13), (0.0/13.5), (0.0/14.0)\};$
- $\check{A}_9(x_1) = \{(0.0/13.0), (0.5/13.4), (0.0/13.7), (0.0/14.0), (0.0/14.5)(0.0/15.0)\}.$

Элементы множества входной переменной «усилие пуансона штампа гидропресса» представляется в виде:

- $\check{B}_1(x_2) = \{(0.0/0.0), (0.0/0.5), (0.0/1.0), (0.0/1.7), (0.0/2.0), (0.5/3.0), (0.0/4.0)\};$
- $\check{B}_2(x_2) = \{(0.0/3.0), (0.0/3.5), (0.0/4.4), (0.0/5), (0.0/5.6), (0.0/6.7), (0.0/7.4)(0.142857/8.0)\};$
- $\check{B}_3(x_2) = \{(0.142857/8.0), (0.714285/8.4), (0.666667/9.5), (0.0/11.0)(0.0/12.0), (0.0/12.5), (0.0/13.0)\};$
- $\check{B}_4(x_2) = \{(0.0/12.0), (0.0/12.5), (0.0/13.0), (0.0/13.7), (0.0/14.3), (0.0/14.7), (0.0/15.0)\};$
- $\check{B}_5(x_2) = \{(0.0/14.0), (0.799999/14.4), (1/15.5), (0/16)\}$
- $\check{B}_6(x_2) = \{(0.799999/15.6), (0.200001/15.9), (0.0/17.5), (0.0/18), (0.0/18.5)\};$
- $\check{B}_7(x_2) = \{(0.0/17.0), (0.0/17.5), (0.0/18.0), (0.0/18.5), (0.0/19.7), (0.0/21), (0.0/21.5), (0.0/21.7), (0.0/22.8)\};$
- $\check{B}_8(x_2) = \{(0.0/22.0), (0.0/22.5), (0.0/23.7), (0.0/24.2), (0.0/24.0), (0.0/25.0), (0.0/25.8), (0.0/27.0), (0.0/26.0), (0.0/27.5), (0.0/28.0)\};$
- $\check{B}_9(x_2) = \{(0.0/27.0), (0.0/27.6), (0.0/28.5), \left(\frac{0.0}{29}\right), \left(\frac{0.0}{29.7}\right), \left(\frac{0.0}{30.0}\right)\}.$

Элементы множества выходной переменной «вентиль крана водяного насоса гидропресса» представляется в виде:

$$\check{C}_1(x_3) = \{(0.0/0.0), (0.6/6.0), (0.7/7.0), (0.7/13.0), (0.4/16.0), (0.2/18.0), (0/20.0)\};$$

$$\check{C}_2(x_3) = \{(0.5/15.0), (0.2/18.0), (0/21.0), (0/28.0), (0/37.0), (0/40.0)\};$$

$$\check{C}_3(x_3) = \{(0.0/38.0), (0.0/44.0), (0.0/46.0), (0.0/48.0), (0.0/50.0)\};$$

$$\check{C}_4(x_3) = \{(0.0/48.0), (0.0/53.0), (0.0/57.0), (0.0/60.0), (0.0/62.0), (0.0/65.0)\};$$

$$C_5(x_3) = \{(0.0/63.0), (0.666667/68.0), (0.5/87.0), (0.25/88.0), (0.0/89.0)\}.$$

Применением алгоритма вывода Мамдани вычисляются конкретные значения функций принадлежности по каждой из выходных переменных.

$$\mu_{\tilde{A}_1}(x_1) = 0.200000; \mu_{\tilde{A}_2}(x_1) = 0.300000; \mu_{\tilde{A}_3}(x_1) = 0.000000; \mu_{\tilde{A}_4}(x_1) = 0.200000;$$

$$\mu_{\tilde{A}_5}(x_1) = 0.857143; \mu_{\tilde{A}_6}(x_1) = 0.857143; \mu_{\tilde{A}_7}(x_1) = 0.111111; \mu_{\tilde{A}_8}(x_1) = 0.000000;$$

$$\mu_{\tilde{A}_9}(x_1) = 0.000000; \mu_{\tilde{B}_1}(x_2) = 0.000000; \mu_{\tilde{B}_2}(x_2) = 0.000000; \mu_{\tilde{B}_3}(x_2) = 0.714285;$$

$$\mu_{\tilde{B}_4}(x_2) = 0.000000; \mu_{\tilde{B}_5}(x_2) = 0.799999; \mu_{\tilde{B}_6}(x_2) = 0.200001; \mu_{\tilde{B}_7}(x_2) = 0.000000;$$

$$\mu_{\tilde{B}_8}(x_2) = 0.000000; \mu_{\tilde{B}_9}(x_2) = 0.000000.$$

Результаты агрегирования для каждого правила продукции отражены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты этапа агрегирования

Продукция	Степень истинности подусловий переменной A	Степень истинности подусловий переменной B	Степень истинности условий
1	0.200000	0.000000	0.000000
2	0.300000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.714285	0.000000
4	0.857143	0.000000	0.000000
5	0.857142	0.799999	0.799999
6	0.857142	0.200001	0.200001
7	0.111111	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000

Результаты активизации каждого правила отображены в табл. 2.

Таблица 2

Степень истинности выходных переменных

Продукции	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Степень истинности подзаклучений	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.799999	0.200001	0.000000	0.000000	0.000000

Дефаззификация выходной лингвистической переменной «вентиль крана водяного насоса гидропресса» с применением метода центра тяжести приводит к следующим значениям:

$$y = \frac{0.857142 \cdot 0.799999 + 0.857142 \cdot 0.200001}{0.799999 + 0.200001} = 0.8571342858.$$

Для анализа разработанного нечеткого вывода выполнена визуализация поверхности (рис. 5), что позволяет установить зависимость между входными и выходными переменными.

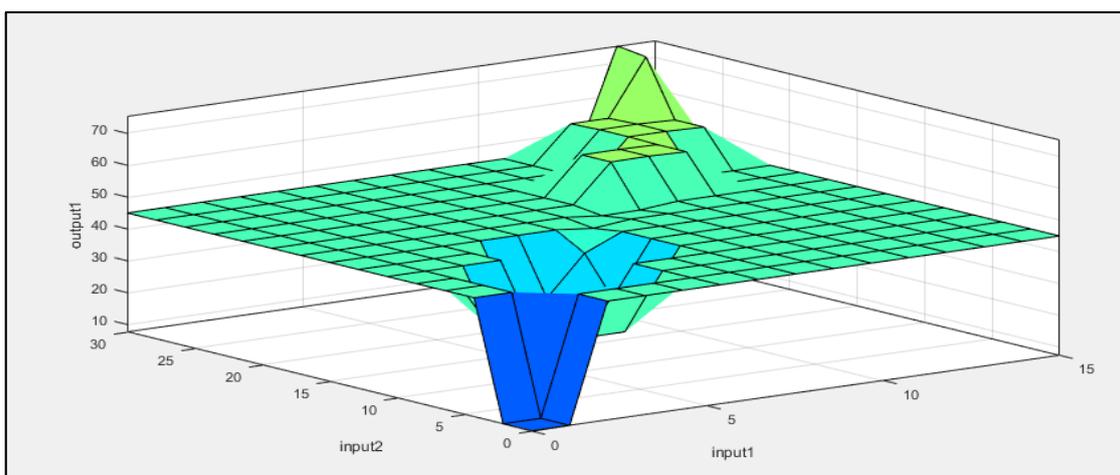


Рис. 5 Трехмерное изображение результата дефаззикации выходных переменных «вентиль крана водяного насоса»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана интегрированная модель функционирования и регулирования процесса раздувки канала алюминиевых испарителей в виде модификации сетей Петри. На основе входных и выходных функций инцидентности сети созданы продукционные правила модификации в виде «условие–действие». Разработана граф-схема функционирования модели. Для регулирования давления воды в канале заготовки испарителя разработана база нечетких продукционных правил. Определено количество входных и выходных лингвистических переменных и их диапазон изменения. Новизна данного исследования заключается в интеграции сети Петри и продукционных систем, что позволяет учитывать параллелизм и неопределенность процессов объекта при недостатке явных математических средств. Предложенный подход поддерживает эффективность аппарата моделирования для проектирования и управления сложными интеллектуальными производственными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- | | | |
|----------|---|---|
| [Mus24] | Mustafayev V. A., Rufullaeva R. R., Gurbanova S. I. Product model of control of mechatronic devices operating under conditions of uncertainty // COIA 2024. Istanbul, Turkiye, 27–29 Aug. 2024. P. 320–323. | Mustafayev V. A., Rufullaeva R. R., Gurbanova S. I. Product model of control of mechatronic devices operating under conditions of uncertainty // COIA 2024, Istanbul, Turkiye, 27–29 Aug. 2024. P. 320–323. |
| [Stry18] | Stryczek R. Petri networks in the planning of discrete manufacturing processes // Petri Nets in Science and Engineering. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.75135 . | Stryczek R. Petri networks in the planning of discrete manufacturing processes // Petri Nets in Science and Engineering. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.75135 . |
| [Zho16] | Zhou K. Q., Zain A. M. Fuzzy Petri nets and industrial applications // Artificial intelligence review. 2016. Vol. 45, No. 4. P. 405–446. EDN: DJSZUB . | Zhou K. Q., Zain A. M. Fuzzy Petri nets and industrial applications // Artificial intelligence review.-2016. Vol. 45, No. 4. P. 405-446. EDN: DJSZUB . |
| [Бор12] | Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов Ф. С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012, 725 с. EDN: RBAWZT . | Borisov V. V., et al. Fuzzy models and networks. Moscow: Telekom. 2012. EDN: RBAWZT . (In Russian). |
| [Лом04] | Ломазова Н. А. Вложенные сети Петри: Моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Науч. мир, 2004. 208 с. | Lomazova N. A. Nested Petri nets: Modeling and analysis of distributed systems with object structure. Moscow: Nauch. Mir, 2004. (In Russian). |
| [Мам13] | Мамедов Дж. Ф. Разработка структуры интерфейса программного обеспечения комплексного автоматизированного проектирования технических систем // ВКИТ. 2013. № 5. С. 18–21. EDN: PZYPKZ . | Mammadov J. F. Development of the interface structure of software for comprehensive automated design of technical systems // BCIT. 2013. No. 5, pp. 18–21. EDN: PZYPKZ . (In Russian). |

- [Мам17] Мамедов Дж. Ф., Талыбов Н. Г., Тагиева Т. А. Экспертный выбор и оценка инновационного проекта в технологическом парке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2017. № 4(17). С. 161–165. EDN: ZSSADF. Mammadov J. F., Talybov N. G., Tagieva T. A. (2017). Expert selection and evaluation of an innovative project in a technology park // Bulletin of SUSU. Series: Computer Technologies, Management, Radioelectronics, No. 4(17), pp. 161–165. EDN: ZSSADF. (In Russian).
- [Мус12] Мустафаев В. А. Анализ нечетких производственных моделей динамических взаимодействующих процессов. // ВКИТ. № 5(95). С. 25–30. EDN: OXZVJR. Mustafaev V.A. Analysis of fuzzy production models of dynamic interacting processes. // BCIT, 2012, No. 5 (95), pp. 25-30. EDN: OXZVJR. (In Russian).
- [Пит84] Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирования систем. М.: Мир, 1984. 264 с. Peterson J. Theory of Petri nets and systems modeling. Moscow: Mir, 1984. (In Russian).
- [Сал25] Салманова М. Н., Алиева К. Р., Руфуллаева Р. А. Модель принятия решений для управления параллельно функционирующими мехатронными устройствами // СИИТ. 2025. Т. 7, № 5(24). С. 170–179. EDN: SLNTNH. Salmanova M. N., Alieva K. R., Ruffullaeva R. A. Decision-making model for controlling parallel-functioning mechatronic devices // SIIT. 2025. Vol. 7, No. 5(24). P. 170-179. EDN: SLNTNH. (In Russian).

ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

МУСТАФАЕВ Валех Азад

Сумгаитский государственный университет, Азербайджан. valeh.mustafayev@sdu.edu.az. ORCID: 0000-0002-6754-9546. Д-р техн. наук, профессор каф. технологии преподавания математики и информатики. Иссл. в обл. интеллектуальных систем, моделирования.

КУРБАНОВА Сабина Ильгар

Сумгаитский государственный университет, Азербайджан. sabina.qurbanova@sdu.edu.az. ORCID: 0000-0002-4458-7777. Ст. преп. каф. технологии преподавания математики и информатики. Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

СУЛТАНОВА Кёнуль Исмайл

Азербайджанский университет архитектуры и строительства, konulsultanovafn@gmail.com. ORCID: 0000-0003-4862-8641. Диссертант каф. информационных технологий и систем. Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

MUSTAFEV Valeh Azad

Sumgayit State University, Azerbaijan. valeh.mustafayev@sdu.edu.az. ORCID: 0000-0002-6754-9546. Dr. Techn. Sci., Prof. Dept. of Maths and Comp. Science Teaching Technologies. Research in the field of intelligent systems and mathematical modeling.

GURBANOVA Sabina Ilgar

Sumgayit State University, Azerbaijan. sabina.qurbanova@sdu.edu.az. ORCID: 0000-0002-4458-7777. Senior Lecturer, Dept of Maths and Comp. Science Teaching Technologies. Research interests: intelligent systems.

SULTANOVA Konul Ismail

Azerbaijan University of Architecture and Construction. konulsultanovafn@gmail.com. ORCID: 0000-0003-4862-8641. PhD candidate at the Dept. of Inform. Technologies and Systems. Research interests: intelligent systems

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Модель функционирования и регулирования процесса раздувки канала алюминиевых испарителей.

Авторы: Мустафаев В. А., Курбанова С. И., Султанова К. И.

Аннотация: В работе представлен интегрированный подход моделирования и регулирования процесса раздувки канала в действующем производстве алюминиевых испарителей. Разработана гибридная модель функционирования активных элементов модуля вскрытия «колокольчика» и образования канала алюминиевых испарителей в виде модификации сетей Петри. Представлены множество позиций, переходов и граф-схемы модели. На основе входных и выходных позиций переходов сети сформирована база правил продукций в виде «условие–действие». Создана база нечетких производственных правил для регулирования давления воды в канале испарителя. С применением интервальных трапециевидных функций принадлежности установлена зависимость между давлением воды в канале испарителя и углом поворота вентилля крана водяного насоса гидропресса.

Ключевые слова: Модель; сети Петри; давление воды; функция принадлежности; раздувка канала.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2026 г.

Title: Model of operation and regulation of the process of blowing the channel of aluminum evaporators.

Authors: Mustafaev V. A., Gurbanova S. I., Sultanova K. I.

Abstract: This paper presents an integrated approach to modeling and regulating the channel expansion process in an existing aluminum evaporator production facility. A hybrid model of the active elements of the "bell" opening module and the channel formation of aluminum evaporators has been developed using a modified Petri net. A variety of positions, transitions, and model flowcharts are presented. A rule base in the form of "condition-action" is formed based on the network's input and output transition positions. A fuzzy rule base for regulating water pressure in the evaporator channel is created. Using intervals of trapezoidal membership functions, a relationship was established between the water pressure in the evaporator channel and the angle of rotation of the water pump valve of the hydraulic press

Key words: Model; Petri nets; water pressure; membership function; channel inflation.

Language: Russian.

The editors received the article on 9 February 2026.