

УДК 621.317

Е. А. Семёнова, к. т. н.; А. А. Семёнов, к. т. н.; В. К. Задорожный, к. т. н., доц.;
О. А. Войцеховская

ЭЛЕМЕНТЫ ФАЗЗИ-ЛОГИКИ ТИПА "ПРОИЗВЕДЕНИЕ"

В статье разработаны уравнения работы частотно-импульсных, широтно-импульсных и фазоимпульсных элементов, которые реализуют фаззи-логические операции типа "произведение" – "И", "ИЛИ", "СУММА", которые являются отдельным случаем логических операций «минимум», «максимум» и «исключающее ИЛИ» соответственно. Описано функционирование элементов фаззи-логики типа "произведение". Приведены временные диаграммы работы частотно-импульсного элемента "И", широтно-импульсного элемента "ИЛИ" и фазоимпульсного элемента "СУММА". Разработана структурная схема частотно-импульсного элемента "И".

Ключевые слова: импульсный сигнал, логический элемент, фаззи-логика.

Введение

Устройства автоматического управления, функционирующие на основе фаззи-логики, находят свое применение в сложных телекоммуникационных, радиотехнических и микроэлектронных системах, входные данные которых испытывают постоянные изменения, а выходные нуждаются в регулировании в масштабе реального времени. Именно применение специализированных устройств автоматического управления, функционирующих на основе фаззи-логики, вместо традиционных устройств управления позволяет повысить точность и надежность управления. В отдельных случаях в устройствах автоматического управления, функционирующих на основе фаззи-логики, логический вывод осуществляется с помощью логических операций типа "произведение" – "И", "ИЛИ", "СУММА", которые являются отдельным случаем логических операций «минимум», «максимум» и «исключающее ИЛИ» соответственно [1].

Для дальнейшего проектирования устройств автоматического управления необходимо синтезировать элементы, выполняющие операции фаззи-логики типа "произведение", а для синтеза указанных элементов необходимо разработать их математические модели. Математические модели элементов фаззи-логики разработаны в [2 – 4], но тут не учитывается вид информационного сигнала. В литературе [3 – 5] приведены схемы фаззи-логических элементов, в которых входная и выходная информация представлены аналоговыми сигналами переменного напряжения или переменного тока, что предопределяет их низкую точность. В тот же время, использование цифровых сигналов приводит к снижению быстродействия устройств.

Повысить точность систем, функционирующих на основе фаззи-логики, предлагается за счет применения не аналоговых, а импульсных сигналов, поскольку кодирование значений фаззи-логических величин параметрами импульсов, учитывая возможные погрешности и помехи, позволит достигнуть большей точности, нежели формирование аналоговых сигналов, форма которых соответствует форме функций принадлежности, так как сформировать сигнал, форма которого математически идеальна, почти невозможно.

В связи с этим целью данной работы является повышение эффективности проектирования элементов фаззи-логики.

Для достижения цели необходимо решить такие задачи:

- разработать методы кодирования фаззи-логических величин параметрами импульсов сигнала;
- определить основные операции фаззи-логики типа «произведение»;
- разработать уравнения работы элементов фаззи-логики типа «произведение».

Импульсное кодирование фаззи-величин

На начальном этапе разработки элементов, функционирующих по правилам фаззи-логики, необходимо сначала определить способ представления фаззи-величин с помощью параметров сигналов таких устройств. Поскольку в дальнейшем будут разрабатываться элементы, сигналы в которых являются импульсными, нужно определить способ кодирования фаззи-величин параметрами импульсно-модулированных сигналов. В данном случае импульсными называются частотно-, широтно- и фазо-импульсные сигналы. Авторами разработаны методы импульсного кодирования фаззи-величин μ . Они приведены в табл. 1.

Таблица 1

Импульсное кодирование фаззи-величин

Тип кодирования	Фаззи-логический нуль	Фаззи-логическая единица	Вспомогательная величина	Дополнительные условия	Кодирование фаззи-величины
Частотно-импульсное	f_α	f_β	f_γ	$f_\beta > f_\alpha$, $f_\gamma = f_\beta - f_\alpha$	$f_\mu = f_\alpha + \mu \cdot f_\gamma$
Широтно-импульсное	t_α	t_β	t_β^n , t_α^n	$t_\beta > t_\alpha$, $t_\beta^n < t_\alpha^n$	$t_\mu = \mu \cdot t_\beta + (1 - \mu) \cdot t_\alpha$
Фазо-импульсное	φ_α	φ_β	f_1^x	$\varphi_\alpha = 0$, $\varphi_\beta = 2\pi$	$\varphi_\mu = \mu \cdot 2\pi$

При частотно-импульсном кодировании входные и выходные сигналы устройств представляют собой импульсы, частота заполнения которых f_μ пропорциональна значению фаззи-величины μ . В данном методе кодирования нулевому значению фаззи-величины соответствует частота заполнения импульсов f_α , а единичному – f_β ; частотный диапазон, в котором находятся значения фаззи-величины от 0 до 1, определяется при помощи частоты заполнения импульсов f_γ .

При широтно-импульсном кодировании значению фаззи-величины μ соответствует продолжительность импульса t_μ . Продолжительность импульса t_α соответствует нулевому значению фаззи-величины, а t_β – единичному.

При фазо-импульсном кодировании значению фаззи-величины μ соответствует разность фаз входного и опорного импульсов φ_μ . Разность фаз входного и опорного сигналов $\varphi_\alpha = 0$ соответствует нулевому значению функции принадлежности, а разность фаз входного и опорного сигналов $\varphi_\beta = 2\pi$ – единичному.

Операции фаззи-логики типа "произведение"

Математически операции фаззи-логики типа "произведение" можно представить таким образом [3]:

$$\mu_{AND}^y = \mu_1^x \cdot \mu_2^x, \quad (1)$$

$$\mu_{OR}^y = \mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \cdot \mu_2^x, \quad (2)$$

$$\mu_{SUM}^y = \mu_1^x + \mu_2^x - 2 \cdot \mu_1^x \cdot \mu_2^x. \quad (3)$$

Предложенные уравнения работы частотно-импульсных, широтно-импульсных и фазо-импульсных элементов, которые реализуют операции “И”, “ИЛИ”, “СУММА”, приведены в табл. 2.

Таблица 2

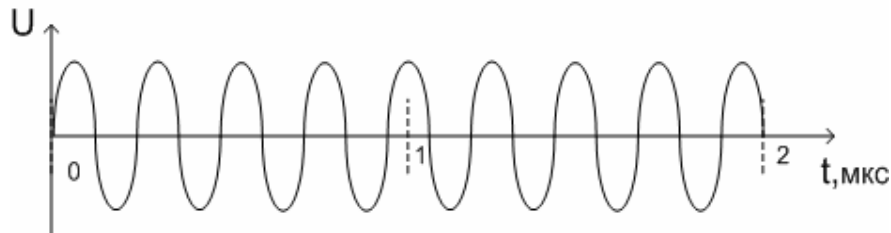
Уравнение работы элементов фаззи-логики типа "произведение"

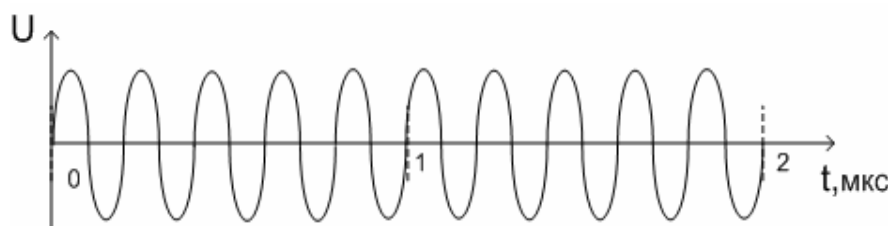
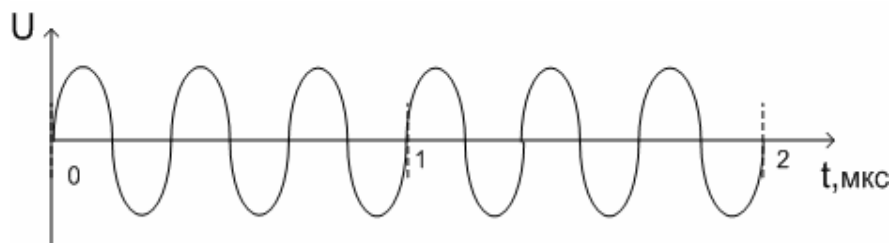
	Частотно-импульсный элемент	Широтно-импульсный элемент	Фазо-импульсный элемент
Входные величины	$f_1^x = f_\alpha + \mu_1^x \cdot f_\gamma$, $f_2^x = f_\alpha + \mu_2^x \cdot f_\gamma$	$t_1^x = \mu_1^x \cdot t_\beta + (1 - \mu_1^x) \cdot t_\alpha$, f_2^x	$\varphi_1^x = \mu_1^x \cdot 2\pi$, $\varphi_2^x = \mu_2^x \cdot 2\pi$
Результат логической операции И	$f_{AND}^y = f_\alpha + \mu_{AND}^y \cdot f_\gamma =$ $= f_\alpha + (\mu_1^x \cdot \mu_2^x) f_\gamma$	$t_{AND}^y = \mu_{AND}^y \cdot t_\beta + (1 - \mu_{AND}^y) \cdot t_\alpha =$ $= \mu_1^x \cdot \mu_2^x \cdot t_\beta +$ $+ (1 - \mu_1^x \cdot \mu_2^x) \cdot t_\alpha$	$\varphi_{AND}^y = \mu_{AND}^y \cdot 2\pi =$ $= \mu_1^x \cdot \mu_2^x \cdot 2\pi$
Результат логической операции ИЛИ	$f_{OR}^y = f_\alpha + \mu_{OR}^y \cdot f_\gamma =$ $= f_\alpha +$ $+ (\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \cdot \mu_2^x) f_\gamma$	$t_{OR}^y = \mu_{OR}^y \cdot t_\beta + (1 - \mu_{OR}^y) \cdot t_\alpha =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \mu_2^x) t_\beta +$ $+ [1 - (\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \mu_2^x)] t_\alpha$	$\varphi_{OR}^y = \mu_{OR}^y \cdot 2\pi =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \mu_2^x) \times$ $\times 2\pi$
Результат логической операции СУММА	$f_{SUM}^y = f_\alpha + \mu_{SUM}^y \cdot f_\gamma =$ $= f_\alpha +$ $+ (\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x) f_\gamma$	$t_{SUM}^y = \mu_{SUM}^y \cdot t_\beta +$ $+ (1 - \mu_{SUM}^y) \cdot t_\alpha =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x) t_\beta +$ $+ [1 - (\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x)] t_\alpha$	$\varphi_{SUM}^y = \mu_{SUM}^y \cdot 2\pi =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x) \times$ $\times 2\pi$

Предложенные уравнения работы можно использовать в процессе разработки элементов фаззи-логики типа “произведение” для построения импульсных элементов, которые реализуют операции “И”, “ИЛИ”, “СУММА”.

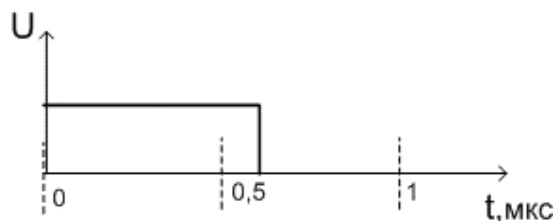
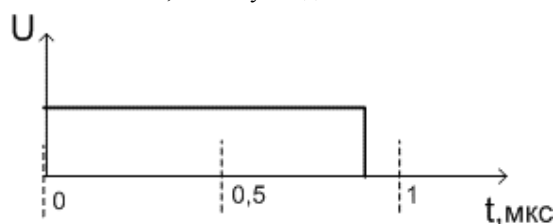
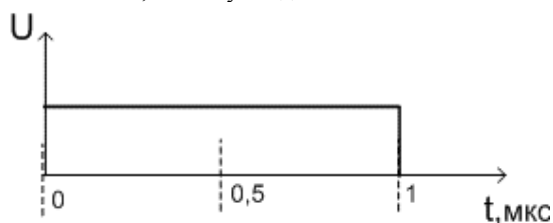
Временные диаграммы работы элементов

Для примера покажем временные диаграммы работы частотно-импульсного элемента “И”, широтно-импульсного элемента “ИЛИ”, фазо-импульсного элемента “СУММА” (рис. 1 – 3).

Рис. 1, а. Импульс с частотой f_1^x

Рис. 1, б. Импульс с частотой f_2^x Рис. 1, в. Импульс с частотой f_{AND}^y

При реализации операции “И” (1) на вход элемента поступают импульсные сигналы x_1, x_2 , на выходе появляется импульсный сигнал y_{AND} . В случае частотно-импульсного кодирования сигналы x_1, x_2 имеют частоты заполнения импульсов f_1^x, f_2^x , а сигнал $y_{AND} - f_{AND}^y$. Временные диаграммы для фаззи-логического элемента “И” приведены на рис. 1. Входные величины μ_1^x и μ_2^x принимают значение 0,3 и 0,4 соответственно. Тогда по формуле (1) – $\mu_{AND}^y = 0,12$. Согласно разработанному методу частотно-импульсного кодирования: $f_1^x = 2,2 \text{ МГц}$ (рис. 1, а.), $f_2^x = 2,6 \text{ МГц}$ (рис. 1, б.), а $f_{AND}^y = 1,48 \text{ МГц}$ (рис. 1, в.).

Рис. 2, а. Импульс длительностью t_1^x Рис. 2, б. Импульс длительностью t_2^x Рис. 2, в. Импульс длительностью t_{OR}^y

При реализации операции “ИЛИ” (2) на вход элемента поступают импульсные сигналы x_1, x_2 , на выходе появляется импульсный сигнал y_{OR} . В случае широтно-импульсного кодирования сигналы x_1, x_2 имеют длительности импульсов t_1^x, t_2^x , а сигнал $y_{OR} - t_{OR}^y$. Временные диаграммы для фаззи-логического элемента “ИЛИ” приведены на рис. 2. Входные величины μ_1^x и μ_2^x принимают значение 0,5 и 0,8 соответственно. Тогда по формуле (2) – $\mu_{OR}^y = 0,9$. Согласно разработанному методу широтно-импульсного кодирования $t_1^x = 0,6$ мкс (рис. 2, а.), $t_2^x = 0,9$ мкс (рис. 2, б.), а $t_{OR}^y = 1$ мкс (рис. 2, в.).

При реализации операции “СУММА” (3) на вход элемента поступают импульсные сигналы x_1, x_2 , на выходе появляется импульсный сигнал y_{SUM} . В случае фазо-импульсного кодирования сигналы x_1, x_2 имеют разности фаз опорного и информационных импульсов φ_1^x, φ_2^x , а сигнал $y_{SUM} - \varphi_{SUM}^y$. Временные диаграммы для фаззи-логического элемента “СУММА” приведены на рис. 3. Входные величины μ_1^x и μ_2^x принимают значение 0,7 и 0,1 соответственно. Тогда по формуле (3). $\mu_{SUM}^y = 0,66$. Согласно разработанному методу фазо-импульсного кодирования $\varphi_1^x = \frac{7}{5}\pi$ (рис. 3, а.), $\varphi_2^x = \frac{\pi}{5}$ (рис. 3, б.), а $\varphi_{SUM}^y = 1,22\pi$ (рис. 3, в.).

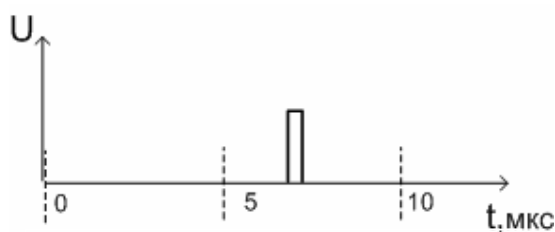


Рис. 3, а. Импульс с фазой φ_1^x

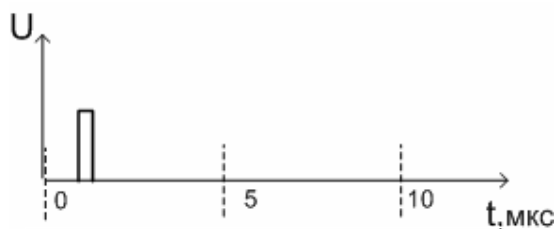


Рис. 3, б. Импульс с фазой φ_2^x

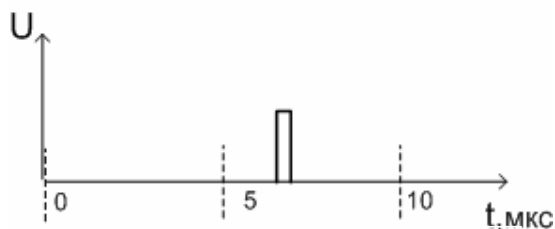


Рис. 3, в. Импульс с фазой φ_{SUM}^y

Частотно-импульсный элемент “И”

По приведенным выше уравнениям работы был разработан частотно-импульсный элемент, выполняющий фаззи-логическую операцию “И” (рис. 4).

Элемент функционирует таким образом. Сигнал x_1 с частотой заполнения

импульсов $f_{x1} = f_{\alpha} + \mu_1^x \cdot f_{\gamma}$ поступает на входы полосовых фильтров ПФ1 – ПФ11. Фильтры настроены таким образом:

Фильтр ПФ1 пропускает только сигнал с частотой заполнения импульсов f_{α} ;

ПФ2 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,1 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ3 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,2 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ4 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,3 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ5 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,4 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ6 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,5 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ7 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,6 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ8 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,7 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ9 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,8 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ10 – сигнал с частотой заполнения импульсов $(f_{\alpha} + 0,9 \cdot f_{\gamma})$;

ПФ11 – сигнал с частотой заполнения импульсов f_{β} .

Если частота первого входного сигнала $f_{x1} = f_{\alpha}$, что соответствует фаззи-логическому нулю, тогда с выхода фильтра ПФ1 сигнал без каких-либо изменений поступает на выход устройства y .

Если частота первого входного сигнала $f_{x1} = f_{\beta}$, что соответствует фаззи-логической единице, тогда сигнал проходит через фильтр ПФ11 и поступает на управляющий вход переключателя П1, на информационный вход которого поступает сигнал с частотой f_c , что является управляющей для переключателя П2, на информационный вход которого поступает второй входной сигнал с частотой f_{x2} . Так как под действием частоты f_{β} переключатель П1 закрывается, то на его выходе частота f_c будет отсутствовать, тогда переключатель П2 остается открытым, и на его выходе появляется частота второго входного сигнала f_{x2} , которая поступает на выход устройства.

Если $f_{x1} \neq f_{\alpha}$ и $f_{x1} \neq f_{\beta}$, тогда сигнал появляется на выходе одного из фильтров ПФ2 – ПФ10, в зависимости от значения частоты f_{x1} .

Второй входной сигнал частотой f_{x2} поступает на первые входы смесителей частот СМ1 – СМ9. На второй вход одного со смесителей СМ1 – СМ9 поступает первый входной сигнал с выхода одного из фильтров ПФ2 – ПФ10 соответственно.

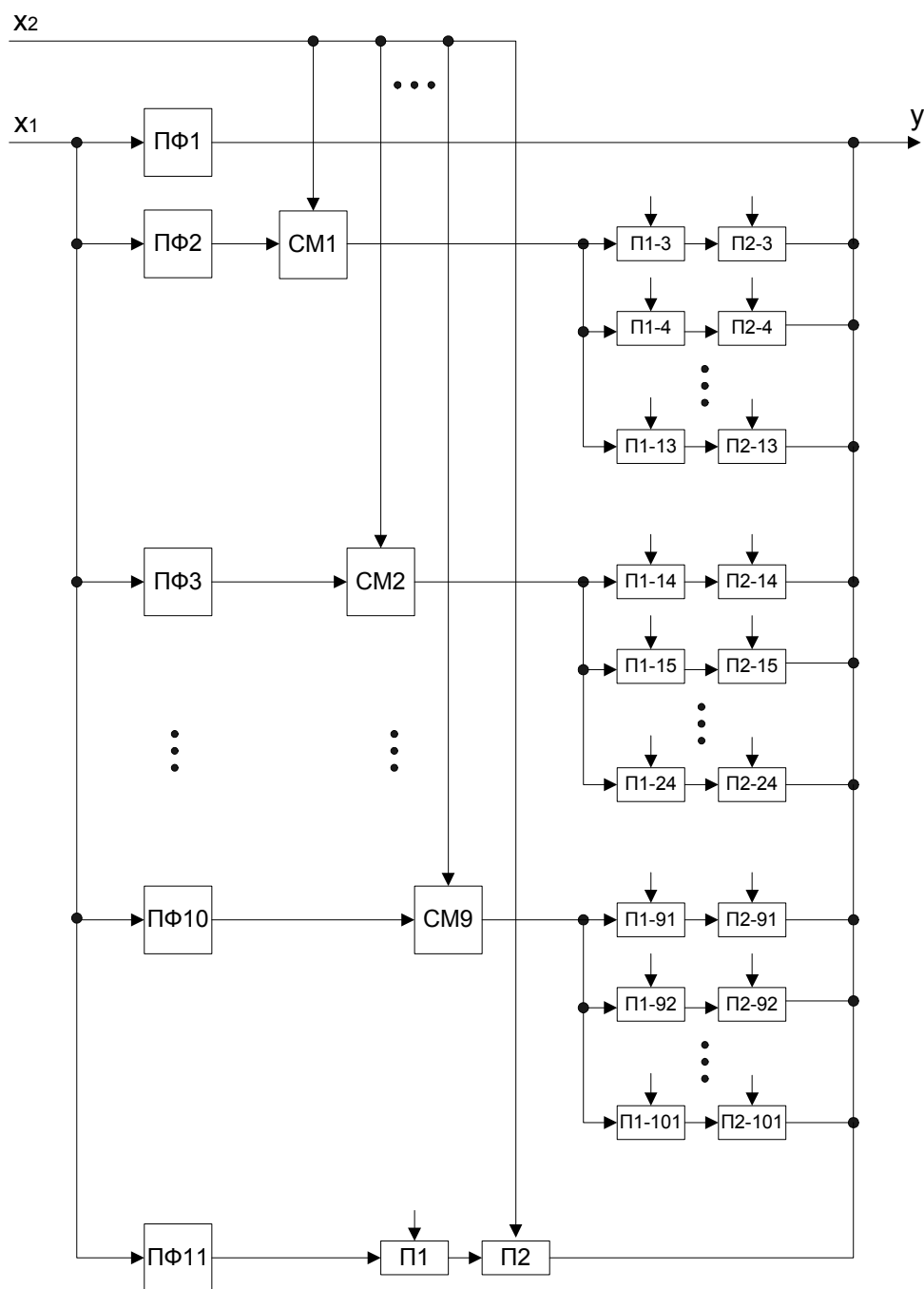


Рис. 4. Структурная схема устройства "И"

Если частота первого входного сигнала $f_{x1} = f_{\beta}$, который соответствует фаззи-логической единице, тогда сигнал проходит сквозь фильтр $\text{ПФ}11$ и поступает на управляющий вход переключателя $\text{П}1$, на информационный вход которого поступает сигнал с частотой f_c , которая является управляющей для переключателя $\text{П}2$, на информационный вход которого поступает второй входной сигнал с частотой f_{x2} . Так как под действием частот f_{β} переключатель $\text{П}1$ закрывается, тогда на его выходе частота f_c будет отсутствовать, вследствие чего переключатель $\text{П}2$ останется открытым, и на его выходе появится частота второго входного сигнала f_{x2} , которая поступает на выход устройства.

Если $f_{x1} \neq f_{\alpha}$ и $f_{x1} \neq f_{\beta}$, тогда сигнал появится на выходе одного из фильтров ПФ2 – ПФ10, в зависимости от значения частоты f_{x1} .

Второй выходной сигнал частотой f_{x2} поступает на первые входы смесителей частот СМ1 – СМ9. На второй вход одного из смесителей СМ1 – СМ9 поступает первый входной сигнал с выхода одного из фильтров ПФ2 – ПФ10 соответственно.

С выхода смесителя получаем сигнал с промежуточной частотой $f_{x1} + f_{x2}$. Сигнал с выхода смесителя поступает на входы соответствующих переключателей, управляющие сигналы которых приведены в табл. 3, а информационной частотой для переключателей П1-3 – П1-101 является частота f_c , управляющая для переключателей П2-3 – П2-101, информационные частоты которых приведены в табл. 3. Входы переключателей П2-3 – П2-101 соединенные с соответствующими выходами переключателей П1-3 – П1-101. Таким образом, сигнал появляется на выходе одного из смесителей, поступает на выходы соответствующих ему одиннадцати переключателей, для одного из них он является управляющим и закрывает его, тогда сигналы появляются на выходе других десяти переключателей и закрывают следующие десять переключателей, на выходах которых сигнал будет отсутствовать. Тот переключатель, на входе которого управляющий сигнал отсутствовал, останется открытым, и его информационный сигнал поступит на выход устройства “И”.

Таблица 3

**Управляющие сигналы переключателей П1-3 – П1-101
и информационные сигналы переключателей П2-3 – П2-101**

СМ1			
переключатель	$f_{упр}$	переключатель	$f_{инф}$
П1-3	$2f_{\alpha} + 0,1 \cdot f_{\gamma}$	П2-3	f_{α}
П1-4	$2f_{\alpha} + 0,2 \cdot f_{\gamma}$	П2-4	$f_{\alpha} + 0,01 \cdot f_{\gamma}$
П1-5	$2f_{\alpha} + 0,3 \cdot f_{\gamma}$	П2-5	$f_{\alpha} + 0,02 \cdot f_{\gamma}$
П1-6	$2f_{\alpha} + 0,4 \cdot f_{\gamma}$	П2-6	$f_{\alpha} + 0,03 \cdot f_{\gamma}$
П1-7	$2f_{\alpha} + 0,5 \cdot f_{\gamma}$	П2-7	$f_{\alpha} + 0,04 \cdot f_{\gamma}$
П1-8	$2f_{\alpha} + 0,6 \cdot f_{\gamma}$	П2-8	$f_{\alpha} + 0,05 \cdot f_{\gamma}$
П1-9	$2f_{\alpha} + 0,7 \cdot f_{\gamma}$	П2-9	$f_{\alpha} + 0,06 \cdot f_{\gamma}$
П1-10	$2f_{\alpha} + 0,8 \cdot f_{\gamma}$	П2-10	$f_{\alpha} + 0,07 \cdot f_{\gamma}$
П1-11	$2f_{\alpha} + 0,9 \cdot f_{\gamma}$	П2-11	$f_{\alpha} + 0,08 \cdot f_{\gamma}$
П1-12	$2f_{\alpha} + f_{\gamma}$	П2-12	$f_{\alpha} + 0,09 \cdot f_{\gamma}$

П1-13	$2f_{\alpha} + 1,1 \cdot f_{\gamma}$	П2-13	$f_{\alpha} + 0,1 \cdot f_{\gamma}$
СМ2			
переключатель	$f_{\text{упр}}$	переключатель	$f_{\text{инф}}$
П1-14	$2f_{\alpha} + 0,2 \cdot f_{\gamma}$	П2-14	f_{α}
П1-15	$2f_{\alpha} + 0,3 \cdot f_{\gamma}$	П2-15	$f_{\alpha} + 0,02 \cdot f_{\gamma}$
П1-16	$2f_{\alpha} + 0,4 \cdot f_{\gamma}$	П2-16	$f_{\alpha} + 0,04 \cdot f_{\gamma}$
П1-17	$2f_{\alpha} + 0,5 \cdot f_{\gamma}$	П2-17	$f_{\alpha} + 0,06 \cdot f_{\gamma}$
П1-18	$2f_{\alpha} + 0,6 \cdot f_{\gamma}$	П2-18	$f_{\alpha} + 0,08 \cdot f_{\gamma}$
П1-19	$2f_{\alpha} + 0,7 \cdot f_{\gamma}$	П2-19	$f_{\alpha} + 0,1 \cdot f_{\gamma}$
П1-20	$2f_{\alpha} + 0,8 \cdot f_{\gamma}$	П2-20	$f_{\alpha} + 0,12 \cdot f_{\gamma}$
П1-21	$2f_{\alpha} + 0,9 \cdot f_{\gamma}$	П2-21	$f_{\alpha} + 0,14 \cdot f_{\gamma}$
П1-22	$2f_{\alpha} + f_{\gamma}$	П2-22	$f_{\alpha} + 0,16 \cdot f_{\gamma}$
П1-23	$2f_{\alpha} + 1,1 \cdot f_{\gamma}$	П2-23	$f_{\alpha} + 0,18 \cdot f_{\gamma}$
П1-24	$2f_{\alpha} + 1,2 \cdot f_{\gamma}$	П2-24	$f_{\alpha} + 0,2 \cdot f_{\gamma}$

Выводы

Таким образом, к операциям фаззи-логики типа "произведение" относятся такие операции: "И", "ИЛИ", "СУММА". Для элементов, реализующих указанные операции, приведены уравнение работы. Работа элементов показана с помощью временных диаграмм. Разработана структурная схема частотно-импульсного элемента "И". Представленные уравнения работы предлагается использовать в процессе разработки частотно-, широтно и фазо-импульсных элементов фаззи-логики, которые реализуют операции типа "произведение": "И", "ИЛИ", "СУММА".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robert Fuller. Fuzzy logic and neural nets in intelligent systems // Information Systems Day. – Turku Centre for Computer Science, Abo, 1999. – Vol. 17. – P. 74 – 94.
2. Reyneri L. M. Unification of neural and wavelet networks and fuzzy systems // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1998.
3. Ota Y., Wilamowski B. M. CMOS Implementation of a Voltage-Mode Fuzzy Min-Max Controller // Journal of Circuits, Systems and Computers. – 1996. – Vol. 6, № 2. – P. 171 – 184.
4. Ota Y., Wilamowski B. M. Current-Mode CMOS Implementation of a Fuzzy Min-Max Network // World Congress of Neural Networks. – Washington DC (USA). – 1995. – Vol. 2. – P. 480 – 483.
5. Angel Rodriguez-Vazquez, Rafael Navas-Gonzalez, Manuel Delgado-Restituto M., Fernando Vidal-Verdu. A modular programmable CMOS analog fuzzy controller chip // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1999. – Vol. 46, №3. – P. 251 – 265.

Семёнова Елена Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: Helene_S@ukr.net.

Семёнов Андрей Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиотехники, e-mail: Semenov79@ukr.net.

Задорожный Виталий Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения.

Войцеховская Ольга Александровна – соискатель, инженер кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, тел. 598-064, e-mail: olga1085@rambler.ru
Винницкий национальный технический университет.