

УДК 656.61.052

COORDINATION OF THREE SHIPS PASSING BY SAFELY
КООРДИНАЦИЯ БЕЗОПАСНОГО РАСХОЖДЕНИЯ ТРЕХ СУДОВ

E. N. Pjatakov, *PhD associate professor*, **S. V. Kapanskiy**, *PhD student*, **E. L. Volkov**, *PhD student*

Э. Н. Пятаков, *к.т.н., доцент*, **С. В. Копанский**, *аспирант*, **Е. Л. Волков**, *аспирант*

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine
Национальный университет «Одесская морская академия», Украина

ABSTRACT

The system of coordination of passing by three dangerously approaching vessels, which satisfies the law of the necessary variety Ashby, is considered in the article. Four regions of mutual duties of vessels taking into account their status, speeds and additional parameter are defined. The conduct of each of interactive ships in the first region of mutual duties is regulated.

Keywords: safety of navigation, warning of collisions, system of coordinating cooperation/interaction.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Число столкновений судов в настоящее время остается на высоком уровне. Снижение аварийности по указанной причине требует разработки корректных практических рекомендаций судоводителям, позволяющих произвести выбор безопасного маневра расхождения. В интенсивных районах плавания нередко возникают ситуации одновременного опасного сближения более двух судов, когда выполнение маневра расхождения согласно требованиям МППСС-72 зачастую становится невозможным. Поэтому актуальным является вопрос разработки систем координации трех и более судов.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Принципам создания систем бинарной координации посвящены работы [1-4]. Вопросу определения угрозы ситуационного возмущения при опасном сближении судов посвящена работа [1], а возможный вариант системы, содержащей два иерархических уровня, рассмотрен в работах [2,3], причем описание первого уровня приведено в публикации [3], а формализация второго уровня рассмотрена в статье [4].

Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Целью данной статьи является разработка структуры системы бинарной координации трех судов.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Необходимость в бинарной координация трех судов возникает, если взаимодействует группа из трех судов c_1 , c_2 и c_3 , в которой два и больше ситуационных возмущения отличны от нуля. Положим, что справедливы соотношения между скоростями судов $V_1 \geq V_2 \geq V_3$, поэтому $\rho_{12} \geq \rho_{13} \geq \rho_{23}$, где $\rho_{ij} = V_i/V_j$.

Рассмотрим возможные маневры, удовлетворяющие требованию закона необходимого разнообразия Эшби [5]. Для этого вначале рассмотрим множество безопасных относительных курсов M_{s_i} для каждого из судов. Судну c_1 характерны соотношения $\rho_{12} \geq 1$ и $\rho_{13} \geq 1$, поэтому по отношению к обоим судам при $V_1 > V_2 > V_3$ множество $M_{s_1} = s_1 = 2\pi$. Если хотя бы одна из скоростей судов c_2 и c_3 равна скорости V_1 , то $M_{s_1} = \pi$.

Для судна c_2 справедливо $\rho_{21} \leq 1$ и $\rho_{23} \geq 1$, из чего следует, что по отношению к обоим судам $M_{s_2} = s_2 \leq \pi$. Судну c_3 характерно $\rho_{31} \leq 1$ и $\rho_{23} \leq 1$, поэтому $M_{s_3} = s_3 \leq \pi$.

Множество недопустимых относительных курсов M_d определяется аналогично для каждого из судов и представляет собой объединение подмножеств недопустимых относительных курсов относительно остальных двух судов. Так, например, для судна c_1 множество $M_{d1} = M_{d1}^{(2)} \cup M_{d1}^{(3)}$. Здесь

$M_{d1}^{(2)} = 2 \arcsin \frac{D_d}{D_{12}}$ - подмножество недопустимых относительных курсов, возникающих из-за опасного сближения судна c_1 с судном c_2 , причем D_{12} - расстояние между судами c_1 и c_2 , а D_d - предельно-допустимое расстояние;

$M_{d1}^{(3)} = 2 \arcsin \frac{D_d}{D_{13}}$ - подмножество недопустимых относительных курсов

при опасном сближении судов c_1 и c_3 .

Наиболее неблагоприятным является вариант объединения, при реализации которого в случае $D_{12} = D_{13} = D_d$ величина $M_{d1} = d_1 = 2\pi$. Аналогично наиболее неблагоприятные значения d_2 и d_3 также равны 2π .

Так как при ситуационном возмущении $\omega_{ij}=1$ значение $D_{ij} < D_d$, то $d_i < 2\pi$. В этом случае закон необходимого разнообразия Эшби, согласно которому $d_i \subset s_i$, будет справедлив при маневрировании судна c_1 , либо при одновременном маневрировании судов c_2 и c_3 .

Рассмотрим возможные сочетания ситуационных возмущений ω_{ij} при опасном сближении трех судов. При этом учитываем, что не менее двух ситуационных возмущений ω_{ij} должны отличаться от нуля. Другими словами, каждое из ситуационных возмущений ω_{12} , ω_{13} и ω_{23} может принимать значения 0, 1 и 2, однако в сочетании трех ситуационных возмущений только одно из них может принимать значение равное 0.

В нижеследующей табл. 1 приведены возможные сочетания ситуационных возмущений ω_{12} , ω_{13} и ω_{23} , возникающих в ситуации опасного сближения.

Таблица 1. Возможные сочетания ситуационных возмущений

№ сочетан.	ω_{12}	ω_{13}	ω_{23}	Области
1	1	1	0	A
2	1	0	1	B
3	0	1	1	B
4	1	1	1	B
5	1	2	0	C
6	2	1	0	C
7	1	0	2	C
8	2	0	1	C
9	0	1	2	C
10	0	2	1	C
11	1	1	2	C
12	1	2	1	C
13	2	1	1	C
14	2	2	0	D
15	2	0	2	D
16	0	2	2	D
17	2	2	1	D
18	2	1	2	D
19	1	2	2	D
20	2	2	2	D

Как показано в табл. 1, всего возможно 20 сочетаний ситуационных возмущений, причем в 10 сочетаниях одно из ситуационных возмущений ω_{ij} принимает значение равное 0.

Анализ таблицы показывает, что в ситуациях 1...4, когда в сочетаниях ситуационных возмущений их значения не превосходят 1, безопасное расхождение возможно стандартным маневром одного или двух судов. Поэтому для сочетания 1 необходимое разнообразие маневров достигается маневром судна c_1 с наибольшей скоростью, в то время, как суда с меньшими скоростями c_2 и c_3 остаются пассивными. Такую ситуацию характеризует первая область взаимных обязанностей A.

При сочетаниях 2...4 для соблюдения требования закона необходимого разнообразия Эшби необходимо маневрирование двух судов c_1 и c_2 , а судно с минимальной скоростью c_3 является пассивным. Данные ситуации характеризуют вторую область взаимных обязанностей В.

Остальные сочетания 5...20 содержат ситуационные возмущения со значением 2, предполагающих экстренное маневрирование при расхождении.

Сочетания ситуационных возмущений с 5-го по 13-е содержат одно ситуационное возмущение, значение которого равно 2. В этих ситуациях суда, для которых $\omega_{ij} = 2$, являются активными и выполняют маневр экстренного расхождения с учетом мешающего судна, а третье судно является пассивным. Это область взаимных обязанностей С.

В сочетаниях с 14 по 20 не менее двух ситуационных возмущений характеризуются значениями, равными 2. Область взаимных обязанностей D связана с указанными сочетаниями. В этой области все три судна выполняют маневры экстренного расхождения, т. е. являются активными.

В табл. 2 приведены взаимные обязанности судов в зависимости от реализовавшейся области.

Таблица 2. Взаимные обязанности судов при расхождении

Области	c_1	c_2	c_3
A	активное std.	пассивное	пассивное
B	активное std.	активное std.	пассивное
C	активное экст.	пассивное	активное экст.
D	активное экст.	активное экст.	активное экст.

В таблице для каждой области взаимных обязанностей предусмотрены три ролевых типа поведения, которые в дальнейшем будем называть ролями. Причем в общем случае при координации трех судов обозначим роли следующим образом:

Ak1st – активное первое судно, выполняющее стандартный маневр;

Ak2st – активное второе судно, выполняющее стандартный маневр;

Ps – пассивное судно, сохраняющее неизменные параметры движения;

Akext – активное судно, выполняющее маневр экстренного расхождения.

При опасном сближении трех судов c_a , c_b и c_c распределение ролей в процессе расхождения предлагается в зависимости от их статусов St_i , скоростей, курсов сближения (попутных или встречных) и дополнительного параметра v_i .

Определение области производится по значениям ситуационных возмущений ω_{ij} , как показано в табл. 1. Если возникла область взаимных обязанностей A, то распределение ролей Ak1st, Ps и Ps по судам c_a , c_b и c_c производится следующим образом.

Если статусы судов разные, то судну с наименьшим статусом адресуются обязанности роли, а остальным двум судам приписывается роль Ps. Если же статусы двух судов одинаковые и больше статуса третьего судна, например, $St_a = St_c > St_b$, то судну с минимальным статусом St_b соответствует роль Ak1st, а двум остальными судам - роли Ps. В случае, когда статусы двух судов равны и меньше статуса третьего судна, например, $St_b > St_c = St_a$, судну с максимальным статусом St_b соответствует роль Ps, а между судами с равными статусами роли распределяются по соотношению скоростей. Судну с большей скоростью соответствует роль Ak1st, а судну с меньшей скоростью – роль Ps.

В случае же судов с одинаковыми статусами $St_a = St_b = St_c$ распределение ролей производится по отношению скоростей судов. При разных скоростях судов роль Ak1st соответствует судну с наибольшей скоростью, остальным судам адресуются роли Ps. Если скорости двух судов равны и больше скорости третьего судна, то судну с меньшей скоростью соответствует роль Ps. Распределение ролей между судами с одинаковой скоростью производится по соотношению их дополнительных параметров v_i , причем судну с большим значением параметра v_i соответствует роль Ak1st, а другому судну – роль Ps. В случае равенства скоростей двух судов, которые меньше скорости третьего судна, роль Ak1st соответствует судну с большей скоростью, а судам с равными скоростями адресуются роли Ps. Если скорости всех трех судов равны между собой, то распределение ролей производится по соотношению значений дополнительных параметров v_i , причем судну с наибольшим значением параметра v_i соответствует роль Ak1st, а остальным судам – роли Ps.

Алгоритм распределения ролей между судами в области взаимных обязанностей А представлен на рис. 1 и рис. 2. На рисунках алгоритма приняты следующие обозначения условий:

$$\begin{aligned}
 &Y1A \rightarrow St_a > St_b > St_c, Y2A \rightarrow St_a = St_b > St_c, Y3A \rightarrow St_a = St_c > St_b, \\
 &Y4A \rightarrow St_b = St_c > St_a, Y5A \rightarrow St_a > St_b = St_c, Y6A \rightarrow St_b > St_a = St_c, \\
 &Y7A \rightarrow St_c > St_a = St_b, Y8A \rightarrow V_b = V_c, Y9A \rightarrow V_b > V_c, Y10A \rightarrow v_b > v_c, \\
 &Y11A \rightarrow V_a = V_c, Y12A \rightarrow V_a > V_c, Y13A \rightarrow v_a > v_c, Y14A \rightarrow V_a = V_b, \\
 &Y15A \rightarrow V_a > V_b, Y16A \rightarrow v_a > v_b, Y17A \rightarrow V_a = V_b = V_c, Y18A \rightarrow v_a > v_b > v_c, \\
 &Y19A \rightarrow v_b > v_a > v_c, Y20A \rightarrow v_c > v_a > v_b, Y21A \rightarrow V_a > V_b = V_c, \\
 &Y22A \rightarrow V_b > V_a = V_c, Y23A \rightarrow V_c > V_a = V_b, Y24A \rightarrow V_a = V_b > V_c, \\
 &Y25A \rightarrow v_a > v_b, Y26A \rightarrow V_a = V_c > V_b, Y27A \rightarrow v_a > v_c, \\
 &Y28A \rightarrow V_b = V_c > V_a, Y29A \rightarrow v_b > v_c.
 \end{aligned}$$

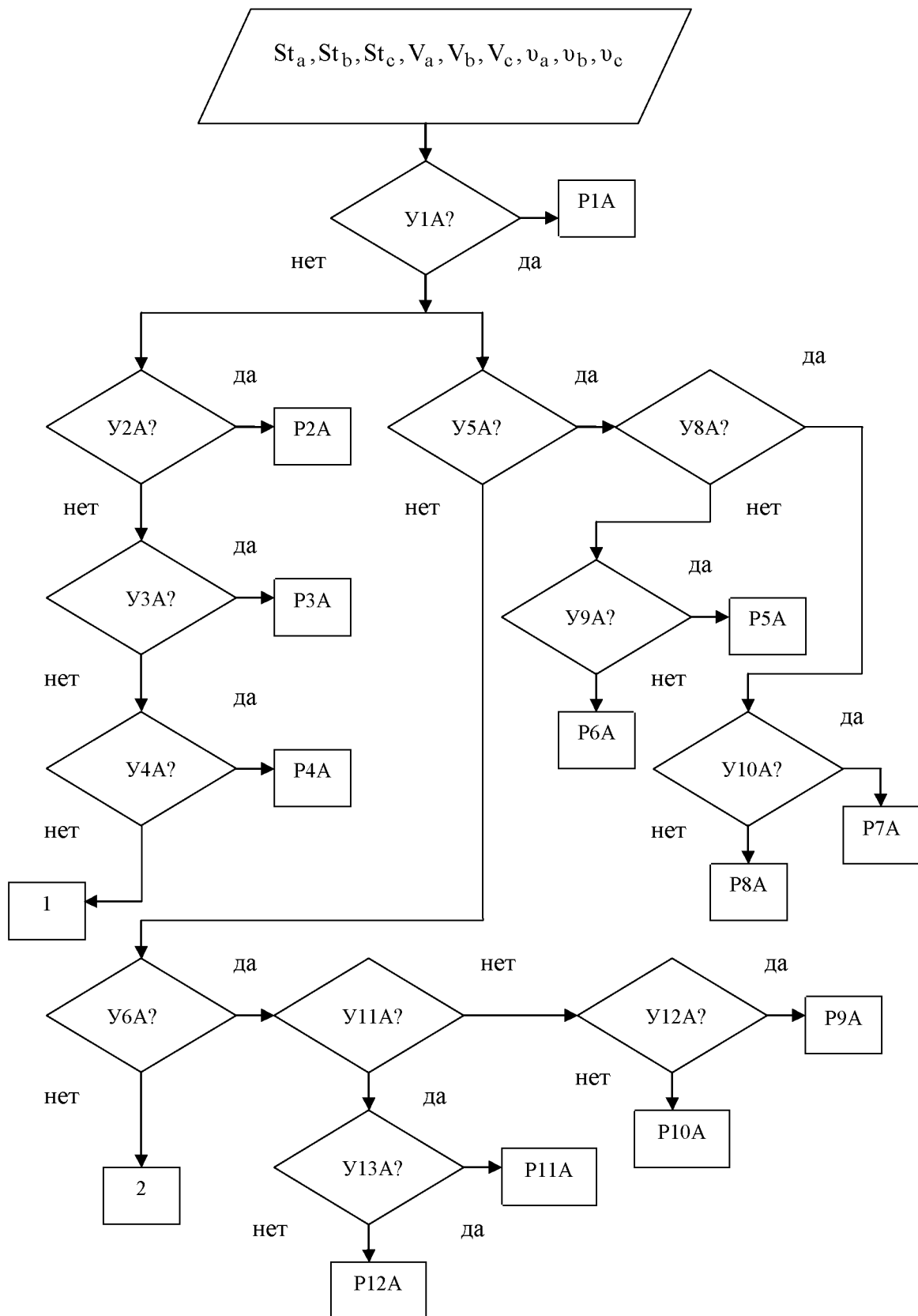


Рис. 1. Алгоритм взаимных обязанностей судов в области А

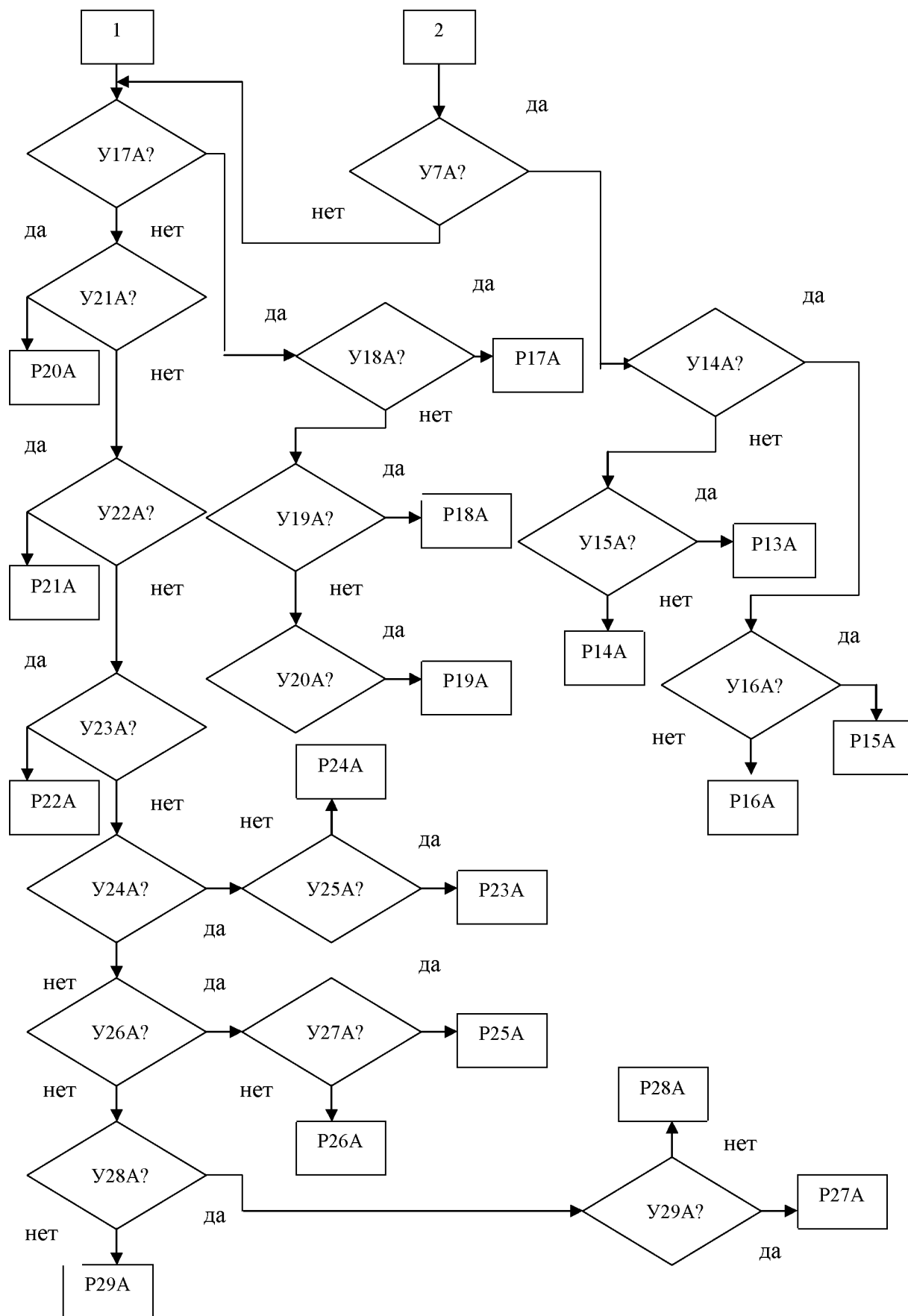


Рис. 2. Продолжение алгоритма взаимных обязанностей судов в области А

Результаты распределения судов по ролям обозначаются:

$P1A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$, $P2A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P3A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$, $P4A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$,
 $P5A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$, $P6A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P7A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$, $P8A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P9A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$, $P10A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P11A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$, $12A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P13A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$, $P14A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$,
 $P15A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$, $P16A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$,
 $P17A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$, $P18A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$,
 $P19A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$, $P20A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$,
 $P21A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$, $P22A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P23A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$, $P24A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$,
 $P25A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$, $P26A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P27A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ak1st, c_c \Rightarrow Ps$, $P28A \rightarrow c_a \Rightarrow Ps, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ak1st$,
 $P29A \rightarrow c_a \Rightarrow Ak1st, c_b \Rightarrow Ps, c_c \Rightarrow Ps$.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.

Таким образом, рассмотрена система координации расхождения трех опасно сближающихся судов. Показано, что предложенная система координации удовлетворяет требованиям закона необходимого разнообразия Эшби. Определены четыре области взаимных обязанностей судов и поведение каждого из взаимодействующих судов в первой области. В дальнейшем целесообразно рассмотреть взаимные обязанности судов в трех оставшихся областях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов/ Пятаков Э.Н., Заичко С.И. // Судовождение. – 2008. - № 15. – С. 166–171.
2. Пятаков Э.Н. Совершенствование методов координации судов при расхождении. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.13/ ОНМА. – Одесса, 2008. – 23 с.

3. Заичко С.И. Возможности синтеза системы формирования стратегий расхождения группы судов/ Заичко С.И., Пятаков Э.Н. // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 63 – 66.
4. Пятаков Э.Н. Требование к процедуре формирования второго уровня иерархической системы управления взаимодействием судов / Пятаков Э.Н. // Судовождение. – 2007. - № 13. – С. 145 – 148.
5. Эшби У. Росс. Введение в кибернетику/ У. Росс Эшби. - М.: Мир, 1959. – 256 с.