



## МЕТОДИКА СИНТЕЗА ДИСКРЕТНО УПРАВЛЯЕМЫХ АНТЕННО-СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПВ\КВ ДИАПАЗОНА

Н. А. Настенко, курсант,  
 nickolay.nastenko2016@yandex.ru  
 БГАРФ ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
 технический университет»

В работе выполнен анализ дискретного управляемого антенно-согласующего устройства для разных типов судовых антенн с целью разработки методики проектирования подобных устройств.

*антенно-согласующее устройство (АСУ), дискретно-управляемые элементы, коэффициент стоячей волны (КСВ)*

Проанализировав многие варианты построения согласующих устройств, было замечено, что наиболее оптимальным является антенное согласующее устройство радиопередающей установки радиостанции TR-1500 фирмы JMC (Япония). Интерес к данному согласующему устройству заключается в том, что в нем используются дискретно-коммутируемые элементы L и C, параметры которых находятся по минимуму КСВ на входе. К сожалению, отсутствует методика расчета данного типа СУ и основной задачей является разработка подобной методики.

На рис. 1 представлена упрощенная принципиальная электрическая схема СУ, где L представляет собой магазин последовательно включенных индуктивностей, коммутируемых с помощью контактов реле, а C – магазин параллельно включенных емкостей, коммутируемых также с помощью контактов реле.

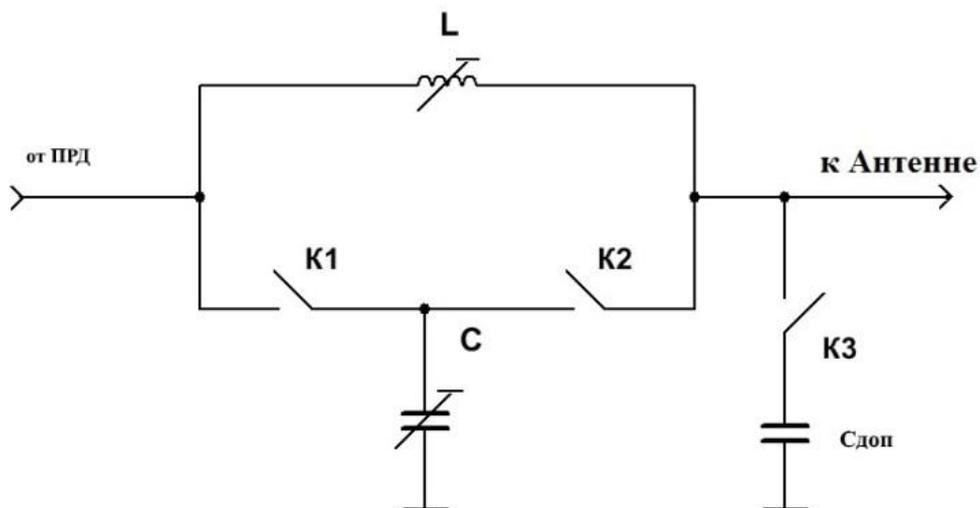


Рисунок 1 – Упрощенная принципиальная электрическая схема СУ

С помощью ключей  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  можно получить три разновидности схем согласования, представленных на рис. 2.

Первый вариант СУ эквивалентен последовательному колебательному контуру. При этом входное сопротивление данного контура  $R_{вх} \approx R_A'$ , где  $R_A'$  – активная составляющая эквивалентного сопротивления антенны с учетом шунтирующей емкости C. Второй и третий варианты эквиваленты параллельным контурам с емкостной связью со входом. При этом в

качестве емкости связи используется конденсатор С. Каждый из этих контуров настраивается в резонанс на рабочей частоте ПРД. Если второй вариант может быть использован при  $X_A < 0$ ;  $R_A < \rho_{\phi}$ , то благодаря шунтируемому действию Сдоп третий вариант возможно использовать, если  $X_A > 0$ ;  $R_A > \rho_{\phi}$ .

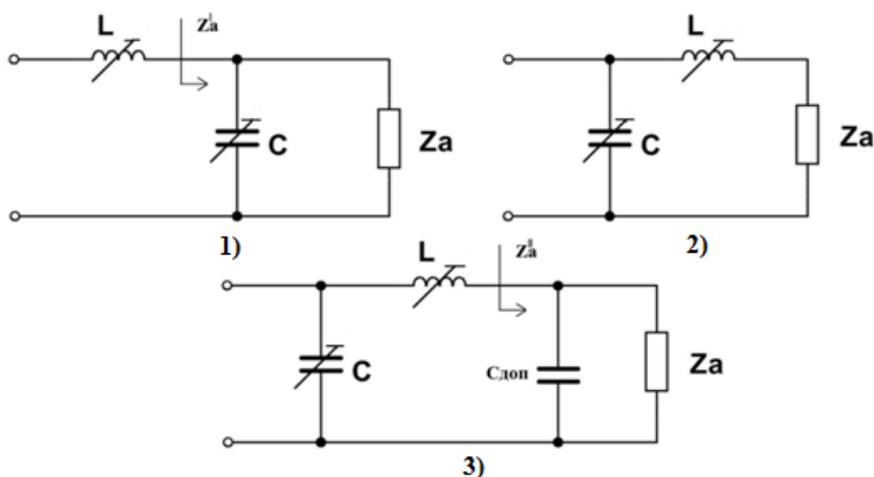


Рисунок 2 – Возможные варианты схемы согласования

Выполним анализ вариантов СУ с целью определения оптимальных параметров L и C, при которых  $K_{св} = 1$ . Рассмотрим Г-образный LC-четырёхполюсник, схема которого представлена на рис. 3.

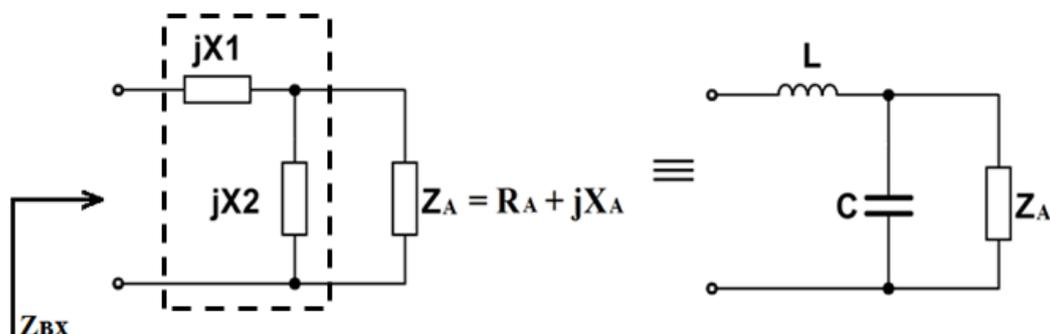


Рисунок 3 – Г-образный четырёхполюсник, эквивалентный последовательному контуру

Для упрощения будем полагать, что добротность элементов достаточно высока и можно пренебречь диссипативными потерями в них. При этом комплексные сопротивления элементов носят реактивный характер, причем  $X_1 > 0$ ,  $X_2 < 0$ .

Запишем выражение для входного сопротивления СУ с подключенной антенной, имеющей комплексное сопротивление  $Z_A$  с  $X_A \neq 0$ :

$$Z_{вх} = jX_1 + \frac{jX_2(R_A + jX_A)}{R_A + jX_{A2}} = R_{вх} + jX_{вх}, \quad (1)$$

где  $R_{вх} = R_A \frac{X_2^2}{R_A^2 + X_{A2}^2} = K_R^2 R_A$  – активная составляющая;

$X_{вх} = X_1 + X_2 \frac{R_A^2 + X_A X_{A2}}{R_A^2 + X_{A2}^2} = X_1 + K_X^2 X_2$  – реактивная составляющая входного сопротивления СУ.

Из условия  $R_{вх} = \rho_{\phi}$ ,  $X_{вх} = 0$ , определим значения  $X_1$  и  $X_2$ :

$$X_1 = -K_X^2 X_2; X_{2,1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2)$$

где  $a = 1 - K_R^2$ ;  $b = -2K_R^2 X_A$ ;  $c = -K_R^2 |Z_A|^2$ .

Соответствующие оптимальные значения  $X_1$  и  $X_2$ , а также  $L_0$  и  $C_0$  приведены для 6-метровой штыревой антенны в табл. 1.

Таблица 1 – Значения реактивных сопротивлений и элементов СУ для варианта 1 в зависимости от частоты (6-метровая штыревая антенна)

| f, МГц            | 12,33    | 13,2    | 16,46    | 17,36    | 22,0     | 22,72    | 25,01    | 25,6     |
|-------------------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_A$ , Ом        | 80       | 88      | 300      | 500      | 2000     | 1000     | 100      | 90       |
| $X_A$ , Ом        | 95       | 100     | 650      | 800      | -100     | -800     | -600     | -400     |
| $X_1$ , Ом        | 84,502   | 87,074  | 287,953  | 294,109  | 312,65   | 281,957  | 427,2    | 301,478  |
| $X_2$ , Ом        | -67,006  | -70,065 | -215,543 | -237,899 | -323,231 | -338,903 | -1454    | -1178    |
| $C_0$ , пФ        | 192,6    | 172,1   | 44,86    | 38,54    | 22,38    | 20,67    | 4,375    | 5,276    |
| $L_0$ , мкГн      | 1,091    | 1,05    | 2,784    | 2,696    | 2,262    | 1,975    | 2,719    | 1,874    |
| $X_1$ , Ом        | 89,897   | 92,054  | 265,207  | 270,557  | 286,675  | 259,998  | 386,353  | 276,963  |
| $X_2$ , Ом        | -60,1606 | -62,804 | -194,26  | -212,714 | -280,74  | -288,206 | -970,375 | -749,503 |
| $C$ , пФ          | 55,562   | 56,0776 | 25,247   | 26,618   | 26,129   | 31,1399  | 27,1968  | 37,882   |
| $L$ , мкГн        | 1,1604   | 1,1099  | 2,5643   | 2,4804   | 2,074    | 1,8213   | 2,4586   | 1,7219   |
| $\Delta C$ , пФ   | 137,077  | 116,008 | 19,612   | 11,919   | 3,7484   | 10,4701  | 22,8214  | 32,606   |
| $\Delta L$ , мкГн | 0,06964  | 0,06005 | 0,2199   | 0,2159   | 0,1879   | 0,15382  | 0,25994  | 0,15241  |

Значения  $R_A$  и  $X_A$  для 6-метровой антенны взяты из [1].

Аналогичным образом получены данные для 10-метровой штыревой и 15-метровой лучевой антенн.

Аналогичным образом производим анализ второго варианта Г-образного АСУ. При этом полагаем  $R_A < Z_{вх} = \frac{jX_1(R_A + jX_{A2})}{R_A + jX_{\Sigma}} = R_{вх} + jX_{вх}$   $\rho_{\phi}$ ;  $X_A < 0$  и  $X_2 > 0$  (рис. 4).

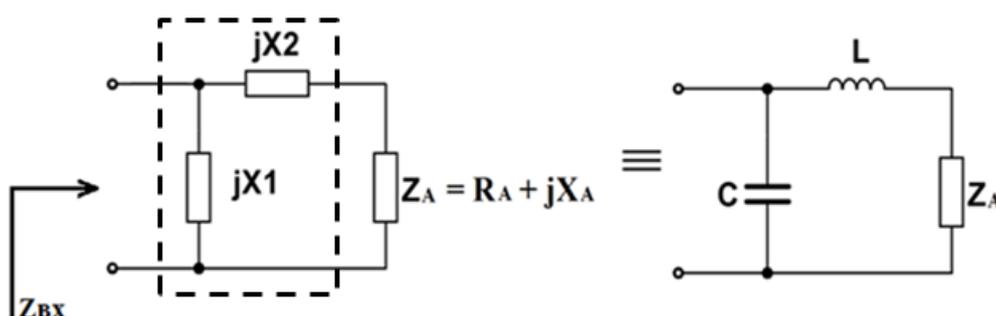


Рисунок 4 – Г-образный четырехполюсник, эквивалентный параллельному колебательному контуру

Входное сопротивление LC-четырёхполюсника с подключенной антенной с комплексным сопротивлением  $Z_A$ :

$$Z_{вх} = \frac{jX_1(R_A + jX_{A2})}{R_A + jX_{\Sigma}} = R_{вх} + jX_{вх}, \quad (3)$$

где  $ReX = R_A \frac{X_1^2}{R_A^2 + X_\Sigma^2} = K_R^2 R_A; X_{ex} = X_1 \frac{R_A^2 + X_{A2} X_\Sigma}{R_A^2 + X_\Sigma^2} = K_X^2 X_1.$

Из условия  $R_{вх} = \rho_\phi, X_{вх} = 0$ , определим значения  $X_1$  и  $X_2$ :

$$X_1 = \frac{K_R^2}{1 - K_R^2} X_{A2}; X_2 = X_{A2} - X_A. \quad (4)$$

Соответствующие оптимальные значения  $X_1$  и  $X_2$ , а также  $L_0$  и  $C_0$  приведены для 6-метровой штыревой антенны в табл. 2.

Таблица 2 – Значения реактивных сопротивлений и элементов СУ для варианта 2 в зависимости от частоты (6 метровая штыревая антенна)

| f, МГц                  | 1,5      | 2,0     | 3,0     | 3,8     | 4,0     | 4,65        | 6,2     | 6,52    | 8,195   | 8,815   |
|-------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| $R_A, \text{Ом}$        | 5,43     | 5,71    | 6,42    | 6,98    | 6,99    | 7,85        | 8,56    | 9,0     | 20      | 5,43    |
| $X_A, \text{Ом}$        | -2000    | -1500   | -800    | -301    | -300    | -300        | -200    | -150    | -100    | -2000   |
| $X_1, \text{Ом}$        | -17,452  | -17,95  | -19,19  | -20,14  | -20,157 | -           | -22,725 | -23,426 | -40,825 | -61,237 |
| $X_2, \text{Ом}$        | 215,557  | 1516    | 816,727 | 318,329 | 317,339 | 318,19      | 218,834 | 169,209 | 124,495 | 114,495 |
| $C_0, \text{пФ}$        | 6080     | 4433    | 2764    | 2079    | 1974    | 1586        | 1129,6  | 1042    | 475,7   | 294,8   |
| $L_0, \text{мкГн}$      | 213,9    | 120,6   | 43,33   | 13,33   | 12,63   | 10,89       | 5,618   | 4,13    | 2,418   | 2,067   |
| $X1, \text{Ом}$         | -18,7666 | -19,404 | -21,011 | -22,273 | -22,295 | -           | -25,854 | -26,864 | -59,455 | -       |
| $X2, \text{Ом}$         | 2014,2   | 1514,5  | 815,24  | 316,77  | 315,77  | 316,51      | 217,07  | 167,388 | 121,257 | 109,44  |
| $C, \text{пФ}$          | 5653,83  | 4101,04 | 2524,89 | 1880,42 | 1784,6  | 1412,1<br>2 | 992,9   | 908,658 | 326,648 | 127,78  |
| $L, \text{мкГн}$        | 213,714  | 120,521 | 43,25   | 13,267  | 12,564  | 10,833      | 5,5722  | 4,086   | 2,355   | 1,976   |
| $\Delta C, \text{пФ}$   | 425,845  | 331,525 | 239,444 | 199,148 | 189,35  | 174,09<br>1 | 136,717 | 133,355 | 149,067 | 167,057 |
| $\Delta L, \text{мкГн}$ | 0,14336  | 0,11064 | 0,0789  | 0,0654  | 0,0622  | 0,0573      | 0,0453  | 0,04446 | 0,0629  | 0,0913  |

Аналогичным образом получены данные для 10-метровой штыревой и 15-метровой лучевой антенн.

Далее рассмотрим П-образный LC-четырёхполюсник, который отличается от предыдущего Г-образного наличием дополнительного реактивного двухполюсника с комплексным сопротивлением  $jX_3$ , где  $X_3 < 0$  (рис. 5).

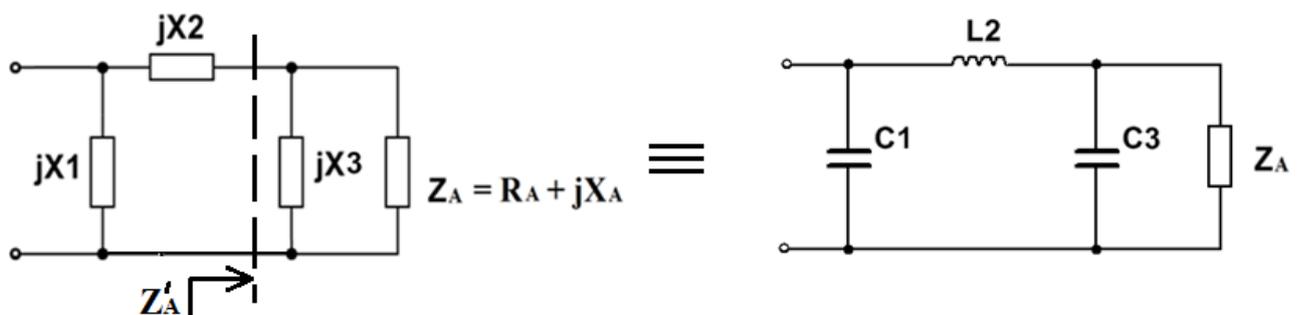


Рисунок 5 – П-образный четырёхполюсник, эквивалентный параллельному колебательному контуру

Благодаря дополнительной параллельной емкости  $C_3$ , шунтирующей входное сопротивление антенны  $Z_A$ , получается эквивалентное сопротивление антенны:

$$Z'_A = \frac{jX_3(R_A + jX_A)}{R_A + jX_{A3}} = R'_A + jX'_A, \quad (5)$$

где  $R'_A = K_{R_A}^2 R_A$ ;  $X'_A = K_{X_A}^2 X_A$ .

При этом П-образный четырехполюсник будет эквивалентен Г-образному, рассмотренному ранее. Следовательно, должны выполняться условия  $R'_A < \rho_\phi$  и  $X'_A < 0$  при этом  $K_{R_A}^2 < 1$ ;  $K_{X_A}^2 < 1$ :

$$X_{3\min} = \frac{-b' - \sqrt{(b')^2 - 4a'c'}}{2a'}, \quad (6)$$

где  $a' = R_A - \rho_\phi$ ;  $b' = -2X_A \rho_\phi$ ;  $c' = -|Z_A|^2 \rho_\phi$ .

Для 6-метровой антенны на нижней частоте  $f = 12,33$  МГц имеем  $R_A = 80$  Ом;  $X_A = 95$  Ом. Выбрав значение  $\rho_\phi = 50$  Ом и используя формулу (6), можно получить значение  $X_{3\min} = -67$  Ом и  $C_{3\min} = 192,6$  пФ. Верхней частоте  $f = 17,36$  МГц соответствует  $R_A = 300$  Ом;  $X_A = 800$  Ом.

При этом получается значение  $X_{3\min} = -254,2$  Ом и  $C_{3\min} = 36,1$  пФ.

Таким образом, по наихудшему варианту, соответствующему  $f = 12,33$  МГц, выбираем  $C_3 = 200$  пФ  $> C_{3\min} = 196,2$  пФ.

Аналогичным образом получены данные для 10-метровой штыревой и 15-метровой лучевой антенн.

С целью определения разрядности наборов катушек индуктивности и конденсаторов дискретно управляемых АСУ необходимо найти дискреты изменения индуктивности  $\Delta L$  и емкости  $\Delta C$ , при которых обеспечивается  $K_{св} < K_{св\text{доп}}$ . Для этого определим допустимые параметры  $R_{вх}$  и  $X_{вх}$  относительно  $K_{св\text{доп}} = 1,5$ , что соответствует ПВ/КВ диапазонам [2].

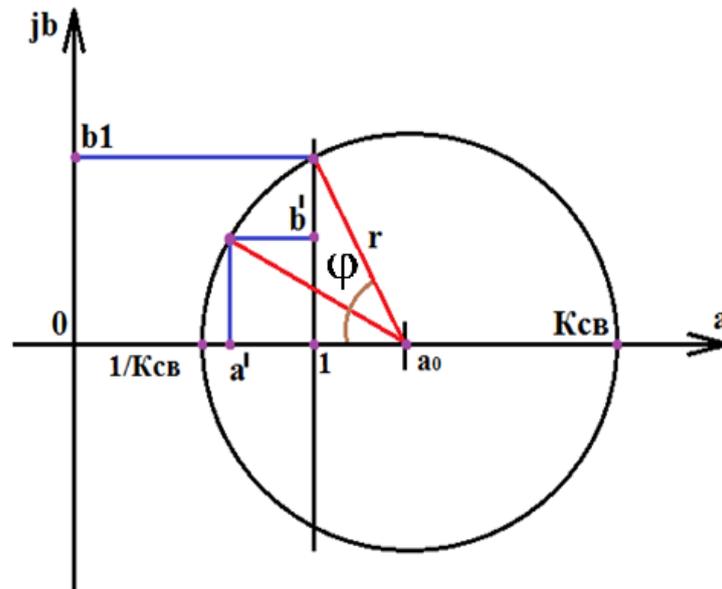


Рисунок 6 – Линия положения в комплексной плоскости, соответствующая значению  $K_{св}=1,5$

Линии положения в комплексной плоскости, соответствующие постоянному значению  $K_{св}$ , представляют собой окружность с центром, координаты которого:

$$a_0 = \frac{1}{2} \left( K_{св} - \frac{1}{K_{св}} \right) \quad (7)$$

и радиусом:

$$r = \frac{1}{2} \left( K_{св} + \frac{1}{K_{св}} \right). \quad (8)$$

Нормированные значения вещественной и мнимой составляющих входного сопротивления АСУ:

$$a = \frac{R_{вх}}{\rho_\phi}; b = \frac{X_{вх}}{\rho_\phi}. \quad (9)$$

При известном угле «φ» допустимые величины нормированных параметров:

$$a' = a_0 r \cos\left(\frac{\phi}{2}\right); b' = r \cos\left(\frac{\phi}{2}\right). \quad (10)$$

Откуда получаем значения  $R_{вх}$  и  $X_{вх}$ , которые при  $K_{св, доп} = 1,5$  и  $\rho_\phi = 50$  Ом равны:

$$R_{вх} = a' \rho_\phi = 38,029, \text{ Ом}; |X_{вх}| = b' \rho_\phi = 13,176, \text{ Ом}. \quad (11)$$

Для определения дискретных значений  $\Delta L$  и  $\Delta C$  для каждого варианта схемы находим значения  $X_1$  и  $X_2$ , при которых  $R_{вх} = 38,029$  Ом, а  $X_{вх} = 13,176$  Ом. Для этого используем уже ранее приведенные уравнения для каждой из схем. Полученные значения  $L$ ,  $C$ ,  $\Delta L$  и  $\Delta C$  приведены в табл. 1 и 2.

Рассчитаем разрядность для катушек индуктивности и конденсаторов для 1-го варианта схемы:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{L_{\max}}{L_{\min}} + 1\right)}{\log(2)} = 5,532 \approx 6, \quad (12)$$

$$m = \frac{\lg\left(\frac{C_{\max}}{C_{\min}} + 1\right)}{\log(2)} = 5,711 \approx 6, \quad (13)$$

где  $L_{\min} = \Delta L_{\min} = 0,06005$  мкГн,  $C_{\min} = \Delta C_{\min} = 3,7484$  пФ,  $L_{\max} = 2,719$  мкГн,  $C_{\max} = 192,6$  пФ – значения индуктивности и емкости из табл. 1.

Используя формулы (12) и (13), рассчитаем разрядность для катушек индуктивности и конденсаторов для 2-го варианта схемы:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{L_{\max}}{L_{\min}} + 1\right)}{\log(2)} = 12,232 \approx 13,$$

$$m = \frac{\lg\left(\frac{C_{\max}}{C_{\min}} + 1\right)}{\lg(2)} = 5,025 \approx 6,$$

где  $L_{\min} = \Delta L_{\min} = 0,04446$  мкГн,  $C_{\min} = \Delta C_{\min} = 192,6$  пФ,  $L_{\max} = 213,9$  мкГн и  $C_{\max} = 6080$  пФ – значения индуктивности и емкости из табл. 2.

При дальнейшем исследовании целесообразно разработать эффективный алгоритм поиска оптимальных параметров L и C на каждой рабочей частоте.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко, Б. М. Техническая эксплуатация судовых радиотехнических устройств и систем передачи информации: учеб. пособие / Б. М. Дьяченко, Ю. С. Иванов. – Москва: В/о «Мортехинформреклама», 1991. – 160 с.

2. Грошев, Г. А. Определение дискрета изменения параметров управляемых антенных согласующих устройств / Г. А. Грошев // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSM. – 2002. – С. 58-64.

#### THE METHOD OF SYNTHESIS OF DISCRETE CONTROLLED ANTENNA-ACCELERATIVE DEVICES IV / SV RANGE

N.A. Nastenka, cadet,  
 nickolay.nastenka2016@yandex.ru  
 Kaliningrad State Technical University, Baltic Fishing Fleet State Academy

An analysis of a discrete controlled antenna tuner for various types of ship antennas has been carried out to develop a methodology for designing such devices.

*antenna tuner, discretely controlled component, standing wave ratio*