



и пусть

$$L = \min_x \max_{1 \leq i \leq m} \eta_i(x), \quad (2)$$

где  $a_{ij}$ , ( $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, k}$ ) – вещественные коэффициенты;  $|L|$  – устойчивость разрешимости системы (1).

В этом случае система (1) совместна (разрешима) тогда и только тогда, когда  $L \leq 0$ .

Существует решение  $x^*$  устойчивое по отношению к некоторому изменению коэффициентов системы (1). Оно остается при этом решением новой системы (1) до тех пор, пока изменение коэффициентов  $a_{ij}$  не приведет к изменению уклонений  $\eta_i(x)$ , ( $i = \overline{1, m}$ ) на величину, большую чем  $|L|$ .

При  $L > 0$  система (1) несовместна и  $L$  является ее минимальным уклонением. Точка  $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*)$ , в которой при  $L \neq -\infty$  достигается условие (2) так, что

$$\max_{1 \leq i \leq m} \eta_i(x^*) = \min_x \max_{1 \leq i \leq m} \eta_i(x) = L \quad (3)$$

называется чебышевским решением системы (1):

– если  $L \leq 0$ , то  $x^*$  – устойчивое чебышевское решение;

– если  $L > 0$ , то  $x^*$  – чебышевское приближение.

При пересечении плоскостей  $\eta_i = 0$ , ( $i = \overline{1, m}; m > k$ ), т.е. когда выполняются условия Хаара и  $x^*$  есть чебышевское решение совместной системы (1), то эта точка равноуклоненная на величину  $L > 0$  от  $k+1$  из этих плоскостей, ограничивающих  $k$ -симплекс. Следовательно, точка  $x^*$  лежит внутри этого симплекса, являясь элементом множества решений системы (1) и уклоняется не более чем на  $L$  от остальных  $(m - k - 1)$  плоскостей.

Таким образом, нахождению точки  $x^*$  как чебышевского решения совместной системы линейных неравенств будет отвечать нахождение коэффициентов ДКА  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*$ .

Для существования единственной чебышевской точки необходимо и достаточно, чтобы каждый определитель  $k$ -го порядка матрицы ограничений  $[a_{ij}]$ , ( $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, k}$ ) был отличен от нуля.

При выполнении условия Хаара пара  $(x^*, L)$  находится как решение присоединенной задачи линейного программирования, в которой минимизируется целевая функция (2) на системе ограничений, расширенной из (1) присоединением неизвестной  $x_{k+1} = L$  [5].

Для проверки условий Хаара организуется полный перебор определителей  $k$ -го порядка [6].

### 3. Построение системы ограничений на характеристики ДКА

Пусть ДКА не рекурсивной структуры представлен  $z$ -передаточной функцией вида

$$W(z) = \sum_{i=0}^k N_i z^{-i}, \quad (4)$$

где  $N_i$ , ( $i = \overline{0, k}$ ) – постоянные вещественные коэффициенты;  $k$  – порядок ДКА;  $z$  – оператор  $z$ -преобразования. Подставив  $z = \exp(j\omega T)$  в выражение (4), получим

$$W(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega), \quad (5)$$

где  $\text{Re}(\omega) = \sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega T)$ ;  $\text{Im}(\omega) = -\sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega T)$ ;  $T$  – период прерывания;  $\omega$  – круговая частота.

Линейная зависимость  $\text{Re}(\omega)$  и  $\text{Im}(\omega)$  импульсной передаточной функции ДКА от коэффициентов  $N_i$ , ( $i = \overline{0, k}$ ) позволяет решить в пространстве коэффициентов задачу линейного программирования.

Требования к дискретной фазо-частотной характеристике (ДФЧХ) ДКА могут быть представлены в виде ограничений на фазовый сдвиг «сверху» и «снизу» в заданных точках частотной области в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\omega_g) - \operatorname{Re}(\omega_g) \operatorname{tg} a(\omega_g) &\leq 0, \quad g = \overline{1, m_1}, \\ \operatorname{Im}(\omega_g) - \operatorname{Re}(\omega_g) \operatorname{tg} b(\omega_g) &\leq 0, \quad g = \overline{1, m_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a(\omega_g), b(\omega_g)$  – значения ограничений, накладываемых на ДФЧХ ДКА «сверху» и «снизу» соответственно;  $m_1, m_2$  – число точек, в которых заданы ограничения «сверху» и «снизу» соответственно.

Ограничение на статический коэффициент усиления ДКА имеют вид

$$\operatorname{Re}(\omega) = k_0, \quad (7)$$

где  $k_0$  – величина статического коэффициента усиления.

Ограничения на дискретную амплитудно-частотную характеристику (ДАЧХ) ДКА могут быть представлены в виде

$$\operatorname{Re}^2(\omega_l) + \operatorname{Im}^2(\omega_l) \leq A^2(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \quad (8)$$

где  $\operatorname{Re}(\omega_l)$  и  $\operatorname{Im}(\omega_l)$  – реальная и мнимая части передаточной функции ДКА;  $A(\omega_l)$  – величина ограничения амплитуды ДКА на частотах  $\omega_l, l = \overline{1, n_1}$ ;  $n_1$  – число точек, в которых заданы ограничения на амплитуду ДКА.

Таким образом, получена система (6)-(8) основных ограничений на ДАФЧХ ДКА в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\omega_g) - \operatorname{Re}(\omega_g) \operatorname{tg} a(\omega_g) &\leq 0, \quad g = \overline{1, m_1}, \\ \operatorname{Im}(\omega_g) - \operatorname{Re}(\omega_g) \operatorname{tg} b(\omega_g) &\leq 0, \quad g = \overline{1, m_2}, \\ \operatorname{Re}^2(\omega_l) + \operatorname{Im}^2(\omega_l) &\leq A^2(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ \operatorname{Re}(\omega) &= k_0, \end{aligned} \quad (9)$$

которая имеет  $(m_1 + m_2 + n_1 + 1)$  ограничений. Из них  $(m_1 + m_2)$  неравенств линейные, одно линейное равенство и  $n_1$  нелинейных неравенств. Следовательно, для решения поставленной задачи необходимо осуществить линеаризацию нелинейных неравенств.

Из рассмотрения неравенств (9) видно, что область существования амплитуды ДКА являются области комплексной плоскости, ограниченные окружностями радиусов  $A(\omega_l), l = \overline{1, n_1}$ .

При аппроксимации окружностей многоугольниками с записью линейных ограничений для каждой грани, получаем систему линейных неравенств в зависимости от числа сторон многоугольника. Повышение точности аппроксимации окружностей вписанными многоугольниками приводит к росту системы неравенств. Поэтому следует оценить приемлемую ошибку аппроксимации, по которой может быть определено нужное число сторон многоугольника.

Если взять в качестве аппроксимирующего многоугольника равносторонний четырехугольник, то ограничения на ДАЧХ ДКА можно представить в виде следующей системы неравенств

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\omega_l) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ -\operatorname{Im}(\omega_l) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ -\operatorname{Re}(\omega_l) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ \operatorname{Im}(\omega_l) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $A'_1(\omega_l) = A'(\omega_l) \cdot \sqrt{2}/2, l = \overline{1, n_1}$  – значения линейных ограничений.

Теперь область существования амплитуды ДКА является вся внутренняя область четырехугольника на комплексной плоскости (рис. 1).

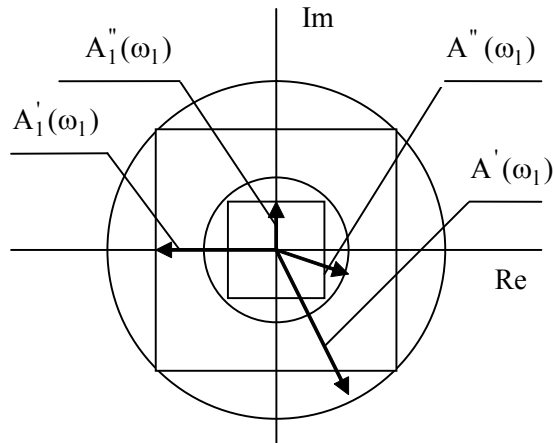


Рис. 1. Аппроксимация окружностей многоугольниками

При необходимости ограничения ДАЧХ ДКА на частотах присоединенных осцилляторов, вводится дополнительная система неравенств (11)

$$\begin{aligned}
 \operatorname{Re}(\omega_1) &\leq A_1''(\omega_1), \quad l = \overline{1, n_2}, \\
 -\operatorname{Im}(\omega_1) &\leq A_1''(\omega_1), \quad l = \overline{1, n_2}, \\
 -\operatorname{Re}(\omega_1) &\leq A_1''(\omega_1), \quad l = \overline{1, n_2}, \\
 \operatorname{Im}(\omega_1) &\leq A_1''(\omega_1), \quad l = \overline{1, n_2},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где  $A_1''(\omega_1) = A''(\omega_1) \cdot \sqrt{2} / 2$ ,  $l = \overline{1, n_2}$  – значения линейных ограничений на ДАЧХ ДКА на частотах присоединенных осцилляторов;  $A''(\omega_1)$ ,  $l = \overline{1, n_2}$  – значения нелинейных ограничений на ДАЧХ ДКА на этих же частотах;  $n_2$  – число точек ограничений на частотах присоединенных осцилляторов.

Областью существования амплитуды ДКА на частотах присоединенных осцилляторов является внутренняя область малого четырехугольника на комплексной плоскости (рис.1).

Из анализа полученных систем неравенств следует, что линейные ограничения для ДАЧХ ДКА являются более жесткими, так как ограничивают меньшую область комплексной плоскости. Однако исследования показывают, что такая замена не оказывает существенного влияния на характеристики синтезируемых ДКА.

На рис. 2 представлено изображение ограничений  $A'(\omega_1)$ ,  $A''(\omega_1)$  в частотной области.

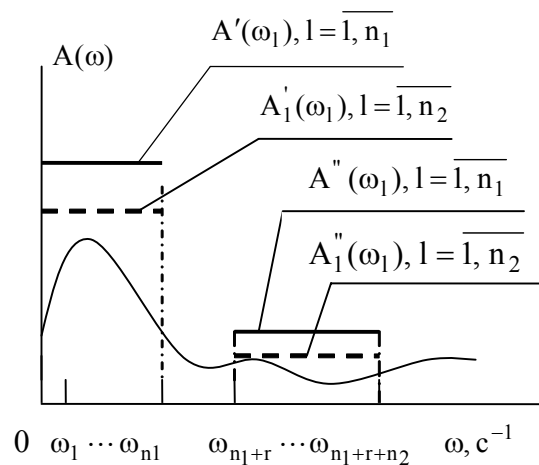


Рис. 2. Ограничения на ДАЧХ ДКА

Значения ограничений  $A'(\omega_l)$ ,  $l = \overline{1, n_1}$  выбираются в результате анализа ДАЧХ разомкнутой некорректированной системы и приближенной ДАЧХ желаемой скорректированной замкнутой системы в соответствии с критерием Найквиста. При этом выбираются значения

$$A'(\omega_l) = \gamma_1 \cdot \max[A_{\text{ж}}^k(\omega_l)] / A_p^H(\omega_l), \quad (12)$$

где  $\max[A_{\text{ж}}^k(\omega_l)]$ ,  $l = \overline{1, n_1}$ ,  $A_p^H(\omega_l) \neq 0$ ,  $l = \overline{1, n_1}$  – известные значения амплитуд разомкнутой некорректированной системы;  $\gamma_1$  – постоянный коэффициент.

Значения ограничений  $A''(\omega_l)$ ,  $l = \overline{1, n_2}$  выбираются на основе анализа ДАЧХ разомкнутой некорректированной системы в зависимости от необходимости ограничения амплитуды на частотах присоединенных осцилляторов

$$A''(\omega_l) = \gamma_2 \cdot \max[A_{\text{ж}}^k(\omega_l)] / A_p^H(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_2}, \quad (13)$$

где  $\max[A_{\text{ж}}^k(\omega_l)] < 1$ ,  $l = \overline{1, n_2}$  – максимальное желаемое значение амплитуд замкнутой скорректированной системы в диапазоне частот осцилляторов;  $A_p^H(\omega_l) \neq 0$ ,  $l = \overline{1, n_2}$  – известные значения амплитуд разомкнутой системы на тех же частотах;  $\gamma_2$  – постоянный коэффициент.

В данном случае имеет место свобода выбора уровня, вида ограничений и возможности исследования системы в границах предпочтений пользователя. На различных этапах проектирования это может быть полезным свойством метода. При допущении ошибки в выборе ограничений, задача синтеза после проверки условий Хаара, предложит ввести более корректные ограничения. Изменение значений ограничений возможно варьированием коэффициентов  $\gamma_i$ ,  $i = 1, 2$ . При этом может также варьироваться число точек ограничений  $n_2$ .

Заменив в системе неравенств (9) нелинейные неравенства выражениями (10), (11) с учетом (5), получим полную систему линейных ограничений для ДКА. Эти ограничения выражены через коэффициенты ДКА в виде

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^k N_i [-\sin(i\omega_g T) - \text{tg}(\omega_g) \cos(i\omega_g T)] &\leq 0, \quad g = \overline{1, m_1}, \\ \sum_{i=0}^k N_i [\sin(i\omega_g T) + \text{tg}(\omega_g) \cos(i\omega_g T)] &\leq 0, \quad g = \overline{1, m_2}, \\ \sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_l T) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ - \sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_l T) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ - \sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_l T) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ \sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_l T) &\leq A'_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_1}, \\ \sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_l T) &\leq A''_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_2}, \\ - \sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_l T) &\leq A''_1(\omega_l), \quad l = \overline{1, n_2}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
-\sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_1 T) &\leq A_1''(\omega_1), \quad l = \overline{1, n_2}, \\
\sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_1 T) &\leq A_1'(\omega_1), \quad l = \overline{1, n_2}, \\
\sum_{i=0}^k N_i &= k_0,
\end{aligned}$$

где  $A_1'(\omega_1) = A'(\omega_1) \cdot \sqrt{2}/2$ ,  $l = \overline{1, n_1}$ ;  $A_1''(\omega_1) = A''(\omega_1) \cdot \sqrt{2}/2$ ,  $l = \overline{1, n_2}$ .

Система (14) включает в себя  $(m_1 + m_2 + 4n_1 + 4n_2)$  линейных неравенств и одно линейное равенство. При необходимости равенство сводится к двум неравенствам.

#### 4. Построение задачи линейного программирования

Для решения поставленной задачи необходимо свести ее к задаче линейного программирования путем введения вспомогательной переменной  $x_{k+1}$  во все ограничения системы (14), требуя выполнения неравенств

$$\eta_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ik}x_k + a_i \leq x_{k+1}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Тогда, задача (1) – (3) сводится к эквивалентной ей следующей задаче линейного программирования:

Найти минимум линейной формы

$$z = x_{k+1} \tag{15}$$

при ограничениях  $\eta_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ik}x_k + a_i \leq x_{k+1}$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

Умножив левую и правую часть последнего неравенства на (-1) и перенеся  $x_{k+1}$  в левую часть неравенства, получим

$$\eta_i = -a_{i1}x_1 - a_{i2}x_2 - \dots - a_{ik}x_k + x_{k+1} - a_i \geq 0, \quad i = \overline{1, m}. \tag{16}$$

Получена задача линейного программирования, называемая присоединенной к задаче чебышевского приближения системы  $\eta_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ik}x_k + a_i = 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

Итак, задачу (15) – (16) как типичную задачу линейного программирования можно решать симплекс-методом. Таким образом, из (12) – (16) новую систему получим в виде

$$\begin{aligned}
\sum_{i=0}^k N_i [-\sin(i\omega_g T) - \operatorname{tg}(\omega_g) \cos(i\omega_g T)] + N_{k+1} &\geq 0, \quad g = \overline{1, m_1}, \\
\sum_{i=0}^k N_i [\sin(i\omega_g T) + \operatorname{tg}(\omega_g) \cos(i\omega_g T)] + N_{k+1} &\geq 0, \quad g = \overline{1, m_2}, \\
-\sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_1 T) + A_1'(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_1}, \\
\sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_1 T) + A_1'(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_1}, \\
\sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_1 T) + A_1''(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_1}, \\
-\sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_1 T) + A_1''(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_1}, \\
-\sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_1 T) + A_1''(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_2}, \\
\sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_1 T) + A_1''(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_2}, \\
\sum_{i=0}^k N_i \cos(i\omega_1 T) + A_1'(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_2}, \\
-\sum_{i=0}^k N_i \sin(i\omega_1 T) + A_1'(\omega_1) + N_{k+1} &\geq 0, \quad l = \overline{1, n_2},
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\sum_{i=0}^k N_i + k_0 + N_{k+1} = 0, \quad z = x_{k+1},$$

где  $A'_1(\omega_1) = A'(\omega_1) \cdot \sqrt{2}/2, \quad 1 = \overline{1, n_1}; \quad A''_1(\omega_1) = A''(\omega_1) \cdot \sqrt{2}/2, \quad 1 = \overline{1, n_2}.$

$$A'(\omega_1) = \gamma_1 \cdot \max[A_{\text{Ж}}^K(\omega_1)] / A_p^H(\omega_1), \quad A_p^H(\omega_1) \neq 0, \quad 1 = \overline{1, n_1};$$

$$A''(\omega_1) = \gamma_2 \cdot \max[A_{\text{Ж}}^K(\omega_1)] / A_p^H(\omega_1), \quad A_p^H(\omega_1) \neq 0, \quad \max[A_{\text{Ж}}^K(\omega_1)] < 1, \quad 1 = \overline{1, n_2}.$$

Получена система  $(m_1 + m_2 + 4n_1 + 4n_2)$  линейных неравенств и одного линейного равенства. В соответствии с симплекс-методом присоединенная задача (15) задается в виде табл. 1 следующего вида.

Таблица 1. Таблица алгоритма симплекс-метода

	$-x_1$	$-x_2$	$\dots$	$-x_k$	$-x_{k+1}$	$-1$
$y_1 =$	$-a_{11}$	$-a_{12}$	$\dots$	$-a_{1k}$	$-1$	$a_1$
$\dots$						
$y_m =$	$-a_{m1}$	$-a_{m2}$	$\dots$	$-a_{mk}$	$-1$	$a_m$
$\dots$						
$y_1^* =$	$a_{11}$	$a_{12}$	$\dots$	$a_{1k}$	$-1$	$a_1$
$\dots$						
$y_m^* =$	$a_{m1}$	$a_{m2}$	$\dots$	$a_{mk}$	$-1$	$-a_m$
$0 =$	$1$	$1$	$\dots$	$1$	$0$	$k_0$
$z =$	$0$	$0$	$\dots$	$0$	$-1$	$Q$

При помощи последовательных шагов жордановых исключений исключаются лишь координаты  $x_1, x_2, \dots, x_k$  (т.к.  $x_{k+1} \geq 0$ ). Применяется алгоритм симплекс-метода для отыскания опорного решения, а затем для минимизации  $z$ . В результате получения решения, вычисляются координаты  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*$  чебышевской точки. Уклонение  $L$  равно найденному значению  $Z$ .

Структурная схема задачи синтеза представлена на рис. 4.

**Пример.** Найти коэффициенты дискретного линейного не рекурсивного корректирующего алгоритма минимального порядка, обеспечивающего опережение по фазе в диапазоне частот  $\omega = 0, 2, 4, \dots, 14 \text{ с}^{-1}$  с шагом  $\Delta\omega = 2 \text{ с}^{-1}$  и  $m_1 = m_2 = 7$ , удовлетворяющего ограничениям, заданным табл. 2:  $k_{\text{нач}} = 2; T = 0,05 \text{ с}$ .

Таблица 2. Ограничения на фазо-частотную характеристику ДКА

g	Ограничения на сдвиг фаз регулятора				
	$\omega_g$ $\text{с}^{-1}$	$a(\omega_g)$ рад	$b(\omega_g)$ рад	$a(\omega_g)$ град	$b(\omega_g)$ град
1	2	1.221730	0.523599	70	30
2	4	1.221730	0.523599	70	30
3	6	1.221730	0.523599	70	30
4	8	1.221730	0.523599	70	30
5	10	1.047198	0.349066	60	20
6	12	0.872665	0.174533	50	10
7	14	0.698132	-0.174533	40	-10

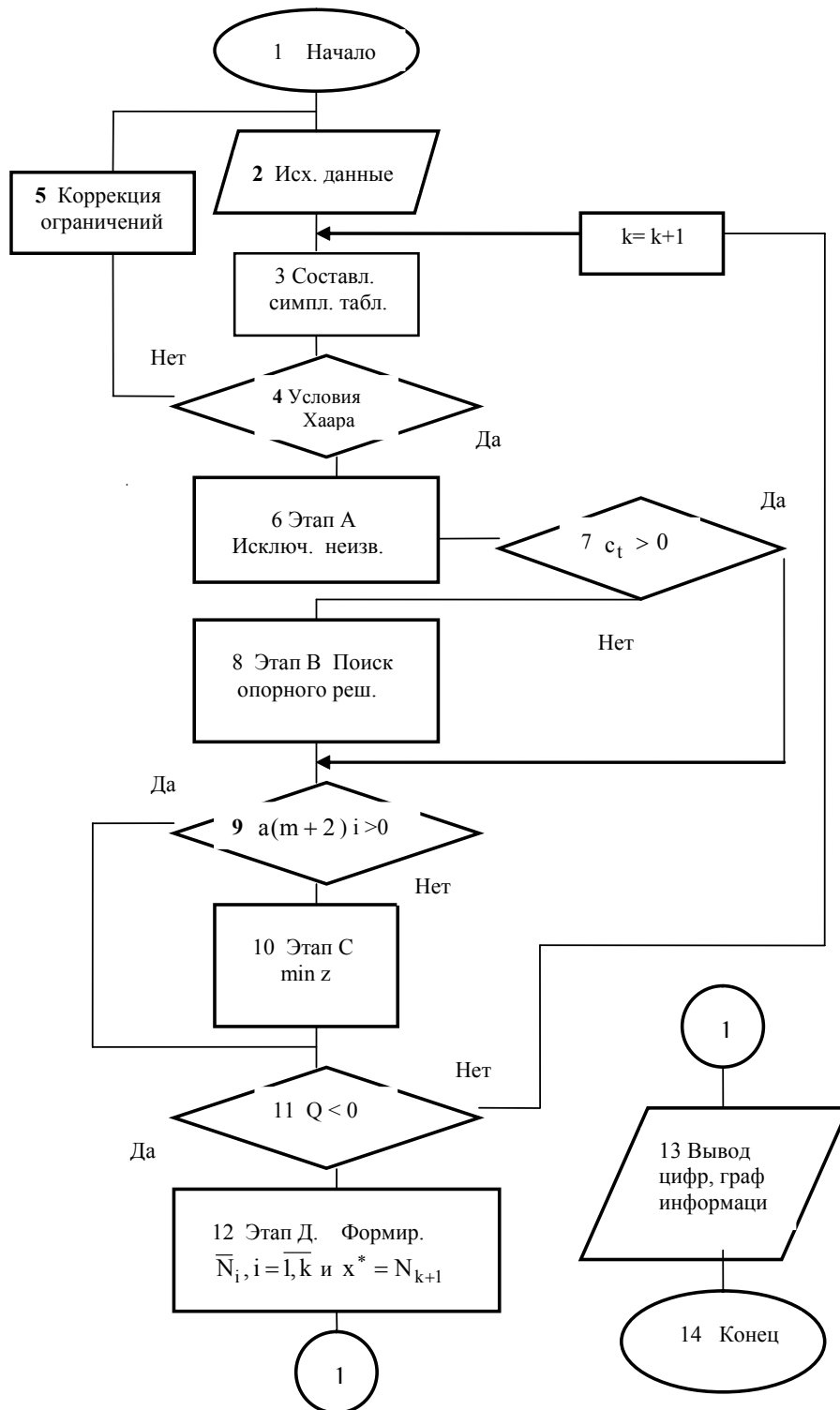


Рис. 4. Структурная схема задачи синтеза корректирующих алгоритмов

В результате решения задачи методом нахождения чебышевского решения, получен ДКА не рекурсивной структуры третьего порядка с нормированными коэффициентами

$$W(z) = 1 - 0.180099z^{-1} - 0.271732z^{-2} - 0.310527z^{-3},$$

ДФЧХ которого представлена на рис. 5.

Синтезированный ДКА собственно устойчив, так как корни его характеристического уравнения  $z_{1,2} = -0.352141 \pm j \cdot 0.476571$ ,  $z_3 = 0.884382$  находятся в окружности единичного радиуса  $z$  – плоскости.

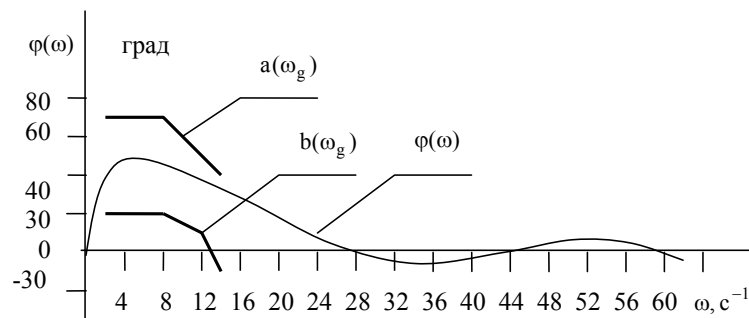


Рис. 5. ДФЧХ синтезированного ДКА

## Выводы

*Научная новизна* полученных результатов заключается в системном подходе к разработке метода синтеза ДКА с одновременным учетом всех ограничений.

1. Предложенный метод синтеза линейных ДКА работоспособен в условиях линеаризации нелинейных ограничений на дискретные частотные характеристики исследуемого ДКА.

2. Анализ результатов исследований показывает, что требования предъявляемые к синтезируемому ДКА выполняются: ДКА минимального порядка и собственно устойчивы; частотные характеристики находятся внутри заданной зоны ограничений в требуемом диапазоне частот.

3. Предложенный метод синтеза ДКА может быть использован при проектировании дискретных систем управления для сложных динамических систем.

*Практическая значимость* заключается в значительном (на 70 – 80 %) снижении времени синтеза ДКА на основе предложенного метода.

**Список литературы:** 1. Кунцевич В.М. Синтез робастно устойчивых дискретных систем управления нелинейными объектами // Автоматика. 2008. Ч. 1. Доклады XV международной конференции по автоматическому управлению 23-26 сентября 2008. г. Одесса. ОНМА. С.296-299. 2. Прач А.А. Синтез оптимальной системы стабилизации заданной точности // 6-я Международная научно-техническая конференция: Гидро-технологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники: Сб. док. 2007. Ч.2. Киев. С. 127-133. 3. Ларин В.Б., Туник А.А. Синтез контуров управления летательного аппарата с гарантированной точностью // Сб. материалов 13-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. 2006. С.36-38. 4. Taranenko W., Czachos G. Performance of adaptive control algorithm for machining process in the presence of computational delays // Автоматика – 2003: Материалы 10-й Международной конференции по автоматическому управлению, г. Севастополь, 15-19 сентября 2003.: в 3-х т. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003 Т.1. С.112-115. 5. Зуховицкий С.И. Линейное и выпуклое программирование [Текст] / С.И. Зуховицкий., Авдеева Л.И. М.: Наука, 1967. 348с. 6. Липский В. Комбинаторика для программистов. М.: Мир. 1988. 213 с.

Поступила в редколлегию 29.06.2010

**Зотов Владимир Густавович**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование дискретных систем управления. Увлечения: туризм, цифровое фото. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Астрономическая-19, кв. 19, тел. 760-38-76.