

также может усложнить определение текущей области разбиения из-за наличия основной погрешности в данных, полученных с канала давления и температуры. Выбор размеров областей разбиения ГХЧЭ следует осуществлять исходя из автоматизации процесса построения модели градуировочной характеристики, объемов памяти вычислительного устройства, в котором будет реализоваться используемая математическая модель, и основной погрешности каналов давления и температуры чувствительного элемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пьявченко О.Н., Мокров Е.А., Панич А.Е., Клевцов С.И., Пьявченко А.О., Удод Е.В., Федоров А.Г. Методы, модели, алгоритмы и архитектура прецизионных интеллектуальных датчиков давления /Под ред. д.т.н., профессора О.Н. Пьявченко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 130 с.
2. Клевцов С.И., Удод Е.В. Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления // Известия ТРТУ. 2005. №1. С.99–107.

Удод Евгений Васильевич
Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г.Таганроге
E-mail:kafmps@ttpark.ru
347900, Таганрог, ул. Петровская, 81
Тел.: +7(8634)328025

Udod Evgeniy Vasikievich
Taganrog Institute of Technological – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»
E-mail:kafmps@ttpark.ru
81, Petrovskay street, Taganrog, 347900, Russia
Phone: +7(8634) 328025

УДК 621.3.013.62

С.С. Зельманов

КРИТЕРИЙ РЕЗОНАНСА И РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОБОБЩЕННОМ ДВУХПОЛЮСНИКЕ

В статье на основе предложенного критерия рассматривается явление резонанса в колебательном контуре с обратным управлением величиной затухания под действием огибающей АМ-сигнала. Определены параметры цепи управления, влияющие на форму эквивалентной амплитудно-частотной характеристики системы, определены условия, при которых в контуре может иметь место абсолютный резонанс, а также R-резонанс и X-резонанс на боковых частотах АМ-сигнала, действующего на входе контура.

Резонанс; обратное управление; эквивалентное затухание; следящий прием; цепь управления; эквивалентное реактивное сопротивление; эквивалентное резистивное сопротивление.

S.S. Zelmanov

RESONANCE CRITERION AND RESONANT PHENOMENA IN A GENERALIZED TWO-TERMINAL CIRCUIT

The paper examines, on the basis of the offered criterion, the phenomenon of the resonance in an oscillatory circuit with reversed control of the attenuation size under action of an AM-signal envelope. Control circuit parameters influencing on the shape of the equivalent amplitude-frequency characteristic of the system are determined. Conditions, at which in the circuit an absolute resonance, and also R-resonance and X-resonance on side frequencies of an AM-signal applied to the input can take place, are defined.

Resonance; reversed control; equivalent attenuation; tracking reception; control circuit; equivalent reactive impedance; equivalent resistive impedance.

Условием резонанса в линейном двухполюснике является равенство нулю его реактивного сопротивления [1]. Представляет интерес рассмотреть более общий случай, при котором его полное сопротивление представлено выражением $Z_{\mathcal{E}} = \sqrt{R_{\mathcal{E}}^2(\omega) + X_{\mathcal{E}}^2(\omega)}$. В общем случае, когда $R_{\mathcal{E}}(\omega)$ так же, как и $X_{\mathcal{E}}(\omega)$ зависит от частоты, характер резонанса можно определять с помощью специального критерия вида

$$\left. \frac{dZ_{\mathcal{E}}}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_p} = 0 \quad \text{при} \quad \left. \frac{d^2Z_{\mathcal{E}}}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_p} \neq 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) может быть представлено более подробно в виде

$$\left. \frac{R_{\mathcal{E}}(\omega)R'_{\mathcal{E}}(\omega) + X_{\mathcal{E}}(\omega)X'_{\mathcal{E}}(\omega)}{\sqrt{R_{\mathcal{E}}^2(\omega) + X_{\mathcal{E}}^2(\omega)}} \right|_{\omega=\omega_p} = 0 \quad \text{или}$$

$$R_{\mathcal{E}}(\omega)R'_{\mathcal{E}}(\omega) + X_{\mathcal{E}}(\omega)X'_{\mathcal{E}}(\omega) \Big|_{\omega=\omega_p} = 0. \quad (2)$$

Условие (2) распадается на ряд возможных случаев:

$$1. R_{\mathcal{E}}(\omega_p) = R \neq 0; R'_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0; \quad X_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0; \quad X'_{\mathcal{E}}(\omega_p) \neq 0; \\ [X'_{\mathcal{E}}(\omega_p) > 0].$$

Этот случай относится к классическому резонансу в последовательном колебательном контуре.

$$2. R_{\mathcal{E}}(\omega_p) \neq 0; R'_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0; X_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0; X'_{\mathcal{E}}(\omega_p) \neq 0; [X'_{\mathcal{E}}(\omega_p) < 0].$$

Эти условия соответствуют случаю резонанса в параллельном колебательном контуре.

$$3. R_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0; R'_{\mathcal{E}}(\omega_p) \neq 0; X_{\mathcal{E}}(\omega_p) \neq 0; X'_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0.$$

$$4. R_{\mathcal{E}}(\omega_p) \neq 0; R'_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0; X_{\mathcal{E}}(\omega_p) = 0; X'_{\mathcal{E}}(\omega_p) \neq 0.$$

Случаи 3 и 4 могут быть названы соответственно условиями R-резонанса и X-резонанса. В случае 3 резонанс в системе обусловлен равенством нулю только эквивалентного резистивного сопротивления системы, а в случае 4 – равенством нулю только эквивалентного реактивного сопротивления. Резистивное сопротивление контура в отличие от случая 1 зависит от частоты.

$$5. R_{\mathcal{Z}}(\omega_p) = 0; X_{\mathcal{Z}}(\omega_p) = 0.$$

Это случай абсолютного резонанса в системе, при котором становится равным нулю полное сопротивление контура. При этом величина тока в контуре определяется только мощностью источника ЭДС и его внутренним сопротивлением и никак не зависит от параметров контура. Случаи 3,4 и 5 могут иметь место в колебательной системе с обратным управлением величиной затухания, резонанс в которой может иметь место на частотах боковых колебаний АМ-сигнала, действующего на входе контура.

Рассмотрим колебательную систему, представленную на рис.1, на входе которой действует АМ-сигнал, а ее затухание управляется в зависимости от девиации амплитуды напряжения огибающей этого сигнала на выходе системы.

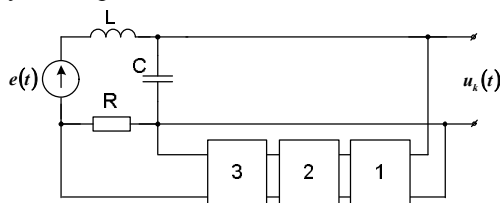


Рис.1. Колебательная система с автоматически управляемым затуханием: 1 – амплитудный детектор, 2 – цепь управления, 3 – активный элемент

Определим условия, при которых в ней может иметь место явление резонанса.

Эквивалентное затухание системы $\alpha_{\mathcal{Z}}$ должно изменяться по закону, связанному определенным образом с амплитудой ЭДС в системе.

При наличии модуляции уравнение системы будет иметь вид

$$\frac{d^2}{dt^2}(q_0 + q_1) + 2\Gamma(q_0 + q_1)\frac{d}{dt}(q_0 + q_1) + \omega_0^2(q_0 + q_1) = \frac{1}{L}[e_0(t) + e_1(t)], \quad (3)$$

где $[e_0(t) + e_1(t)] = E_0 \cos \omega_0 t + \underline{E}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t$.

Будем считать приращения ЭДС ΔE_m при модуляции достаточно малыми. Можем считать также, что достаточно малыми будут приращения напряжения на выходе системы ΔU_m . То же самое можно сказать об уровне q_1 по сравнению с q_0 , $\alpha_{\mathcal{Z}} = \alpha_0 + \alpha_{\Delta}$, где α_{Δ} – приращение затухания системы.

Комплексная амплитуда отклонения амплитуды напряжения ЭДС $\Delta \underline{E}_{mk} = \underline{E}_m e^{j\Omega t}$. Ей соответствует на выходе системы отклонение амплитуды на-

пряжения $\Delta \underline{U}_{mk} = \frac{Q}{C} e^{j\Omega t}$. Их отношение $\underline{k}_A = \frac{\Delta \underline{U}_{mk}}{\Delta \underline{E}_{mk}} = \frac{Q}{\underline{E}_m C}$.

Решая уравнение системы, можно показать, что оно определяет переход от комплексной амплитуды гармонической составляющей отклонения амплитуды ЭДС к комплексной амплитуде гармонической составляющей отклонения амплитуды напряжения на контуре (или заряда) в виде соотношения

$$\underline{k}_A(\Omega) = \frac{\omega_0}{2} \frac{1}{\left[\left(\alpha_0 + \frac{2k_y}{C} Q_0 \right) + j\Omega \right]}, \quad (4)$$

где $Q_0 = \frac{E_0}{2\alpha_0\omega_0 L}$, $\underline{k}_y = k_{yR} + jk_{yx} = k_y e^{j \arctg \frac{k_{yx}}{k_{yR}}}$ – коэффициент чувствительности управляющего тракта. Зависимость $\underline{k}_A(\Omega)$ мы будем называть **эквивалентной амплитудно-частотной характеристикой (ЭАЧХ) системы** по отношению к малым гармоническим отклонениям амплитуды ЭДС. Выражение (4) для модуля ЭАЧХ системы может иметь различный характер в зависимости от вида схемы четырехполосника в цепи управления, т.е. от его коэффициента передачи $k(j\Omega) = k_R + jk_X$. С учетом этого его можно представить в виде (5)

$$k_A = \frac{Q}{\sqrt{(1 + 2k_R)^2 + \left(\frac{\Omega}{\alpha_0} + 2k_X \right)^2}}. \quad (5)$$

Определим условия, при которых в системе возможны различные виды резонансов. В соответствии с воздействием (3), комплексная амплитуда заряда \underline{Q}_m удовлетворяет равенству

$$\begin{aligned} 2\omega_0 \left(\alpha_0 + \frac{2k_y Q_0}{C} + j\Omega \right) \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t &= \frac{1}{L} \underline{E}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t \quad \text{или} \\ 2\omega_0 \alpha_0 \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t + 2\omega_0 \frac{2k_y Q_0}{C} \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t + \\ + j2\omega_0 \Omega \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t &= \frac{1}{L} \underline{E}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t. \end{aligned} \quad (6)$$

Первое слагаемое в выражении (6) – это напряжение на резистивном сопротивлении контура, вызванное колебанием $\underline{q}_1 = \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \sin \omega_0 t$. Второе слагаемое выражения (6) представляет собой мгновенное приращение напряжения на резистивном сопротивлении контура, которое вызвано действием активного элемента, управляемого по цепи обратной связи. Третье слагаемое выражения (6) – это та часть падения напряжения на индуктивности контура, которая не скомпенсирована падением напряжения на его емкости и обусловлена изменением амплитуды колебания, т.е. зависит от Ω . При $\Omega = 0$ это слагаемое обращается в нуль.

Представим второе слагаемое выражения (6) в следующей форме:

$$\frac{4\omega_0 k_y Q_0}{C} \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \cos \omega_0 t = \frac{4\omega_0 Q_0}{C} \underline{Q}_m e^{j\Omega t} k_{yR} \cos \omega_0 t + j \frac{4\omega_0 Q_0}{C} \underline{Q}_m e^{j\Omega t} k_{yX} \cos \omega_0 t. \quad (7)$$

Сравнивая обе части выражения (7) с падением напряжения, обусловленным первым и третьим членами выражения (6), можно заключить:

1. Первая часть приращения напряжения на резистивном сопротивлении контура в правой части выражения (7), обусловленная синфазной составляющей k_{yR} коэффициента управления \underline{k}_y , имеет резистивный характер. Знак этой составляющей зависит от знака величины k_{yR} . Если $k_{yR} > 0$, то в контур вносится

дополнительно положительное резистивное сопротивление. Если $k_{yR} < 0$, то в контур вносится отрицательное дополнительное резистивное сопротивление. За счет этого частично или полностью компенсируется падение напряжения, представленное первым слагаемым левой части выражения (6). При этом общее резистивное сопротивление контура может обратиться в нуль или даже стать отрицательным.

2. Вторая часть приращения напряжения на резистивном сопротивлении контура, обусловленная ортогональной составляющей k_{yX} коэффициента управления \underline{k}_y , имеет реактивный характер. Знак реактивности зависит от знака k_{yX} . Если $k_{yX} > 0$, то характер реактивного сопротивления, вносимого в контур, будет индуктивным. Складываясь с остатком индуктивного сопротивления, соответствующим третьему слагаемому левой части выражения (6), он увеличивает общее реактивное сопротивление контура. Если $k_{yX} < 0$, то в контур вносится емкостное сопротивление, уменьшающее общее реактивное сопротивление контура, величина которого может обратиться в нуль. При этом возможна частичная или полная компенсация падения напряжения, представленного третьим слагаемым в левой части выражения (6). Преобразуем выражение $q_1 = \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \sin \omega_0 t$:

$$\begin{aligned} \underline{Q}_m e^{j\Omega t} \sin \omega_0 t &= \underline{Q}_m \left[\frac{1}{2j} e^{j(\omega_0 + \Omega)t} - \frac{1}{2j} e^{-j(\omega_0 - \Omega)t} \right] = \\ &= \underline{Q}_m \left[\frac{1}{2} e^{j\left(\omega_0 + \Omega - \frac{\pi}{2}\right)t} + \frac{1}{2j} e^{-j\left(\omega_0 - \Omega + \frac{\pi}{2}\right)t} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) имеет вид суммы двух гармонических колебаний с боковыми частотами $(\omega_0 \pm \Omega)$. Итак, с помощью синфазной составляющей k_{yR} коэффициента управления \underline{k}_y можно частично или полностью скомпенсировать действие резистивного сопротивления контура по отношению к боковым колебаниям спектра АМ-сигнала за счет вносимого отрицательного сопротивления. При этом на указанных боковых частотах в системе будет иметь место **R-резонанс**. Условием наступления **R-резонанса** является выполнение равенства

$$2\omega_0 \alpha_0 = -\frac{4\omega_0 \underline{Q}_0}{C} k_{yR}. \quad (9)$$

С помощью ортогональной составляющей k_{yX} коэффициента управления можно скомпенсировать частично или полностью действие реактивного сопротивления контура по отношению к боковым колебаниям спектра АМ-сигнала. Это означает, что на указанных боковых частотах $(\omega_0 \pm \Omega_X)$ имеет место **X-резонанс**. Условие наступления **X-резонанса**:

$$2\omega_0 \Omega = -\frac{4\omega_0 \underline{Q}_0}{C} k_{yX}. \quad (10)$$

Если для какой-либо пары боковых частот $(\omega_0 \pm \Omega_A)$ в контуре имеет место полная компенсация сопротивлений реактивного и резистивного характера одновременно, то полное комплексное сопротивление управляемого контура по отношению к этим боковым частотам будет равно нулю. Это означает, что в системе будет иметь место **абсолютный резонанс** по отношению к малым девиациям ам-

плитуды ЭДС. Величина тока в контуре определяется только мощностью источника ЭДС и его внутренним сопротивлением и никак не зависит от параметров контура. С учетом (9) и (10) коэффициент передачи цепи управления при абсолютном резонансе равен

$$k(j\Omega) = k_R + jk_X = -\frac{1}{2} - j\frac{\Omega_A}{2\alpha_0}. \quad (11)$$

Рассмотрим цепь управления с фазоинвертором для абсолютного резонанса (рис.2). Коэффициент передачи цепи управления будет иметь вид

$$k(j\Omega) = -j\frac{\Omega L_y}{R_y + j\Omega L_y} = -j\frac{\Omega\tau_y}{1 + j\Omega\tau_y} = -\frac{(\Omega\tau_y)^2}{1 + (\Omega\tau_y)^2} - j\frac{\Omega\tau_y}{1 + (\Omega\tau_y)^2}, \quad (12)$$

где $\tau_y = L_y/R_y$ – постоянная времени цепи управления.

После подстановки (12) в (5) получим при $Q = \omega_0/2\alpha_0$:

$$k_A = \frac{Q}{\sqrt{\left[1 - 2\frac{(\Omega\tau_y)^2}{1 + (\Omega\tau_y)^2}\right]^2 + \left[\frac{\Omega}{\alpha_0} - 2\frac{\Omega\tau_y}{1 + (\Omega\tau_y)^2}\right]^2}}, \quad (13)$$

Условием абсолютного резонанса является обращение в нуль знаменателя выражения (13) при выполнении следующих условий:

$$1 - 2\frac{(\Omega_A\tau_y)^2}{1 + (\Omega_A\tau_y)^2} = 0, \text{ т.е. } \Omega_A\tau_y = 1; \quad \frac{\Omega_A}{\alpha_0} - 2\frac{\Omega_A\tau_y}{1 + (\Omega_A\tau_y)^2} = 0, \text{ т.е. } \Omega_A = \alpha_0.$$

Резонансная кривая 3 при $Q = 10$ приведена на рис.3.

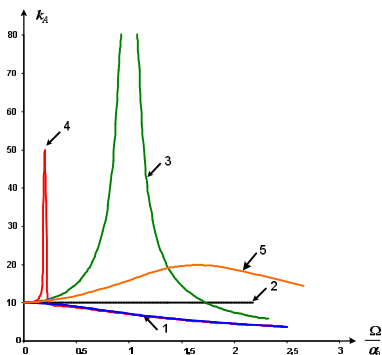


Рис. 3. Эквивалентные АЧХ системы

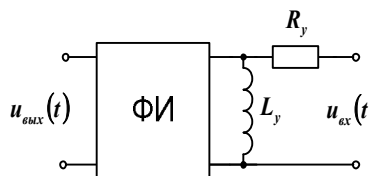


Рис.2. Схема цепи управления для абсолютного резонанса в системе

Рассмотрим схему цепи управления для случая R-резонанса (рис.4).

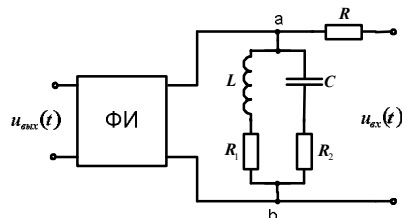


Рис. 4. Схема цепи управления резонанса в системе

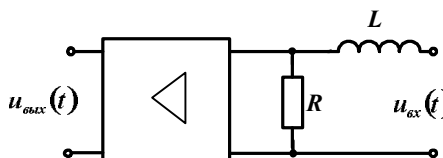


Рис. 5. Схема цепи управления для X-резонанса в системе

Комплексный коэффициент передачи этой цепи будет иметь вид

$$k(j\Omega) = -\frac{R_{pez}R_0}{R_0^2 + (\xi R)^2} + j\frac{\xi R_{pez}R}{R_0^2 + (\xi R)^2} = k_R + jk_X, \quad (14)$$

где $R_0 = R + R_{pez}$, $R_{pez} = \frac{L}{C(R_1 + R_2)}$; $Z_{ab}(\xi) = \frac{R_{pez}}{1 + j\xi}$; $\xi = 2Q\frac{\Omega - \Omega_R}{\Omega_R}$.

После подстановки (14) в выражение (5) получим:

$$k_A = \frac{Q}{\sqrt{\left[1 - 2\frac{R_{pez}R_0}{R_0^2 + (\xi R)^2}\right]^2 + \left[\frac{\Omega}{\alpha_0} + 2\frac{\xi R_{pez}R}{R_0^2 + (\xi R)^2}\right]^2}}. \quad (15)$$

Для выполнения условия R-резонанса необходимо, чтобы первое слагаемое подкоренного выражения формулы (15) обратилось в нуль на частоте Ω_R .

Преобразуем выражение (15) с учетом условий R-резонанса:

$$k_A = \frac{Q}{\sqrt{\left[1 - \frac{4}{4 + \xi^2}\right]^2 + \left[\frac{\Omega}{\alpha_0} + \frac{2\xi}{4 + \xi^2}\right]^2}}. \quad (16)$$

Соответствующая резонансная кривая 4 для случая R-резонанса при $\Omega_R = 0,2\alpha_0$ представлена на рис.3.

Рассмотрим схему цепи управления для случая **X-резонанса** (рис.5).

Выражение комплексного коэффициента этой цепи будет иметь вид

$$k(j\Omega) = \frac{R}{R + j\Omega L} = \frac{R^2}{R^2 + (\Omega L)^2} - j\frac{\Omega LR}{R^2 + (\Omega L)^2} = k_R + jk_X. \quad (17)$$

Приняв величину коэффициента усиления масштабного усилителя равной 3, после подстановки k_R и k_X в (5) получим выражение для ЭАЧХ:

$$k_A = \frac{3Q}{\sqrt{\left[1 + \frac{2R^2}{R^2 + (\Omega L)^2}\right]^2 + \left[\frac{\Omega}{\alpha_0} - \frac{2\Omega LR}{R^2 + (\Omega L)^2}\right]^2}}. \quad (18)$$

Для выполнения условия **X-резонанса** в системе необходимо, чтобы знаменатель выражения (18) был минимальным. Примем $\frac{R}{L} = \alpha_0$. Тогда резонансная

частота при X-резонансе $\frac{\Omega_X}{\alpha_0} = 1,6$. Соответствующая резонансная кривая 5 для $Q = 10$ представлена на рис.3.

Таким образом, рассмотрение условия резонанса в обобщенном двухполюснике позволило выяснить некоторые особенности имеющих место в нем резонансных явлений. Данное исследование представляет, на наш взгляд, интерес при разработке проблемы следящего приема модулированных сигналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1969. – С.41.

Зельманов Самуил Соломонович
Московский технический университет связи и информатики (Волго-Вятский филиал г. Нижний Новгород)
E-mail: zelmanss@yandex.ru
603011, Нижний Новгород, ул. Менделеева, 15.
Тел.: +7(8312) 457505

Zekmanov Samuil Solomonovich
Moscow Technical University of Communication and Information Sciens (Volgo-Vyatskiy Branch)
E-mail: zelmanss@yandex.ru
15, Mendeleev street, Nizhny Novgorod, 603011, Russia
Phone: +7(8312) 457505

УДК 66.096.5:932.2

В.Ф. Беккер, И.Ф. Киссельман

**МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ
ПОТОКОВ В АБСОРБЕРАХ С ПСЕВДООЖИЖЕННОЙ НАСАДКОЙ**

Рассмотрена методология системного подхода к разработке физико-химической системы на основе псевдоожигенного слоя подвижной орошаемой насадки. Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования процессов химического превращения в аппаратах с интенсивной гидродинамикой. Научная новизна состоит в создании теории управления структурой потоков в технологических аппаратах с подвижной вращающейся насадкой.

Системный подход; структура потоков; химическое превращение; псевдоожигенный слой орошаемой насадки.

V.F. Becker, I.F. Kisselman

**METHODOLOGY FOR SYSTEM ANALYSIS OF THE FLOW IN
ABSORBERS FLUIDIZED TIPS ABSTRACT**

A methodology for a systematic approach to the development of physico-chemical system based on the fluidized layer of the mobile irrigation bubble breakers is given. The relevance of the work is determined by the need to improve the processes of chemical transformations in the apparatus through the intense hydrodynamics. Scientific novelty is in the creation of a theory of management structure of flows in the technological apparatus with mobile rotating bubble breakers.

Systems approach; the structure of flows; chemical transformation; fluidized layer irrigated packing.

Объектом исследования является абсорбер с псевдоожигенной насадкой, который является высокоинтенсивным технологическим оборудованием, совмещающим в общем случае процессы химического превращения и массообмена, т.е. представляющим собой химико-технологическую систему (ХТС). Для такой системы количественная связь выходных переменных с входными, возмущающими и управляющими воздействиями представляет собой математическую модель.

Основой математической модели является гидродинамическая часть общего технологического оператора, которая характеризует поведение так называемого холодного объекта, т.е. объекта, в котором отсутствуют физико-химические пре-