

УДК 621.3.019.3

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

**Белый Вячеслав Сергеевич**

доцент, к.т.н.

el.belaya2015@yandex.ru

**Бабаев Джамиль Джониевич**

доцент, к.т.н.

docent1970mei@gmail.com

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Кафедра физики им. В.А. Фабриканта

### Аннотация

В данной научной статье предлагается вариант технического диагностирования охваченного отрицательной обратной связью усилителя системы накачки газового лазера методом обобщённого диагностического параметра.

**Ключевые слова:** обобщённый диагностический параметр, газовый лазер, система накачки, усилитель с отрицательной обратной связью, техническое состояние, управляемость и наблюдаемость систем, функционально-динамическая модель.

## FEATURES OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF AN AMPLIFIER WITH NEGATIVE FEEDBACK

**Vyacheslav S. Bely**

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

el.belaya2015@yandex.ru

**Jamil D. Babaev**

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

docent1970mei@gmail.com

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Departments of Physics named after V.A. Fabrikant

### ABSTRACT

In this scientific article, a variant of technical diagnostics of a gas laser pump system amplifier covered by negative feedback is proposed by the generalized diagnostic parameter method.

**Keywords:** generalized diagnostic parameter, gas laser, pumping system, negative feedback amplifier, technical condition, controllability and observability of systems, functional-dynamic model.

**Введение.** Анализ результатов применения средств контроля и диагностирования технических объектов позволяет выявить много факторов, снижающих эффективность их эксплуатации в целом. В последовательном и комбинационном методах диагностирования с увеличением полноты и глубины контроля количество  $n$  измеряемых параметров объектов диагностирования (ОД)  $Y_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  увеличивается. С увеличением числа параметров  $n$  требуется проведение большего количества измерений. Кроме того, снижается методическая достоверность диагностирования.

Непрерывное развитие электроники приводит к возрастанию количества систем, имеющих структуру, включающую в себя перекрёстные и обратные связи. Применение последовательного и комбинационного методов диагностирования таких систем становится малоэффективным [1,2].

Один из вариантов разрешения проблемы заключается в использовании обобщённого диагностического параметра (ОДП), под которым понимается векторный сигнал, содержащий стимулирующие и измеряемые компоненты, определяемые вид технического состояния (ТС) элементов структурных схем ОД.

В данной научной статье раскрывается сущность и содержание процессов диагностирования ТС стационарной линейной системы на примере усилителя системы накачки газового лазера ОДП-методом.

**Постановка задачи.** ОДП-метод основан на основных понятиях теории идентификации, в частности, управляемости и наблюдаемости стационарных линейных систем, состоящих из  $n$ -го количества элементов.

Система является управляемой, если из начального состояния  $Y_0$  она может быть переведена в любое другое состояние  $Y_1$  за конечный интервал времени  $\Delta t = t_1 - t_0$  воздействия на неё вектора входных сигналов  $X(t) = (X_1(t) \dots X_n(t))$ . Если система управляема, в ней отсутствуют изолированные от внешних воздействий  $X_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , элементы её структуры.

Система является наблюдаемой на интервале времени  $(t_0, t_1)$ , если значения её технических параметров  $Y(t)$ ,  $t \in (t_0, t_1)$ , можно определить по измеренным значениям координат вектора  $Z(t) = (Z_1(t) \dots Z_n(t))$  на этом же временном интервале.

Сущность ОДП-метода заключается в минимизации количества координат  $Y_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , которые подлежат измерению для обеспечения возможности определения ТС системы [3,4,5].

Формально считается, что любая состоящая из  $n$  элементов управляемая и наблюдаемая система, удовлетворяет критериям управляемости

$$\text{rank}[B] = n \quad (1)$$

и наблюдаемости

$$\text{rank}[H^T] = n. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) символы  $B$  и  $H^T$  представляют собой матрицы управления системой и измерения её параметров. Обе матрицы имеют размерность  $n \times n$ .

При наличии информации о структуре системы требуется определить матрицы  $B$  и  $H$  минимального ранга

$$B = \min_{\{k\}}(\text{rank}[B_k]),$$

$$H = \min_{\{m\}}(\text{rank}[H_m]),$$

определяющие минимальное число входных (стимулирующих) сигналов  $X_i$  и выходных (наблюдаемых) откликов  $Y_i$  системы.

Алгоритм определения вектора ОДП основан на проверке критериев управляемости и наблюдаемости стационарных линейных систем, охваченных обратными связями. Исходными данными для решения поставленной задачи является изображённая на рисунке 1 структурная схема усилительного устройства, ТС которого подлежит определению и классификации.

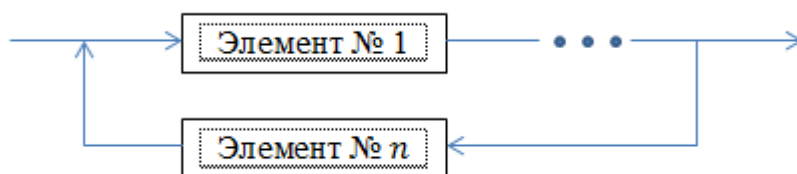


Рисунок 1 – Структурная схема объекта диагноза

Требуется определить вектор ОДП, структура которого содержит информацию о минимальном наборе стимулирующих и наблюдаемых сигналов, позволяющих однозначно определить и классифицировать вид ТС ОД.

Отработка рациональной процедуры определения технического состояния конкретной системы методом ОДП требует выполнения следующих этапов:

изучение структурной или функциональной схемы стационарной линейной системы и определения функциональных связей между её элементами.

построение диагностической модели, адекватно отображающей все возможные состояния исследуемой системы.

проведение анализа диагностической модели с целью выбора оптимальной совокупности диагностических параметров и системы диагностирования.

Структура алгоритма включает в себя следующую последовательность действий:

1. На основании анализа структурной схемы стационарной линейной системы строится её функционально-динамическая модель (ФДМ) с известными передаточными функциями элементов и известными входными (стимулирующими) сигналами и выходными (наблюдаемыми) откликами (рисунок 2).

Особенности построения ФДМ:

каждый элемент системы описывается передаточной функцией;

между элементами системы существуют только однонаправленные связи;

нелинейные элементы системы линеаризуются.

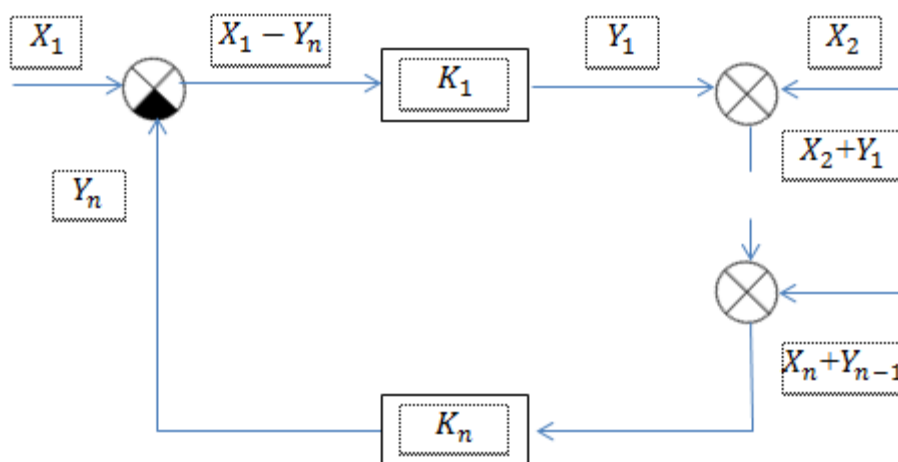


Рисунок 2. Функционально-динамическая модель

2. Далее ФДМ системы описывается линейными дифференциальными уравнениями первого порядка вида:

$$\begin{cases} \frac{dY(t)}{dt} = A \cdot Y(t) + B \cdot X(t) \\ Z(t) = H \cdot Y(t) \end{cases} \quad (3)$$

В системе уравнений (3):

$Y(t) = (Y_1(t) \dots Y_n(t))^T$  – вектор наблюдаемых откликов ОД;

$X(t) = (X_1(t) \dots X_n(t))^T$  – вектор стимулирующих сигналов ОД;

$Z(t) = (Z_1(t) \dots Z_n(t))^T$  – вектор измерения параметров ОД;

$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$  – матрица ТС ОД;

$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}$  – матрица управления ОД;

$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & \dots & h_{nn} \end{pmatrix}$  – матрица измерений параметров ОД;

$n$  – количество элементов, из которых состоит ОД.

3. Для нахождения стимулирующей части вектора ОДП отыскивается матрица  $T_X$ , которая является матрицей собственных векторов для матрицы ТС  $A$ . Информация о стимулирующей части ОДП содержится в номерах ненулевых строк матрицы  $T_X^{-1}$ , которая является обратной матрице  $T_X$ .

4. Для нахождения наблюдаемой части вектора ОДП отыскивается матрица  $T_Y$ , которая является матрицей собственных векторов для матрицы измерения  $H$ . Исходным компонентом для отыскания такой матрицы является расширенная матрица технического состояния

$$A_p = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & \Lambda \end{pmatrix}, \quad (4)$$

В (4):

$A, B$  – известные матрицы ТС и управления ОД;

$0$  – ноль-матрица;

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix},$$

где  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – собственные значения матрицы  $A$ .

Информация об измеряемой части ОДП содержится в номерах ненулевых строк матрицы  $T_Y^{-1}$ , которая является обратной по отношению к матрице  $T_Y$ .

5. При помощи выражений (5) и (6) проверяется выполнение критерия управляемости и наблюдаемости системы

$$\text{rank}[B \times [A \times B] \times [A^2 \times B] \times \dots \times [A^{n-1} \times B]] = n, \quad (5)$$

$$\text{rank}\left[H^T \times [A^T \times H^T] \times [A^{T^2} \times H^T] \times \dots \times [A^{T^{n-1}} \times H^T]\right] = n. \quad (6)$$

Пример.

Требуется найти ОДП для усилителя, охваченного обратной связью, структурная схема которого приведена на рисунке 3.

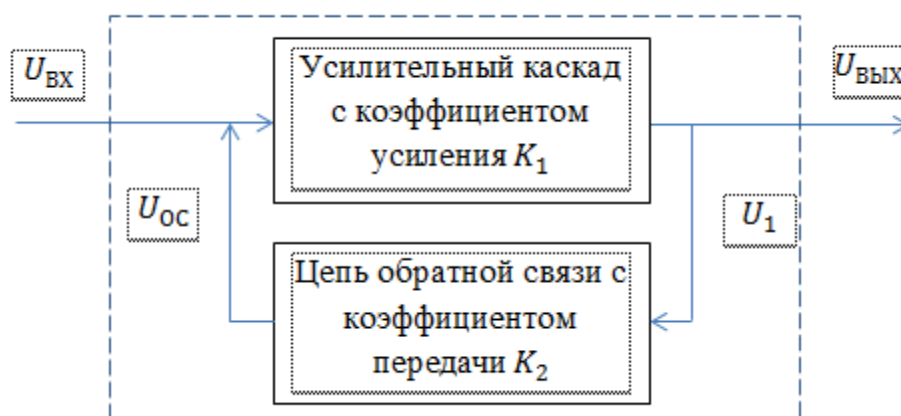


Рисунок 3 – Схема усилителя с обратной связью

На рисунке 3 обозначено:

$U_{ВХ}$ ,  $U_{ВЫХ}$  – входное и выходное напряжение усилителя;

$U_1$  – напряжение на выходе усилительного каскада;

$U_{ОС}$  – напряжение на выходе цепи обратной связи, которой охвачен усилительный каскад;

$K_1$ ,  $K_2$  – передаточные функции усилительного каскада и цепи обратной связи.

Исходными данными для решения задачи определения вектора ОДП являются:

1. Структурная схема усилителя (рисунок 3);
2. Количество элементов структурной схемы усилителя  $n = 2$ ;
3. Значения коэффициентов передачи  $K_1 = 2$ ,  $K_2 = 1$ .

Требуется определить структуру вектора ОДП, а именно минимальную совокупность стимулирующих  $X_i$ , и измеряемых  $Y_i$ ,  $i = \overline{1,2}$ , компонентов, позволяющих однозначно установить вид ТС усилителя.

В соответствии с предложенным в статье алгоритмом, последовательно выполняются все предписанные им действия.

1. На основании анализа структурной схемы усилителя строится его ФДМ. Предположим, что обратная связь, которой охвачен усилительный каскад, является отрицательной, тогда ФДМ усилителя имеет вид, показанный на рисунке 4.

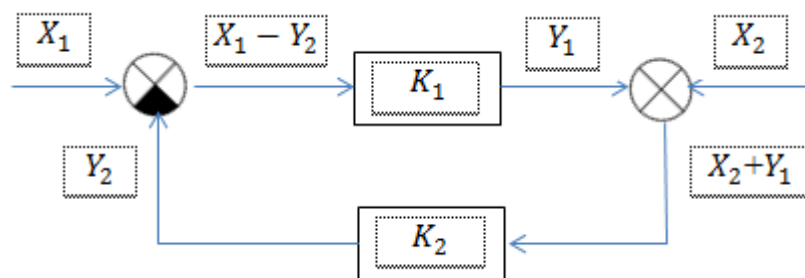


Рисунок 4 - ФДМ усилителя

2. По ФДМ усилителя отдельно для каждого её элемента производится описание взаимосвязей между выходными (измеряемыми) и входными (стимулирующими) сигналами с помощью системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dY_1(t)}{dt} = (X_1 - Y_2) \cdot K_1 \\ \frac{dY_2(t)}{dt} = (X_2 + Y_1) \cdot K_2 \end{cases}$$

После раскрытия скобок и перемены местами слагаемых правых частей уравнений, получается система уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{dY_1(t)}{dt} = -K_1 \cdot Y_2 + K_1 \cdot X_1 \\ \frac{dY_2(t)}{dt} = K_2 \cdot Y_1 + K_2 \cdot X_2 \end{cases}$$

Векторно-матричный вид такой системы уравнений

$$\begin{pmatrix} \frac{dY_1(t)}{dt} \\ \frac{dY_2(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -K_1 \\ 2 \cdot K_2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix},$$

позволяет определить структуру матриц ТС  $A$  и управления  $B$ :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -K_1 \\ 2 \cdot K_2 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix}.$$

3. При условии, что значения коэффициентов  $K_1 = 2$ ,  $K_2 = 1$ , матрицы ТС и управления принимают вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Расчёт в программной среде «Mathcad-15» показывает, что матрица  $T_X^{-1}$ , обратная матрице собственных векторов  $T_X$  матрицы  $A$ , имеет следующую структуру

$$T_X^{-1} = \begin{pmatrix} 0,7 \cdot i & -0,7 \\ -0,7 \cdot i & -0,7 \end{pmatrix},$$

а собственные значения матрицы  $A$  соответственно равны  $\lambda_1 = 2 \cdot i$ ,  $\lambda_2 = -2 \cdot i$  и представляют собой мнимые числа, в которых величина  $i = \sqrt{-1}$  является мнимой единицей.

Наличие ненулевых действительных частей значений элементов матрицы  $t_{12}$  и  $t_{22}$  показывает:

чувствительность усилительного каскада (элемента № 1) к входному воздействию  $X_2$  (стимулирующему сигналу № 2);

чувствительность цепи обратной связи (элемента № 2) к входному воздействию  $X_2$  (стимулирующему сигналу № 2).

Таким образом, оба элемента схемы усилителя чувствительны к стимулирующему воздействию  $X_2$ . Об этом также свидетельствует факт наличия ненулевого столбца № 2 в матрице  $T_X^{-1}$ .

Окончательное решение о принадлежности компонента  $X_2$  к стимулирующей части ОДП усилителя принимается после проверки выполнения критерия Гильберта в части управляемости системы

$$\text{rank} \left[ \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \left[ \begin{pmatrix} 0 & -2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \right] = 2,$$

в результате которой полностью подтверждается факт управляемости системы.

4. Расширенная матрица ТС имеет вид

$$A_p = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \cdot i & 0 \\ 0 & 0 & -0 & -2 \cdot i \end{pmatrix}.$$

Матрица  $T_Y^{-1}$ , обратная матрице собственных векторов  $T_Y$  матрицы  $A_p$ , имеет структуру вида

$$T_Y^{-1} = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.7 \cdot i & 2.1 \cdot 10^{15} \cdot i & 0.2 - 0.4 \cdot i \\ 0.7 & -0.7 \cdot i & 0.3 \cdot i & -1.6 \cdot 10^{15} \cdot i \\ 0 & 0 & -2.1 \cdot 10^{15} \cdot i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.6 \cdot 10^{15} \cdot i \end{pmatrix},$$

где наибольшее количество элементов с ненулевыми действительными частями своих значений расположено в столбце № 1. Наличие ненулевых действительных частей значений у элементов  $t_{11}$  и  $t_{21}$  показывает:

наблюдаемость состояния усилительного каскада (элемента № 1) по выходному отклику  $Y_1$  (измеряемому сигналу № 1);

наблюдаемость состояния цепи обратной связи (элемента № 2) по выходному отклику  $Y_1$  (измеряемому сигналу № 1).

Таким образом, ТС обоих элементов схемы усилителя наблюдаемо по результатам анализа значений параметров измеряемого отклика  $Y_1$ .

Для матрицы измерений вида

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где элементы  $h_{ij} = 1$ , если  $i = j$  или  $h_{ij} = 0$  в противном случае,

$$\text{rank} \left[ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^T \times \left[ \begin{pmatrix} 0 & -2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^T \right] \right] = 2.$$

5. Поскольку выполняются критерии управляемости и наблюдаемости системы, окончательно становится известна структура искомого вектора  $(X_2 \ Y_1)$ , который является ОДП для исследуемого усилителя.

#### Вывод:

Таким образом, ОДП-метод применим для решения задачи диагностирования стационарных линейных систем, построенных по схемам, включающим в себя перекрёстные и обратные связи. Приведённый в статье пример решения задачи показывает работоспособность алгоритма диагностирования стационарных линейных систем ОДП-методом. По мнению автора, при определённых условиях, данный метод может быть использован не только для диагностирования электронных устройств, но и для диагностирования механических систем.

#### Список литературы:

1. Белый, В.С. Основы эксплуатации авиационных радиоэлектронных комплексов: учебное пособие / В.С. Белый; СВВАИУ (ВИ). – Ставрополь: СВВАИУ (ВИ), 2005. – 177 с.

2. Белый, В.С. К вопросу о синтезе смешанной системы эксплуатации технического объекта / В.С. Белый В.С., А.Б. Кузьмин, В.Ю. Шишкин. // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2002. – № 35. – с. 24.
3. Белый, В.С. Исследование водопоглощения пенополимерминеральной изоляции на трубе в условиях затопления. / В.С. Белый, А.М. Мишина. // Коммунальный комплекс России. – 2018. – № 3. – С. 80.
4. Белый, В.С. Оценка возможностей сокращения объёма испытаний пенополимерминеральной изоляции труб на предмет исходного влагосодержания. / В.С. Белый, С.В. Брыль, А.М. Мишина, М.С. Зверьков. // Экология и строительство. – 2018. – № 2. – С. 35-43.
5. Белый, В.С. Применение рядов Фурье для прогнозирования технического состояния здания. / В.С. Белый, Н.Н. Адамушко. // Экология и строительство. – 2015. – №1. – С. 11-14.

#### References:

1. Bely, V.S. Fundamentals of the operation of aviation radio–electronic complexes: textbook / V.S. Bely; SVVAIU (VI). - Stavropol: SVVAIU (VI), 2005. – 177 p. (rus)
2. Bely, V.S. On the issue of synthesis of a mixed system of operation of a technical object / V.S. Bely, V.S., A.B. Kuzmin, V.Yu. Shishkin. // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. - 2002. – No. 35. – p. 24. (rus)
3. Bely, V.S. Investigation of water absorption of foam polymer–mineral insulation on a pipe under flooding conditions. / V.S. Bely, A.M. Mishina. // Municipal complex of Russia. – 2018. – No. 3. – p. 80. (rus)
4. Bely, V.S. Assessment of the possibilities of reducing the volume of tests of foam polymer–mineral insulation of pipes for the initial moisture content. / V.S. Bely, S.V. Bryl, A.M. Mishina, M.S. Zverkov. // Ecology and construction. – 2018. – No. 2. – Pp. 35-43. (rus)
5. Bely, V.S. Application of Fourier series to predict the technical condition of a building. / V.S. Bely, N.N. Adamushko. // Ecology and construction. – 2015. – No. 1. – Pp. 11-14. (rus)