

## **Экспериментально-теоретическое определение параметров быстродействия системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя по электромагнитным свойствам продуктов сгорания**

© Д.А. Ягодников, А.В. Рудинский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Разработана структурная схема средства аварийной защиты (САЗ) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) на основе регистрации амплитуды напряженности магнитного поля, обладающего большим быстродействием (0,01 с) по сравнению с традиционными средствами (0,04...0,05 с). Выполнено моделирование системы камера ЖРД — первичный измерительный преобразователь магнитного поля высокотемпературного потока продуктов сгорания углеводородного топлива, определено время инерционности (время быстродействия) при скачкообразном изменении давления в камере сгорания (КС) и диаметра критического сечения сопла. В результате параметрического анализа установлено, что на конечное быстродействие такой системы главным образом влияет объем КС диагностируемого двигателя, конструктивные особенности измерительного преобразователя и параметры колебательного контура. Временные особенности переходного процесса предлагаемой САЗ позволяют рекомендовать электрофизические характеристики как источник информации о работоспособности ЖРД.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, система аварийной защиты.

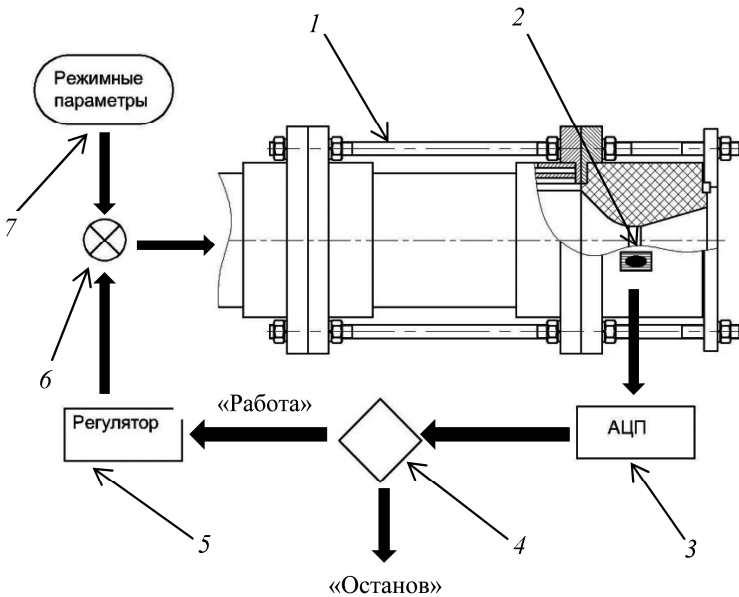
Основными показателями работы активных САЗ ЖРД, как известно, являются быстродействие, надежность и массогабаритные характеристики. Поскольку в составе системы контроля имеются первичные измерительные преобразователи параметров, усилительные и решающие устройства, то ошибки в работе могут быть следствием неправильного выбора параметров контроля и недостаточного быстродействия системы [1]. В этом случае система контроля не определяет состояние объекта. Для своевременного обнаружения аномальных явлений в работе ЖРД при стендовых испытаниях и в полете, как показывает практика, необходимо, чтобы работающая САЗ имела временные характеристики срабатывания, меньшие времени пребывания в КС (0,004 с) или близкие к нему.

Применение такой системы в составе двигателя в условиях огневых стендовых испытаний позволит сохранить материальную часть стендового оборудования и двигателя для последующего выявления дефектов, а в полете — для анализа причин отказа и невыполнения заданной программы.

Причиной зарождения дефектов в конструкции двигателя может стать, например, прогар элементов проточного тракта, который сопровождается уменьшением давления в КС. Целью настоящей работы было определение времени быстрого действия САЗ по амплитуде напряженности магнитного поля, т. е. времени формирования сигнала на первичном измерительном преобразователе магнитного поля при изменении давления в КС по заданному закону.

В качестве примера рассмотрена САЗ на основе контроля изменения напряженности магнитного поля продуктов сгорания (ПС) (рис. 1). Основными ее элементами являются диагностируемая камера 1 двигателя на углеводородном топливе, измерительный преобразователь 2 магнитного поля, осуществляющий измерение напряженности магнитного поля и передачу данных в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 3. По результатам сопоставления допустимых значений амплитуды напряженности с полученными данными в блоке сравнения 4 возможна выдача команды на останов двигателя либо на дальнейшую его работу с регулированием расхода компонентов и сравнением в блоке 6 параметров двигателя с заданными режимными параметрами (давление в КС, соотношение компонентов и др.).

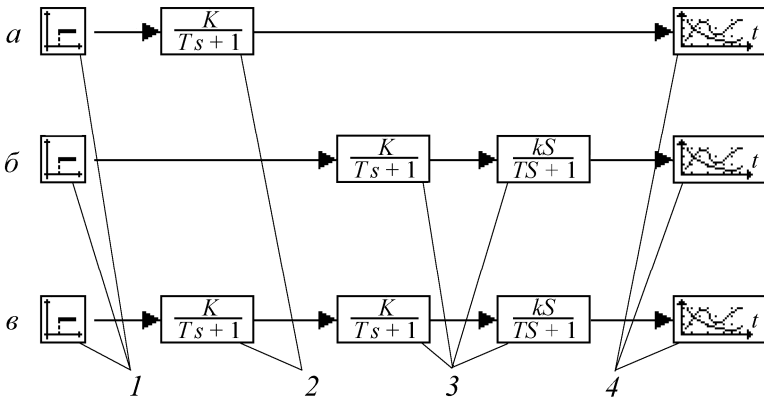
Первичный измерительный преобразователь магнитного поля представляет собой катушку индуктивности, параметры которой подобраны для измерения быстроменяющихся магнитных полей ПС.



**Рис. 1.** Функциональная схема САЗ модельного двигателя по изменению напряженности магнитного поля:

1 — камера двигателя; 2 — измерительный преобразователь магнитного поля; 3 — блок АЦП; 4 — блок сравнения; 5 — регулятор расхода компонентов; 6 — сумматор параметров; 7 — заданные параметры работы двигателя

Для корректного описания динамического процесса возникновения сигнала в измерительном преобразователе магнитного поля в результате изменения давления в камере двигателя была составлена структурная схема двигатель — измерительный преобразователь магнитного поля в программе «МВТУ 3.7» [2] (рис. 2). Схема включала в себя задающее воздействие  $I$ , которое описывалось ступенчатым законом изменения давления в камере, передаточную функцию камеры двигателя  $2$  и измерительного преобразователя магнитного поля  $3$ , временные графики  $4$ , описывающие переходные процессы в звеньях системы.



**Рис. 2.** Структурные схемы камеры двигателя (а), измерительного преобразователя магнитного поля (б), системы камера двигателя — измерительный преобразователь магнитного поля (в)

Для описания динамического процесса изменения давления в КС составлялся баланс массы [3]:

$$\frac{V_{\text{КС}}}{R_{\text{к}}T_{\text{к}}} \frac{dp_{\text{к}}(\tau)}{d\tau} = \dot{m}_{\text{ПС}} - \frac{A_{\gamma}F_{\text{кр}}}{\sqrt{R_{\text{к}}T_{\text{к}}}} p_{\text{к}}(\tau), \quad (1)$$

где  $V_{\text{КС}}$  — объем КС;  $R_{\text{к}}$  — газовая постоянная ПС;  $T_{\text{к}}$  — температура в КС;  $p_{\text{к}}$  — давление в КС;  $\dot{m}_{\text{ПС}}$  — массовый приход ПС из зоны горения;  $F_{\text{кр}}$  — площадь критического сечения;

$$A_{\gamma} = \sqrt{\gamma} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]}; \quad \gamma \text{ — показатель процесса расширения.}$$

Динамический процесс изменения электрического напряжения в измерительном преобразователе магнитного поля определяется соотношением [4]

$$U(\tau) = -\mu_{\text{к}}\mu_0 S_{\text{к}} \frac{dH(\tau)}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu_k$  — эффективная магнитная проницаемость сердечника преобразователя;  $S_k$  — суммарная площадь витков катушки преобразователя;  $H$  — напряженность собственного магнитного поля ПС.

Для анализа динамических процессов и сокращения времени расчета уравнения (1) и (2) записывали в операторной форме в виде передаточных функций для камеры двигателя и измерительного преобразователя:

$$W_{KC}(s) = \frac{K_{усKC}}{T_{KC}s + 1}; \quad (3)$$

$$W_{пмп}(s) = \frac{K_{ус.пмп}s}{T_{пмп}^2 s^2 + 2\xi T_{пмп}s + 1}, \quad (4)$$

где  $K_{усKC} = \frac{\sqrt{R_k T_k} \cdot m_{ПС}}{A_\gamma F_{кр} p_k}$ ,  $T_{KC} = \frac{p_{KC} V_{KC}}{\sqrt{R_k T_k} \cdot m_{ПС}}$  — коэффициент усиления

и постоянная времени камеры двигателя;  $K_{ус.пмп} = \frac{n S_k \mu_k R}{R + r}$ ,

$T_{пмп} = \sqrt{\frac{LCR}{R + r}}$ ,  $\xi = \frac{L + rCR}{2\sqrt{LCR(R + r)}}$  — коэффициент усиления, постоянная

времени преобразователя магнитного поля и параметр цепи;  $n$  — число витков;  $L$  — индуктивность;  $r$  — активное сопротивление катушки;  $R$  — сопротивление подводящего кабеля;  $C$  — емкость;  $s$  — дифференциальный оператор.

Для составления структурной схемы преобразователя в программе «МВТУ 3.7» передаточная функция 4 разбивалась на типовые звенья 3 (см. рис. 2).

Так как конструктивная особенность испытанного в работе [5] измерительного преобразователя не позволяла выполнить измерения параметров  $n$ ,  $L$ ,  $C$ , их подбирали согласно известным техническим характеристикам преобразователя магнитного поля:

Диапазон измерения магнитной индукции $B$ .....	0,5...5,0 мкТл
Частотный диапазон $f$ .....	0,1...10,0 кГц
Выходной сигнал $U$ .....	0,1...1,0 В

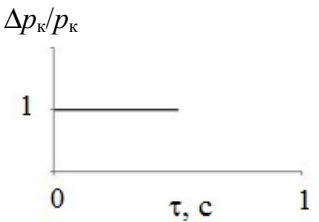
В результате проведенного анализа определены переходные характеристики измерительного преобразователя магнитного поля (рис. 3, а, б) при соответствующих начальных и граничных условиях (см. таблицу).

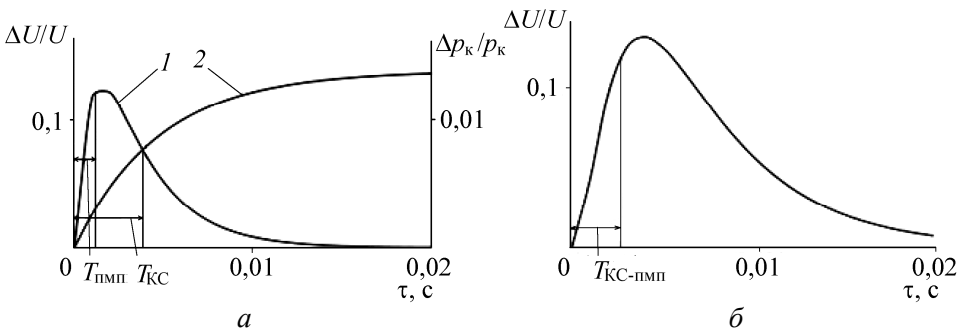
По характеру переходных процессов измерительного преобразователя магнитного поля и камеры двигателя 2 (см. рис. 3, а) оценива-

ли время, по прошествии которого соответствующие процессы можно считать установившимися. Для КС  $\tau \approx 3T_{КС} = 0,019$  с, для измерительного преобразователя  $\tau \approx 4T_{ПМП} = 0,0051$  с, для системы камера двигателя — измерительный преобразователь магнитного поля  $\tau \approx 4T_{КС-ПМП} = 0,02$  с. Из приведенных оценочных данных следует, что измерительный преобразователь магнитного поля обладает слабой инерционностью, а конечное быстродействие всей системы зависит от переходного процесса в камере двигателя.

Таблица

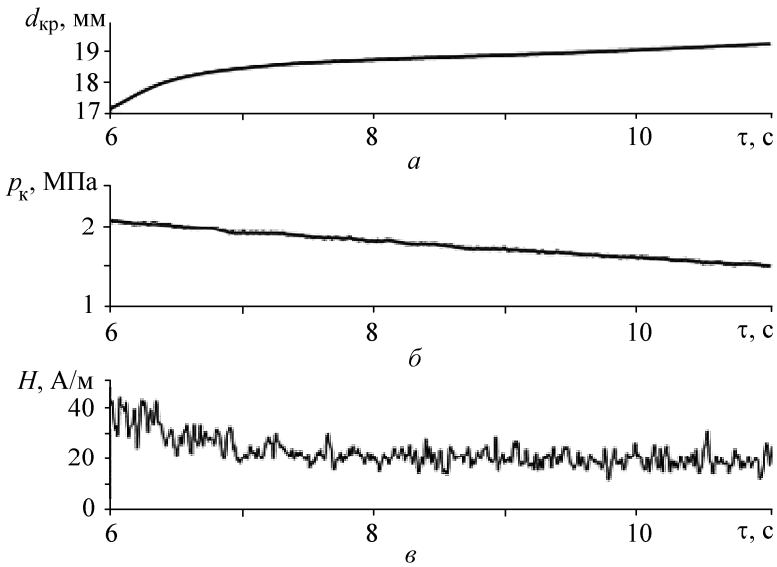
**Начальные и граничные условия**

Начальные условия	Граничные условия	
	Параметр	Значение
Входное значение давления в КС: $p_k = 1(s)$ , т. е. $\tau = 0$ , $\Delta p_k/p_k = 0$  	$V_{КС}$	$1,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
	$R_k$	449,9 Дж/(кг · К)
	$T_k$	3 569 К
	$F_{кр}$	$2,32 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
	$m_{ПС}$	0,5 кг/с
	$L$	5 мкГл
	$C$	20 пФ
	$r$	60 Ом
	$R$	200 Ом
	$n$	20
	$\mu_{к.эф}$	1



**Рис. 3.** Переходные характеристики измерительного преобразователя магнитного поля 1 и камеры двигателя 2 (а), системы камера двигателя — измерительный преобразователь магнитного поля (б)

В качестве примера в данной работе рассмотрена модельная камера ЖРД, компонентами топлива которой являются газообразный кислород и этиловый спирт (75 % по объему) [5]. Аварийную ситуа-



**Рис. 4.** Осциллограмма напряженности магнитного поля при уменьшении давления в КС в результате разгара критического сечения

цию моделировали разгаром критического сечения (рис. 4, *а*), что приводило к монотонному падению давления в КС (рис. 4, *б*) и соответственно амплитуды напряженности магнитного поля (рис. 4, *в*).

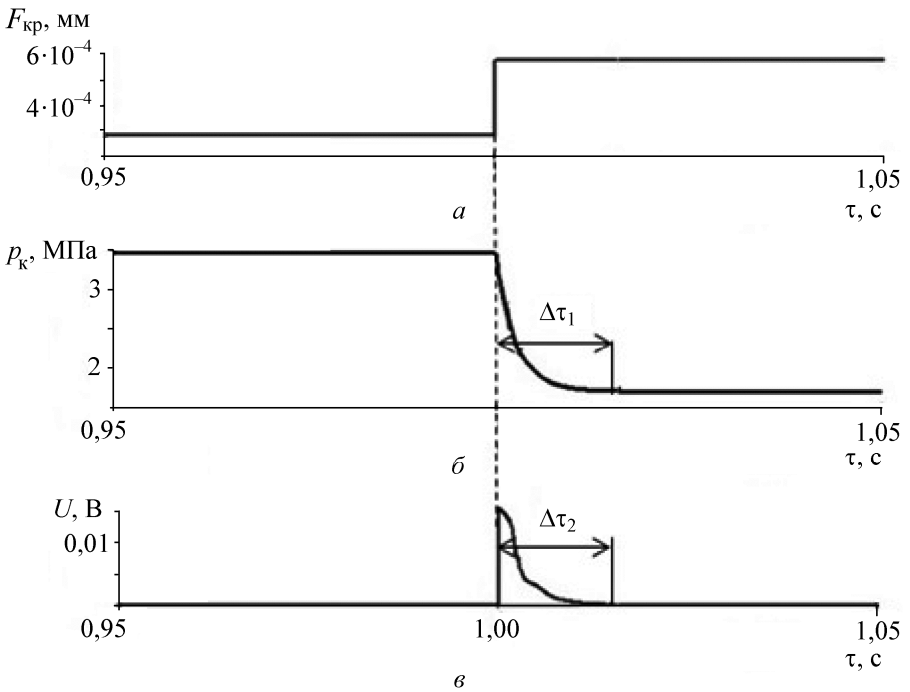
Описанный аварийный случай моделировали изменением входного воздействия в зависимости (1), где площадь критического сечения принимали как функцию, зависящую от времени:

$$\frac{V_{КС}}{R_к T_к} \frac{dp_к(\tau)}{d\tau} = \dot{m}_{ПС} - \frac{A_г F_{кр}(\tau)}{\sqrt{R_к T_к}} p_к(\tau). \quad (5)$$

Начальные условия при идентичных граничных условиях (см. таблицу) определяли путем задания ступенчатого изменения площади критического сечения согласно зависимости

$$F_{кр}(\tau) = \begin{cases} 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, & 0 \leq \tau \leq 1; \\ 0,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, & \tau > 1. \end{cases} \quad (6)$$

Изменение электрического напряжения в измерительном преобразователе магнитного поля определяли в соответствии с соотношением (2) с учетом экспериментальной зависимости амплитуды напряженности магнитного поля от давления:  $H(p_к) = 27,66p_к - 25,86$ , где  $p_к$  — в МПа;  $H$  — в А/м. Дифференциальное уравнение (5) с начальным условием (6) решали с использованием стандартных вспомогательных функций в среде Mathcad. На рис. 5 представлено



**Рис. 5.** Изменение давления (*б*) и электрического напряжения (*в*) в измерительном преобразователе магнитного поля при ступенчатом увеличении площади критического сечения двигателя (*а*)

изменение давления и электрического напряжения в измерительном преобразователе магнитного поля при ступенчатом увеличении площади критического сечения двигателя.

Из графиков на рис. 5 можно заключить, что ступенчатое увеличение площади критического сечения (рис. 5, *а*) вызывает монотонное падение давления в КС за время  $\Delta\tau_1 = 0,0142$  с (рис. 5, *б*). Длительность переходного процесса в измерительном преобразователе магнитного поля составляет  $\Delta\tau_2 = 0,0176$  с (рис. 5, *в*), что также свидетельствует о слабой инерционности последнего при мгновенном изменении площади критического сечения.

Таким образом, описанная система аварийной защиты на основе контроля напряженности магнитного поля обладает бóльшим быстродействием по сравнению с традиционными средствами благодаря применению в качестве первичного источника информации измерительного преобразователя магнитного поля, обладающего слабой инерционностью, что, в свою очередь, уменьшает инерционность всей системы и повышает ее эффективность.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волков Е.Б., Судаков Р.С., Сырицын Т.А. *Основы теории надежности ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1974, 400 с.
- [2] Козлов О.С., Кондаков Д.Е., Скворцов Л.М. и др. *Инструкция пользователя программным комплексом «Моделирование в технических устройствах» (ПК «МВТУ 3.7). Техн. отчет*. Москва, 2005, 187 с.
- [3] Волков Е.Б., Сырицын Т.А., Мазинг Г.Ю. *Статика и динамика ракетных двигательных установок. Кн. II: Динамика*. Москва, Машиностроение, 1978, 320 с.
- [4] Панин В.В., Степанов Б.М. *Практическая магнитометрия*. Москва, Машиностроение, 1978, 112 с.
- [5] Ягодников Д.А., Бобров А.Н., Филимонов Л.А. Экспериментально-теоретическое исследование и разработка электрофизических методов контроля и диагностики ЖРД. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 3, с. 67–78.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ягодников Д.А., Рудинский А.В. Экспериментально-теоретическое определение параметров быстрого действия системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя по электромагнитным свойствам продуктов сгорания. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/706.html>

**Ягодников Дмитрий Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

**Рудинский Александр Викторович** — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (кафедра «Ракетные двигатели»). e-mail: [pan-starosta@yandex.ru](mailto:pan-starosta@yandex.ru)