

УДК 534.014.4, 537.862

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УПРУГОЙ НАГРУЗКОЙ С ПРОЦЕССОМ ЗАРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

*И.П. Попов**Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Попов И.П., 2026

Аннотация. Электромеханические преобразователи могут иметь различный характер реактивности в зависимости от вида их механической нагрузки. Целью работы является установление характера переходного процесса при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения. Рассмотрены прямой и обратный пьезоэффекты, на которых основана работа преобразователя. При подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения происходит переходный процесс, неотличимый от процесса зарядки конденсатора. Полученные результаты могут быть использованы при разработке автоматизированных систем.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, переходный процесс, упругая нагрузка, постоянное напряжение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-64-68

ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические преобразователи могут иметь различный характер реактивности в зависимости от вида их механической нагрузки [1–5].

Целью работы является установление характера переходного процесса при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения (рис. 1).

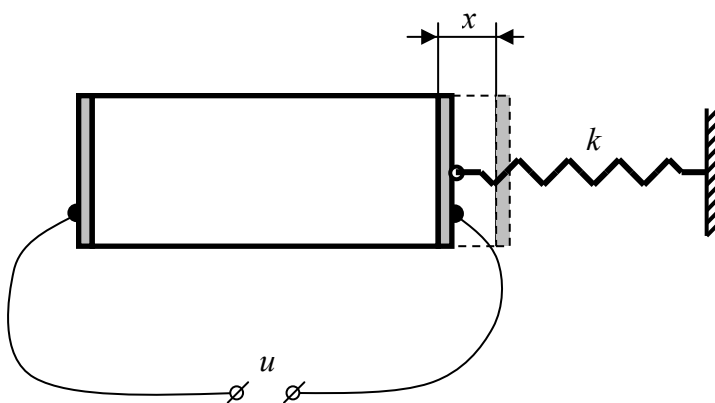


Рис. 1. Пьезоэлектрический преобразователь с упругой нагрузкой

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа преобразователя основана на прямом и обратном пьезоэффектах. Прямой пьезоэффект проявляется в том, что на обкладках пьезоэлемента при его деформации x появляется электрический заряд q [6–8]:

$$q = d_1 x,$$

где d_1 – пьезомодуль. Обратный пьезоэффект заключается в том, что при подаче на обкладки напряжения u пьезоэлемент деформируется и развивает усилие F [9, 10]:

$$F = d_2 u.$$

Пусть активное сопротивление $R \neq 0$ и коэффициент трения $b \neq 0$, начальные условия $x(0) = x_0$.

Уравнение механического равновесия запишется в виде

$$d_2 u_{\text{п}} = kx + b \frac{dx}{dt}. \quad (1)$$

Баланс напряжений в соответствии со вторым законом Кирхгофа с учетом (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} U = u_{\text{п}} + Ri &= \frac{k}{d_2} x + \frac{b}{d_2} \frac{dx}{dt} + Rd_1 \frac{dx}{dt}, \\ \frac{dx}{dt} + \frac{k}{b + Rd_1 d_2} x &= \frac{Ud_2}{b + Rd_1 d_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение дифференциального уравнения (2) ищется в виде

$$x = x_1 + x_2,$$

где

$$\begin{aligned} x_1 &= C_1 e^{-\frac{k}{b+Rd_2}t}, \\ x_2 &= C_2. \end{aligned}$$

При подстановке x_2 в выражение (2) получим:

$$0 + \frac{k}{b + Rd_2} C_2 = \frac{Ud_2}{b + Rd_2},$$

$$C_2 = \frac{Ud_2}{k},$$

$$x = C_1 e^{-\frac{k}{b+Rz}t} + \frac{Ud_2}{k},$$

$$C_1 = x_0 - \frac{Ud_2}{k},$$

$$x = \left(x_0 - \frac{Ud_2}{k} \right) e^{-\frac{k}{b+Rz}t} + \frac{Ud_2}{k}.$$

Производная последнего выражения

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{i}{d_1} = \left(\frac{Ud_2}{b+Rz} - \frac{x_0 k}{b+Rz} \right) e^{-\frac{t}{z/k(b/z+R)}} = \\ &= \left(\frac{Ud_2}{b+Rz} - \frac{d_2 x_0 k / d_2}{b+Rz} \right) e^{-\frac{t}{C_k(R_b+R)}}, \\ i &= \left(\frac{U}{b/z+R} - \frac{kx_0/d_2}{b/z+R} \right) e^{-t/\tau} = \\ &= \frac{U-U_0}{R_b+R} e^{-t/\tau}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь фрикционное сопротивление R_b и постоянная времени электрической цепи τ определяются по формулам:

$$R_b = \frac{b}{z},$$

$$\tau = C_k (R_b + R) = \frac{b+Rz}{k}.$$

Характер протекания тока идентичен процессу зарядки конденсатора при включении источника постоянного напряжения. Решению (3) соответствует электрическая схема пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой, представленная на рис. 2.

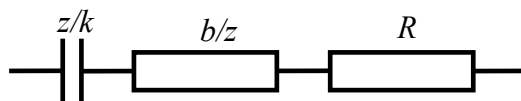


Рис. 2. Электрическая схема пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой

При $U = 0$ режим аналогичен процессу разряда конденсатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения происходит переходный процесс, аналогичный процессу зарядки конденсатора.

Полученные результаты могут использоваться при разработке автоматизированных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
2. Безденежных В.И. Мгновенное значение момента, развиваемого синхронным генератором при индуктивной и емкостной нагрузке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 2 (26). С. 36–39. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-36-39
3. Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 58–63. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-58-63
4. Павлов В.Д. Электромеханический аккумулятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 47–53. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-47-53
5. Попов И.П. Влияние сети на реактивную мощность // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 55–60. DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-55-60
6. Попов И.П. Полный учет энергии электростатического поля заряженных сфер // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 1 (21). С. 45–56. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-45-56
7. Попов И.П. Расчет полной энергии электростатического поля // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2020. Т. 2. № 392. С. 107–114. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-107-114
8. Попов И.П. Запасаемая электростатическая энергия // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 33. С. 195–210. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.12
9. Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-62-69

10. Попов И.П. Применение методов классической механики к электрическим зарядам // *Труды МАИ*. 2021. № 119. URL: <http://mai.ru/> (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.34759/trd-2021-119-01

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Сопоставление переходного процесса в цепи пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой с процессом зарядки конденсатора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 64–68.

COMPARISON OF TRANSIENT PROCESS IN PIEZOELECTRIC CONVERTER CIRCUIT WITH ELASTIC LOAD WITH CAPACITOR CHARGING PROCESS

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. Electromechanical converters can have different types of reactance depending on the type of their mechanical load. The purpose of this work is to determine the nature of the transient process when a piezoelectric converter with an elastic load is connected to a constant voltage source. The direct and reverse piezoelectric effects, which are the basis for the converter's operation, are considered. When a piezoelectric converter with an elastic load is connected to a constant voltage source, a transient process occurs that is indistinguishable from the charging process of a capacitor. The results obtained can be used in the development of automated systems.

Keywords: electromechanical converters can have different reactivity depending on the type of their mechanical load. piezoelectric transducer, transient, elastic load, *DC* voltage.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja St., Kurgan, 640020, Russia. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Comparison of transient process in piezoelectric converter circuit with elastic load with capacitor charging process // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 64–68.