

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННОГО МОДУЛЯТОРА ДАТЧИКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Н.М. Пушкин¹, К.В. Лакшин¹, А.С. Новичков²

¹АО «НПО измерительной техники», 141074, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 2

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

npoit@npoit.ru

Выполнен анализ динамических характеристик вибрационного модулятора датчика электростатического поля «Зонд-3М». Приведены данные о конструкции датчика и его вибрационном модуляторе. Выполнен анализ амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик модулятора. Выявлена нелинейная зависимость частоты вынужденных колебаний модулятора от его амплитуды при амплитуде колебаний более 1 мм. Такая зависимость обусловлена наличием в конструкции модулятора нелинейного элемента — плоской упругой пластины. Использован метод гармонического баланса, найдено уравнение «скелетной кривой» амплитудно-частотной зависимости колебаний в районе резонансной частоты. Приведены уравнения, описывающие амплитуду силы тока в катушке возбуждения. Определены основные условия для разработки системы автоматической подстройки и стабилизации амплитуды и частоты колебаний вибрационного модулятора.

Ключевые слова: датчик электростатического поля, вибрационный модулятор, амплитудно-частотная характеристика

Ссылка для цитирования: Пушкин Н.М., Лакшин К.В., Новичков А.С. Исследование динамических характеристик вибрационного модулятора датчика электростатического поля // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 94–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-94-100

Датчики электростатического поля используются при контроле процессов электризации летательных аппаратов. Одним из основных элементов датчиков электростатического поля являются вибрационный модулятор. Вибрационный модулятор осуществляет модуляцию напряженности электростатического поля в районе чувствительного элемента датчика. Вследствие этого измерение и преобразование электростатического поля осуществляются на переменном напряжении, что существенно снижает погрешность измерения. Вибрационный модулятор представляет собой сложную электромеханическую и электромагнитную систему, обеспечение стабильных эксплуатационных характеристик которой — достаточно сложная задача. Решение данной задачи во многом определяется динамическими характеристиками вибрационного модулятора. Анализ динамических характеристик вибрационного модулятора датчика электростатического поля «Зонда-3М» посвящена данная работа.

Объекты и методы исследования

В датчике электростатического поля «Зонд-3М БЫ2.714.003-01» [1, 2] для модулирования напряженности электрического поля в районе чувствительного элемента применяется механический модулятор вибрационного типа. Схема конструкции датчика приведена на рис. 1.

Измерительный электрод 1 выполнен неподвижным. Модуляция поля E осуществляется механическим модулятором 3, совершающим

колебания с амплитудой Z_0 относительно оси пружины 4.

Индукцированный электрическим полем E заряд усиливается с помощью предусилителя 2.

Механический модулятор представляет собой удлиненную пластину из ферромагнитного материала. В корпусе измерителя 7 пластина укреплена с помощью плоской пружины таким

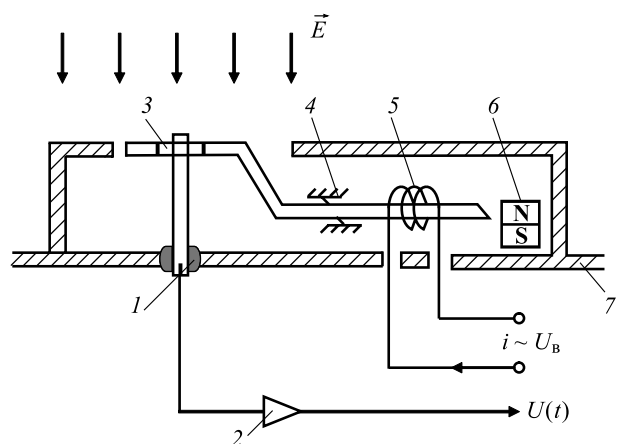


Рис. 1. Конструкция датчика электростатического поля вибрационного типа: 1 — измерительный электрод; 2 — пружина; 3 — механический модулятор; 4 — плоская пружина; 5 — обмотка генератора; 6 — постоянный магнит; 7 — корпус датчика

Fig. 1. Construction of a vibration-type electrostatic field sensor: 1 — measuring electrode; 2 — a spring; 3 — mechanical modulator; 4 — flat spring; 5 — generator winding; 6 — permanent magnet; 7 — sensor body

образом, что ось пружины и ось пластины взаимно перпендикулярны. Ось пружины проходит через центр тяжести пластины модулятора. Такое взаимное расположение осей пружины и пластины модулятора обеспечивают устойчивость при воздействии вибрационных и ударных нагрузок. В районе одного из концов пластины установлен постоянный магнит *b*.

Протекание тока *i* по обмотке *5* приводит к намагничиванию пластины модулятора. При этом конец пластины, находящийся вблизи магнита, попеременно притягивается то к одному, то к другому его полюсу. Второй конец пластины при этом совершает колебания (вибрирует) относительно оси пружины с амплитудой *Z*.

Проведем анализ динамических характеристик данного вибрационного модулятора. Упрощенная схема задающего генератора, вырабатывающего переменное напряжение $\sim U_B$ для питания обмотки, представлена на рис. 2.

Варьируя параметры генератора, можно обеспечить механические колебания модулятора на различной частоте. Таким образом, колебательное движение пластины модулятора осуществляет-

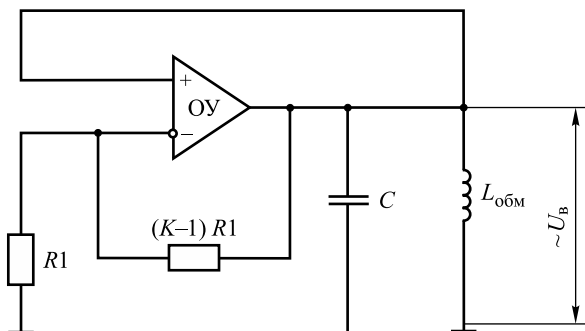


Рис. 2. Упрощенная схема вибрационного генератора датчика электростатического поля: $L_{обм}$ — индуктивность обмотки модулятора; ОУ — операционный усилитель; K — коэффициент передачи операционного усилителя

Fig. 2. Simplified scheme of the vibration generator of the electrostatic field sensor: $L_{обм}$ — inductance of the modulator winding; ОУ — operational amplifier; K — transmission factor of the operational amplifier

ся за счет действия на него электромагнитной возбуждающей силы F_3 , которая изменяется по гармоническому закону. Дифференциальное уравнение движения модулятора можно записать в виде [3]

$$\frac{\partial Z^2}{\partial t} + 2x \frac{\partial Z}{\partial t} + \omega_0^2 Z = \frac{F_3}{G} \sin(\omega_B t).$$

Здесь $x = \frac{1}{2} \frac{\eta}{G}$, где

η — сила сопротивления движения при единичной скорости;

G — масса пластины модулятора;
 $\omega_0 = \sqrt{\xi / G}$ (ω_0 — частота собственных колебаний модулятора; ξ — коэффициент упругости пружины).

Амплитуда колебаний модулятора Z и фаза ψ определяются соотношениями [4]

$$Z = \frac{F_3 / G}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_B^2) - 4x^2 \omega_B^2}};$$

$$\psi = -\arctg\left(\frac{2x \omega_B}{\omega_0^2 - \omega_B^2}\right).$$

Амплитудная и фазочастотная характеристики модулятора приведены на рис. 3.

Анализируя амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) модулятора, можно заключить, что в зависимости от соотношений собственной резонансной частоты ω_0 и частоты возбуждающей силы ω_B можно различить два режима работы: нерезонансный и резонансный.

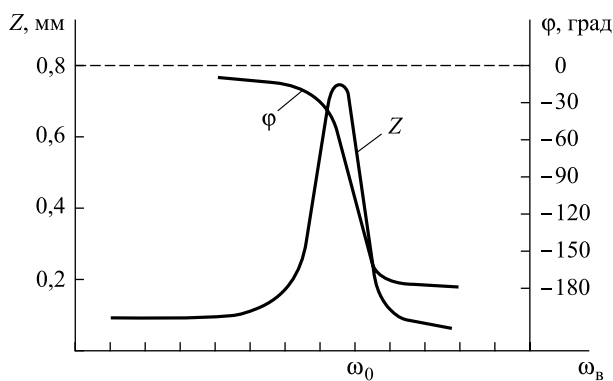


Рис. 3. Амплитудная и фазочастотная характеристики модулятора датчика поля
Fig. 3. Amplitude and phase frequency characteristics of the field sensor modulator

Зависимости амплитуды Z_0 и фазы ψ модулятора от изменения частоты ω_0 напряжения возбуждения стабильны по амплитуде при нерезонансном режиме работы. Выбирая частоту возбуждения ω_B в 4,5–5,0 раз ниже резонансной частоты ω_0 модулятора, можно получить датчик, чувствительность которого практически не зависит от изменения частоты возбуждения.

Однако нерезонансный режим работы модулятора не позволяет обеспечить амплитуду его колебаний более 0,1 мм, что обуславливает низкую чувствительность датчика в целом.

Если выбрать частоту ω_B возбуждения равной частоте резонанса модулятора (резонансный режим), то, используя высокую добротность механической системы, можно обеспечить большую амплитуду колебаний модулятора ($Z_0 = 0,3 \dots 1,5$ мм) и получить высокочувствительный, экономичный датчик электростатического поля.

Амплитуда колебаний модулятора определяется величиной напряжения возбуждения задающего генератора.

Экспериментально полученные АЧХ модулятора для различных значений напряжения возбуждения приведены на рис. 4.

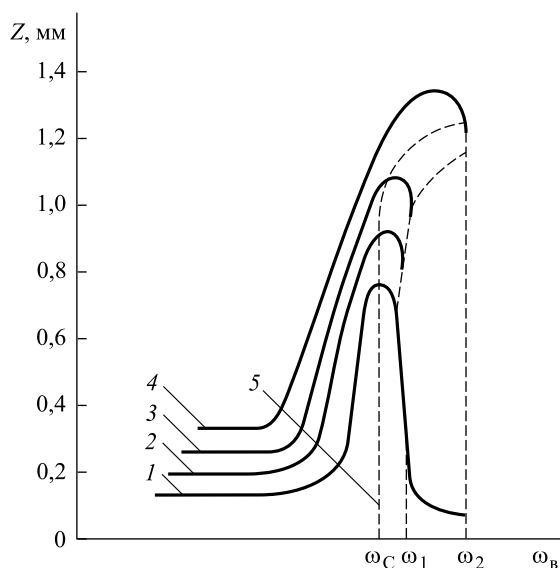


Рис. 4. Экспериментальные АЧХ модулятора датчика поля: 1 — $U_{в1}$; 2 — $U_{в1} > U_{в2}$; 3 — $U_{в2} > U_{в1}$; 4 — $U_{в3} > U_{в2}$; 5 — $\omega_1^2 = \omega_0^2 (1 + 0,75\beta Z_0^2)$

Fig. 4. Experimental frequency response of the field sensor modulator: 1 — $U_{в1}$; 2 — $U_{в1} > U_{в2}$; 3 — $U_{в2} > U_{в1}$; 4 — $U_{в3} > U_{в2}$; 5 — $\omega_1^2 = \omega_0^2 (1 + 0,75\beta Z_0^2)$

Анализ приведенных характеристик позволяет заключить, что в датчике наблюдается нелинейная зависимость частоты вынужденных колебаний модулятора от его амплитуды при $Z_0 \geq 1$ мм. Такая зависимость обусловлена наличием в системе модулятора нелинейного элемента – плоской упругой пружины.

Резонансная частота ω_0 механического модулятора в значительной мере зависит от условий окружающей среды, в частности от температуры. На рис. 5 представлены АЧХ модулятора, полученные при разных значениях температуры окружающей среды.

Для снижения температурной погрешности измерителя, обусловленной изменением амплитуды колебаний резонансного модулятора, необходимо обеспечить стабильность амплитуды при изменении температуры окружающей среды.

Существенной особенностью АЧХ модулятора (при $Z_0 \geq 1$ мм) является возбуждение в диапазоне от ω_1 до ω_2 (см. рис. 4). Точное определение частоты колебаний модулятора с учетом нелинейности пружины затруднительно. Однако, используя метод гармонического баланса, как показано в [5], можно получить приближенное уравнение «ске-

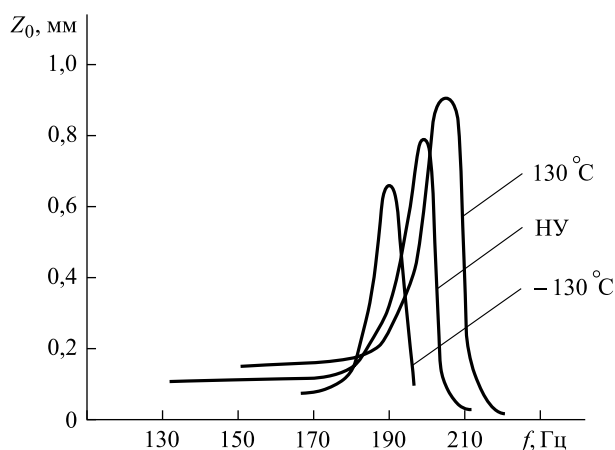


Рис. 5. Изменение АЧХ модулятора при воздействии температуры в диапазоне $-130...+130$ °С: НУ — нормальные условия

Fig. 5. Modification of the frequency response of the modulator when exposed to a temperature in the range of $-130...+130$ °С

летной кривой» для таких механических систем, отражающее зависимость частоты ω_c колебаний модулятора от амплитуды Z_0 в виде:

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 (1 + 0,75\beta Z_0^2),$$

где β — коэффициент, характеризующий нелинейную восстанавливающую силу пружины.

Учитывая отмеченные особенности АЧХ, можно заключить, что для обеспечения устойчивых колебаний модулятора в резонансном режиме с большими амплитудами частоту напряжения возбуждения ω_b следует выбирать из условия (рис. 4):

$$\omega_c \leq \omega_b < \omega_1.$$

Для сохранения стабильной амплитуды колебаний резонансного модулятора необходимо обеспечить не только неизменность тока в обмотке катушки возбуждения, но и постоянную автоматическую подстройку генератора на частоту механического резонанса при условии постоянства амплитуды колебаний.

Система возбуждения совместно с модулятором (см. рис. 1 и 2) относится к типу связанных электромеханических систем и описывается системой уравнений [2]

$$\left. \begin{aligned} G \frac{dZ^2}{dt} + \eta \frac{dZ}{dt} + C_M Z - \mu_M i &= 0; \\ L_K \frac{di}{dt} + R_K i + \mu \frac{dZ}{dt} &= U_B \cos \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где G, C_M — масса модулятора и жесткость пружины;

$Z(t)$ — амплитуда перемещения модулятора;
 $i(t), U_B(t)$ — ток и напряжение в катушке возбуждения;

η — коэффициент демпфирования;

μ_M — электромеханический коэффициент;

L_K, R_K — индуктивность и сопротивление обмотки катушки возбуждения.

Данную модель можно привести к эквивалентной электрической схеме путем введения активного и реактивного сопротивлений:

$$L_K \frac{di}{dt} + (R_K + R_M) i + \frac{1}{C_\Sigma} \int i dt = U_B \cos \omega t, \quad (2)$$

где

$$R_M = \frac{\mu_M^2 \eta \omega}{(C_M + G\omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2}; \quad C_\Sigma = \frac{(C_M + G\omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2}{\mu_M^2 (G\omega^2 + C_M) \omega^2}.$$

Решая уравнения (1) и (2), можно найти амплитуду перемещения модулятора и амплитуду тока (J_0) в обмотке катушки возбуждения:

$$Z_0 = \frac{\mu J_0}{\sqrt{(C_M - G\omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2}};$$

$$J_0 = \frac{U_B}{\sqrt{(R_K + R_M)^2 + (\omega L_K - 1/\omega C_\Sigma)^2}}.$$

Полагая, что в системе отсутствует демпфирование, выражение для амплитуды тока в обмотке приведем к виду

$$J_0 = \frac{U_B}{\sqrt{R_K^2 + \omega^2 (L_K + \mu_M / (C_M - G\omega^2))^4}}.$$

Отсюда следует, что на частотах $\omega_0^i = [(C_M + \mu_M^2 L_K^{-1}) / G]^{1/2}$ и в окрестности частоты электромеханического резонанса модулятора $\omega_0 = \omega_M = \sqrt{C_M / G}$ имеет место минимум амплитуды колебаний тока.

Представляя решения уравнений (1) и (2) в виде $i(t) = J_0 \cos(\omega t + \omega_1)$ и $Z(t) = Z_0 \cos(\omega t + \omega_2)$, получаем фазочастотные характеристики данной электромеханической системы возбуждения:

$$\cos \psi_1 = [R_K + R_M(\omega)] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}^{-1/2};$$

$$\sin \psi_1 = \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}^{-1/2};$$

$$\cos \psi_2 = \frac{[R_K + R_M(\omega)](C_M + G\omega^2) - \eta \omega \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]}{\sqrt{[(C_M + G\omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}}};$$

$$\sin \psi_2 = \frac{\left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right] (C_M + G\omega^2) + \eta \omega [R_K + R_M(\omega)]}{\sqrt{[(C_M + G\omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}}}.$$

Результаты исследования

На рис. 6 и 7 приведены графические результаты расчета параметров колебаний модулятора датчика (см. рис. 1), обладающего частотой механического резонанса $f_M = 200$ Гц.

Механические колебания модулятора могут оказывать влияние на электрическую цепь системы возбуждения. При этом наблюдается изменение величины тока в обмотке катушки возбуждения L_K . Физически это явление объясняется тем, что в области механического резонанса резко

нарастает амплитуда механических колебаний модулятора в магнитном поле постоянного магнита (см. рис. 4). Наводимая при этом в обмотке катушки ЭДС, прикладываясь встречно к напряжению возбуждения U_B , и сила тока, протекающего через обмотку катушки, падает. Это свойство электромеханической цепи — наведение ЭДС в обмотке катушки, величина которой связана с амплитудой перемещения модулятора, — можно использовать для стабилизации амплитуды колебаний модулятора и автоматической подстройки частоты механического резонанса.

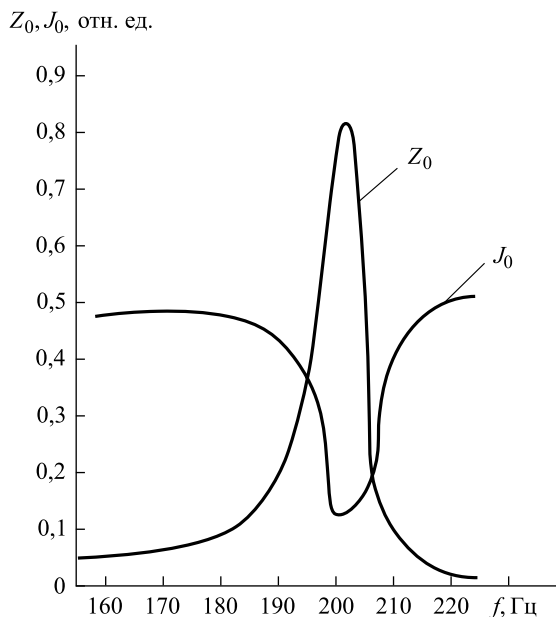


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний модулятора и тока в катушке от частоты колебаний модулятора ($\omega_0 = f_M = 200$ Гц)
Fig. 6. Dependence of the oscillation amplitude of the modulator and the current in the coil on the oscillation frequency of the modulator ($\omega_0 = f_M = 200$ Hz)

С целью обеспечения стабилизации амплитуды колебаний резонансного модулятора были разработаны и исследованы схемы автоматической подстройки. Для получения сигнала о частоте и амплитуде колебаний механического модулятора применяется дополнительная обмотка обратной связи, напряжение с которой используется для управления режимом и частотой генератора модулятора. В целях дополнительной стабилизации амплитуды колебаний модулятора можно также использовать эффект равенства нулю суммарного вращающегося момента, действующего на модулятор при минимальном значении сопротивления магнитной цепи модулятор — постоянный

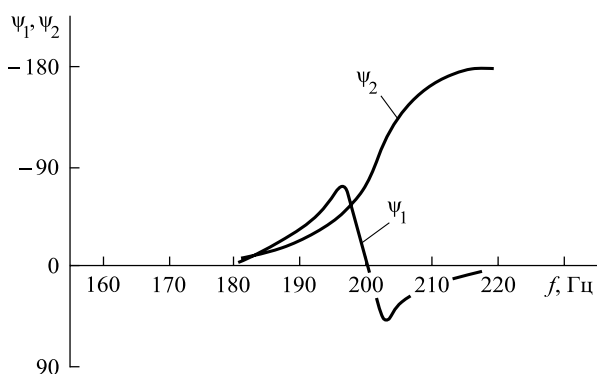


Рис. 7. Фазочастотные характеристики колебаний модулятора и тока в катушке модулятора
Fig. 7. Phase-frequency characteristics of oscillations in the modulator and current in the modulator coil

магнит. Для этого в магнитную схему модулятора дополнительно введены полюсные наконечники (рис. 8).

Магнитное сопротивление в такой системе достигает своего минимального значения при отклонении модулятора l от оси $0-0'$ на угол, равный θ_0 , и обуславливает тем самым максимальное значение магнитной силы F_M .

При отклонении модулятора $0-0'$ на углы $\theta_x \neq \theta_0$ относительно пружины возникает момент магнитной силы $\bar{M}_M = \bar{F}_M l$, стремящийся сохранить равенство $\theta_0 = \theta_x$.

Полагая, что модулятор не абсолютно жесткий, а его масса равна нулю, моменты вращения, действующие на модулятор, будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_M &= \bar{F}_M l = F_M l \sin(\theta_0 - \theta_x); \\ \bar{M}_Z &= \bar{F}_x l = F_Z l, \end{aligned} \right\}$$

где $F_Z = \xi Z$.
 Здесь ξ — коэффициент упругости пружины;
 $Z = l \sin \theta_x \approx l \theta_x$ — амплитуда перемещения конца модулятора (при углах $3...50^\circ$).

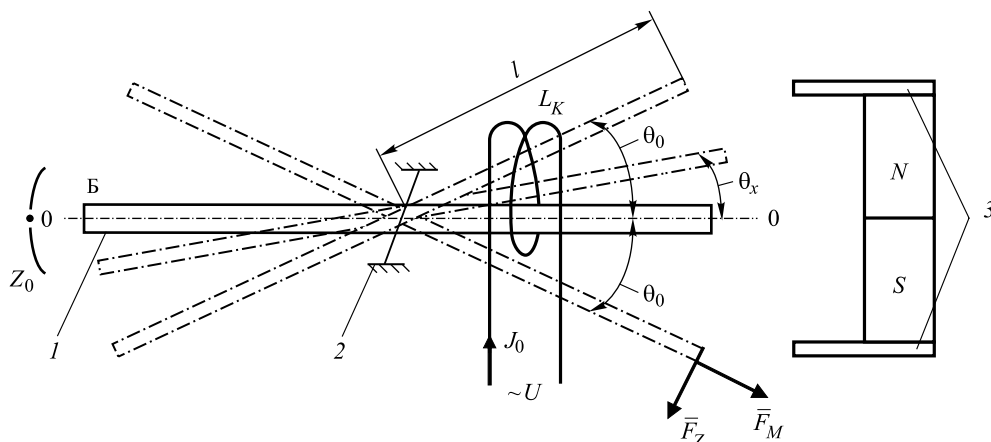


Рис. 8. Схема колебаний модулятора в силовом поле магнита с полюсными наконечниками
Fig. 8. Scheme of oscillations of the modulator in the force field of a magnet with pole pieces

Модулятор будет находиться в равновесии, если $M_{\Sigma} = 0$, т. е.

$$F_M l \sin(\theta_0 - \theta_x) - \xi l \theta_x = 0.$$

Для малых углов θ_0 и θ_x , при которых реально работает модулятор, после соответствующих преобразований получим

$$\theta_x = \frac{\theta_0 \frac{F_M}{\xi l}}{1 + \frac{F_M}{\xi l}}.$$

Отсюда видно, что при $F_M / \xi l \gg 1$ угол $\theta_x \approx \theta_0$ и мало зависит от изменения F_M и F_z до величин отклонения, равных 30...40 %.

Таким образом, при протекании переменного тока по обмотке катушки L_K модулятор будет периодически отклоняться на угол $\pm\theta_0$ и амплитуда Z перемещения его противоположного конца будет постоянна.

Вывод

Разработанные методы и схемно-конструктивные решения позволили обеспечить стабилизацию амплитуды колебаний резонансного элект-

ромеханического модулятора и минимальную погрешность датчика электростатического поля при воздействии температуры, равной ± 130 °С, и частоты вибраций до 200 м/с² [6, 7].

Список литературы

- [1] Пушкин Н.М. Электрофизические методы контроля и диагностики изделий РКТ. М.: Научный консультант, 2016. 277 с.
- [2] Датчики электрического поля «Зонд-3М БЫ2.714.003». Техническое описание. Королев: НПО Измерительной техники, 1989. 45 с.
- [3] Львович А.Ю. Основы теории электромеханических систем. Л.: ЛГУ, 1973. 196 с.
- [4] Болотин А.И., ред. Вибрации в технике: Справочник. Т. 1. М.: Машиностроение, 1978. 196 с.
- [5] Калинин Б.А., Пинчугин А.В. Модуляторы малых сигналов. Л.: Энергия, 1980. 196 с.
- [6] Датчик электрического поля «Зонд-3 БЫ2.714.003». Технические условия. URL: <http://www.ooo-pribor.ru/descriptions/38523/>
- [7] Измеритель напряженности электростатического поля. Пат. RU 2606927 C1/МПК G01R 29/00 (2006.01)/А.Н. Филиппов, Н.М. Пушкин, А.В. Фролов, О.П. Петренко; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники» (RU); заявл. 10.08.2015, опублик. 10.01.2017, бюл. № 1.

Сведения об авторах

Пушкин Николай Моисеевич — д-р техн. наук, главный конструктор АО «НПО измерительной техники», npoit@npoit.ru

Лакшин Кирилл Владимирович — магистр, инженер 2-й категории АО «НПО измерительной техники», npoit@npoit.ru

Новичков Александр Сергеевич — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), npoit@npoit.ru

Статья поступила в редакцию 19.09.2017 г.

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE VIBRATING MODULATOR SENSOR OF THE ELECTROSTATIC FIELD

N.M. Pushkin¹, K.V. Lakshin¹, A.S. Novichkov²

¹ JSC «NPO Measuring equipment», Pionerskaya str., 2, 141074, Korolev, Moscow region, Russia

² BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

npoit@npoit.ru

Dynamic characteristics of the vibration modulator of the electrostatic field sensor «Zond-3M» are analyzed. Data on the design of the sensor and its vibration modulator are given. An analysis of the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the modulator is performed. The nonlinear dependence of the frequency of the forced oscillations of the modulator on its amplitude with the amplitude of oscillations over 1 mm is revealed. This dependence is due to the presence in the modulator design of a nonlinear element — a flat elastic plate. The harmonic balance method was used, the equation of the «skeleton curve» of the amplitude-frequency dependence of the oscillations near the resonant frequency was found. Equations describing the amplitude of the current in the excitation coil are given. The main conditions for the development of a system of automatic adjustment and stabilization of the amplitude and frequency of vibrations of the vibrational modulator are determined.

Keywords: electrostatic field sensor, a vibration modulator, amplitude-frequency characteristic

Suggested citation: Pushkin N.M., Lakshin K.V., Novichkov A.S. *Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik vibratsionnogo modulyatora datchika elektrostatičeskogo polya* [Investigation of the dynamic characteristics of the vibrating modulator sensor of the electrostatic field]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 94–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-94-100

References

- [1] Pushkin N.M. *Elektrofizicheskie metody kontrolya i diagnostiki izdeliy RKT* [Electrophysical methods of control and diagnostics of RKT products]. Moscow: Nauchnyy konsul'tant [Scientific adviser], 2016, 277 p.
- [2] *Datchiki elektricheskogo polya «Zond-3M BY2.714.003». Tekhnicheskoe opisaniye* [Sensors of the electric field «Zond-3M BY2.714.003». Technical description]. Korolev: «NGO of Measuring Equipment, 1989, 45 p.
- [3] L'vovich A.Yu. *Osnovy teorii elektromekhanicheskikh sistem* [Fundamentals of the theory of electromechanical systems]. Leningrad: Leningrad State University, 1973, 196 p.
- [4] Bolotin A.I., red. *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in technology]: Handbook. T. 1. Moscow: Mashinostroeniye [Mechanical Engineering], 1978. 196 p.
- [5] Kalinchuk B.A., Pinchugin A.V. *Modulyatory malykh signalov* [Modulators of small signals]. Leningrad: Energy, 1980, 196 p.
- [6] *Datchik elektricheskogo polya «Zond-3 BY2.714.003». Tekhnicheskie usloviya* [Sensor of the electric field «Zond-3 BY2.714.003». Technical conditions]. Available at: <http://www.ooo-pribor.ru/descriptions/38523/>
- [7] Filippov A.N., Pushkin N.M., Frolov A.V., Petrenko O.P. *Izmeritel' napryazhennosti elektrostatičeskogo polya* [Electrostatic field strength meter]. Pat. RU 2606927 C1 / IPC G01R 29/00 (2006.01). Applicant and patent holder Joint-stock company «Scientific and Production Association of Measuring Equipment» (RU); claimed. August 10, 2015, publ. 01/10/2012, bul. 1.

Authors' information

Pushkin Nikolay Moiseevich — D-r Sci. (Tech.), Chief designer in the direction of JSC «NPO Measuring equipment», npoit@npoit.ru

Lakshin Kirill Vladimirovich — Magister, engineer of 2nd category of JSC «NPO Measuring equipment», npoit@npoit.ru

Novichkov Aleksandr Sergeevich — student of BMSTU (Mytishchi branch), npoit@npoit.ru

Received 19.09.2017