

УДК 681.5.017

## **Динамические характеристики гальванометрического сканатора для лазерной поверхностной обработки**

**Гилязов М.Р.\*, Нагулин К.Ю.\*\*\*, Гильмутдинов А.Х.\*\*\***

*Казанский национальный исследовательский технический университет*

*имени А.Н. Туполева – КАИ,*

*ул. Карла Маркса, 10, Казань, 420111, Россия*

*\*e-mail: mrgilyazov@kai.ru*

*\*\*e-mail: knagulin@mail.ru*

*\*\*\*e-mail: albert.gilmutdinov@kai.ru*

### **Аннотация**

Разработан быстродействующий гальванометрический сканатор для лазерного технологического оборудования. Гальво представляет из себя сопряжение металлического ротора и статора, состоящего из постоянных магнитов, статорных пластин специальной формы и катушки.

Сканатор обеспечивает угол отклонения лазерного луча в диапазоне  $\pm 22,5^{\circ}$  с максимальной частотой 285 Гц. Путем численного моделирования произведена оценка динамических характеристик сканатора. Посредством анализа затухающих колебаний оценена резонансная частота гальво.

После чего проведена оптимизация управляющего сигнала с помощью ПИД-регулирования подаваемого тока. Критерием оптимальности выступила максимальная линейность движения ротора сканатора. Изучено изменение

магнитного потока в процессе осцилляции. Оценено время установления амплитуды вынужденных колебаний ротора (0,02 с).

**Ключевые слова:** гальво-сканатор, лазерная обработка, управление, численное моделирование

### **Введение**

Лазерная техника и лазерные технологии находят все более широкое применение в производстве авиационной техники и авиационном приборостроении [1,2,3]. Наблюдение, наведение, контроль, поверхностная и глубинная обработка материалов [4,5] – неполный перечень задач, для решения которых благодаря когерентности и малой расходимости пучка идеально подходит лазерное излучение. Ориентация и управление лазерным лучом в пространстве осуществляется сканаторами различных типов, среди которых, благодаря хорошему соотношению точности и быстродействия к простоте изготовления и стоимости, заслуженное место занимают гальванометрические системы. Для большинства технологических применений достигаемая гальванометрическими сканаторами предельная частота в 1,5 кГц [6,7] является вполне достаточной.

Существующие системы разрабатываются под каждую задачу отдельно. В большинстве случаев за основу берется один и тот же конструктив, а частоты сканирования в зависимости от нагрузки в виде зеркала подбираются эмпирически при варьировании управляющего сигнала ПИД-регулятора. Целью данной работы является разработка численной модели, дающая комплексное понимание

функционирования гальво-сканатора и влияние каждого элемента на итоговые динамические характеристики.

### Основная часть

Предлагаемый в настоящей работе гальванометрический сканатор относится к классу резонансных (resonant) сканеров с обратной связью (closed-loop). Его устройство представлено на Рис. 1.

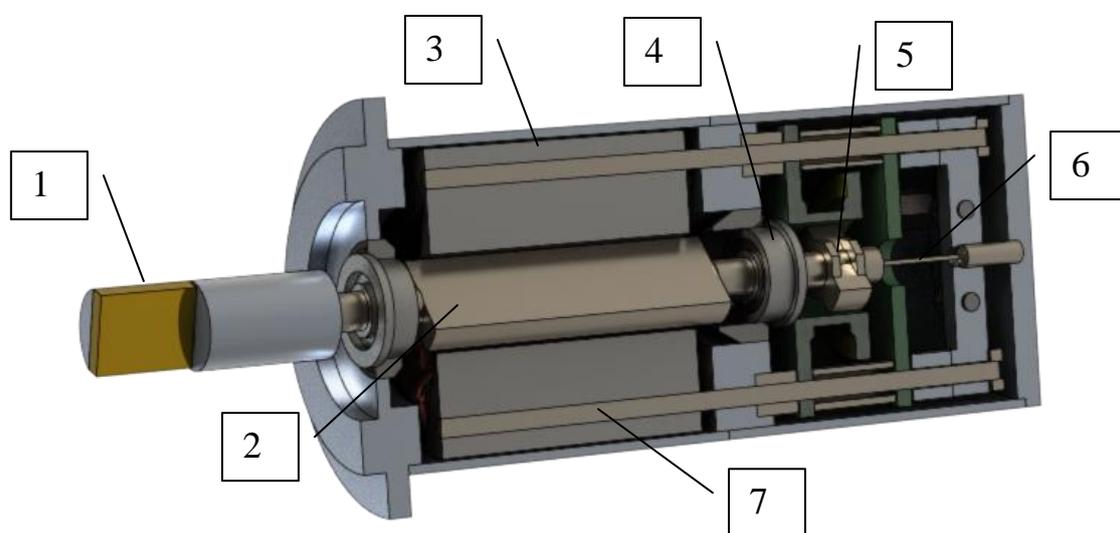


Рис. 1. Устройство разработанного гальво-сканатора: 1 – зеркало; 2 – ротор; 3 – статор с обмотками; 4 – подшипник; 5 – емкостный датчик обратной связи; 6 – торсион; 7 – шпилька

Отклоняющее лазерный луч зеркало 1 крепится на хвостовик ротора 2, установленного на двух прецизионных подшипниках 4 корпусе. Ротор выполнен из магнитомягкого материала. Статор набран из пакета пластин трансформаторной стали толщиной 0,3 мм, стянутого шпильками. В диаметрально противоположных пазах в статоре закреплены два неодимовых постоянных магнита (магнитная

индукция 1 Тл), поле которых совместно с магнитным полем статорных катушек 3, создает вращательный момент ротора. Две статорные катушки, каждая по 50 витков медного провода ПЭВ2 выполнены бескаркасным способом и зафиксированы лаком УР231. Катушки соединены согласно последовательно так, что протекающий через них ток создает магнитное поле в одном направлении. Обратная связь осуществляется посредством емкостного датчика угла поворота 5, механически связанного с ротором. Возвратный момент ротору придается торсионом 6. Механическая жесткость конструкции обеспечивается корпусом и в том числе четырьмя шпильками 7. Рассчитанное значение момента инерции ротора с установленным зеркалом составляет  $0.72 \cdot 10^{-8}$  кг\*м<sup>2</sup>.

Амплитуда угла поворота зеркала/ротора в одну сторону составляет 0.4 рад ~ 22,5°.

Для обеспечения максимальной степени линейности системы, необходимо чтобы рабочая частота сканатора как можно больше отличалась от его резонансной частоты [8,9,10]. Изменение резонансной частоты на стадии проектирования осуществляли варьированием массы ротора, величины магнитной индукции постоянного магнита и коэффициента упругости торсиона.

Оценку собственной частоты колебаний ротора осуществляли численным методом с использованием модели сканатора, схематично представленной на Рис. 2. Физическая модель подвижной части гальво-сканатора была построена в программе Comsol MultiPhysics 5.3a. Для расчета магнитных полей был использован интерфейс Rotating Machinery, Magnetic, для расчета динамики вращательного движения – Multi Body Dynamics, с нерастяжимым вращающимся доменом. Во всей области

решались полные уравнения Максвелла без учета зарядов [11,12,13]. На границе вращающейся и стационарной частей задано условие непрерывности магнитного поля. В качестве начальных условий бралось предварительно рассчитанное в стационарном состоянии методом MUMPS распределение магнитного поля в моделируемом устройстве. В дальнейшем временной расчет также проводился методом MUMPS, с шагом по времени, достаточным для анализа (не менее 1/32 части периода управляющего сигнала).

Вращательный момент ротора сканатора можно разделить на три составляющие [14,15,16,17]:

1. Момент, обусловленный наличием торсиона, создающего упругую возвращающую силу. Его вклад составляет от 10 до 20% общего вращательного момента.
2. Момент, обусловленный наличием постоянных магнитов в системе. Этот момент можно назвать «статическим», поскольку он есть и в те моменты, когда ротор неподвижен. Он зависит от угла между текущим положением ротора и крайними его положениями.
3. Момент, обусловленный движением ротора, который можно назвать «динамическим». Движение ротора в неоднородном магнитном поле постоянных магнитов и катушек статора вызывает в роторе индуцированные токи, которые взаимодействуют с магнитным полем и тормозят ротор.

Таким образом, резонансная частота гальво-сканатора определяется тремя факторами [8,18,19]: коэффициентом жесткости торсиона, магнитной индукцией постоянных магнитов и величиной силы тока в катушках.

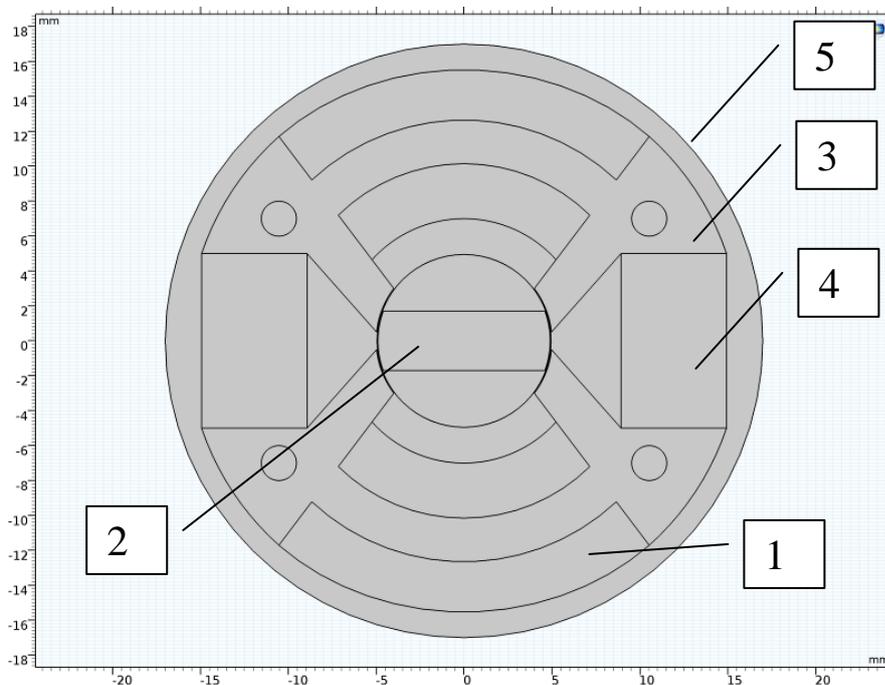


Рис. 2. Структура модели гальво-сканатора, поперечное сечение: 1- обмотка статора; 2 – ротор из магнитомагкого материала; 3 – магнитопровод статора; 4 – постоянный магнит; 5 - корпус

Для численной оценки резонансной частоты ротора гальво-сканатора можно воспользоваться простым способом [17,20] – вывести колебательную систему из равновесия путем подачи ступеньки постоянного тока через катушки статора и наблюдать за развитием процесса свободных затухающих колебаний ротора. Результат моделирования колебаний ротора при подаче на катушки постоянного

тока 5 А представлен на Рис. 3. Видно, что период затухающих колебаний составляет 3,5 мс, что соответствует значению резонансной частоты 285 Гц.

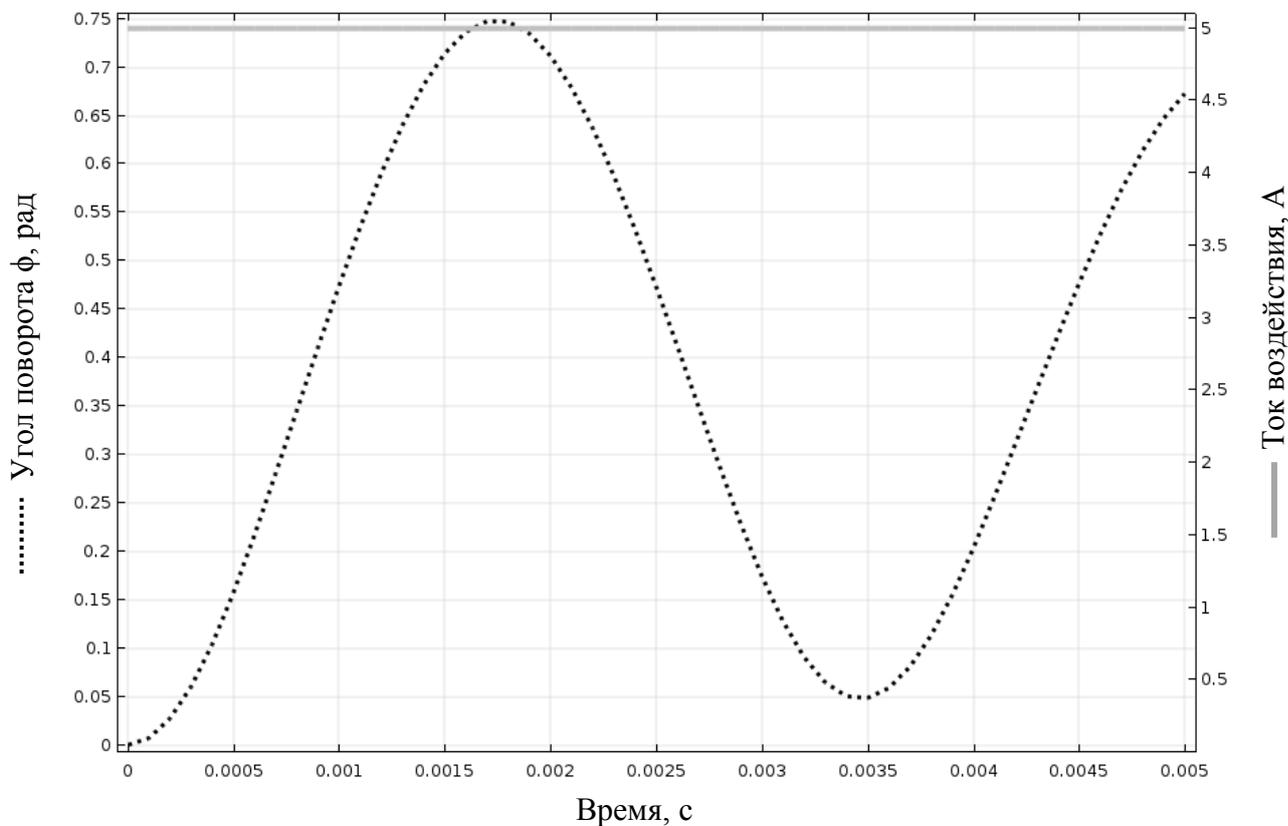


Рис. 3. График затухающих колебаний ротора гальво-сканатора при подаче на его обмотки в начальный момент времени тока 5 А.

Рассмотрим далее процедуру управления гальво-сканатора. Для обеспечения максимальной степени линейности угла поворота ротора, выходной сигнал должен иметь треугольную форму. Управление ротором гальво-сканатора осуществляется с помощью пропорционально-интегрального регулирования тока, протекающего через катушки статора. В качестве измеряемого параметра выступает угловая скорость ротора. Движение ротора в установившемся режиме можно подразделить на 4 этапа, начиная с крайнего положения:

1. Поворот. Через катушки пропускают максимальный ток, создающий магнитное поле в обратном направлении, которое изменяет направление скорости вращения ротора на противоположное.

2. Вращение с постоянной угловой скоростью. В этот промежуток времени в цепи катушек статора протекает ток, корректирующий скорость вращения ротора, который движется по инерции к противоположному крайнему положению.

3. Поворот. Снова подается максимальный ток, направленный в обратную сторону, который позволяет совершить изменение направления скорости вращения ротора на противоположное.

4. Вращение с постоянной угловой скоростью. Вновь возникает движение к первоначальному крайнему положению.

Эти процессы наглядно отражает Рис. 4, где на одном графике совмещены зависимости от времени силы тока в обмотках и угол отклонения ротора.

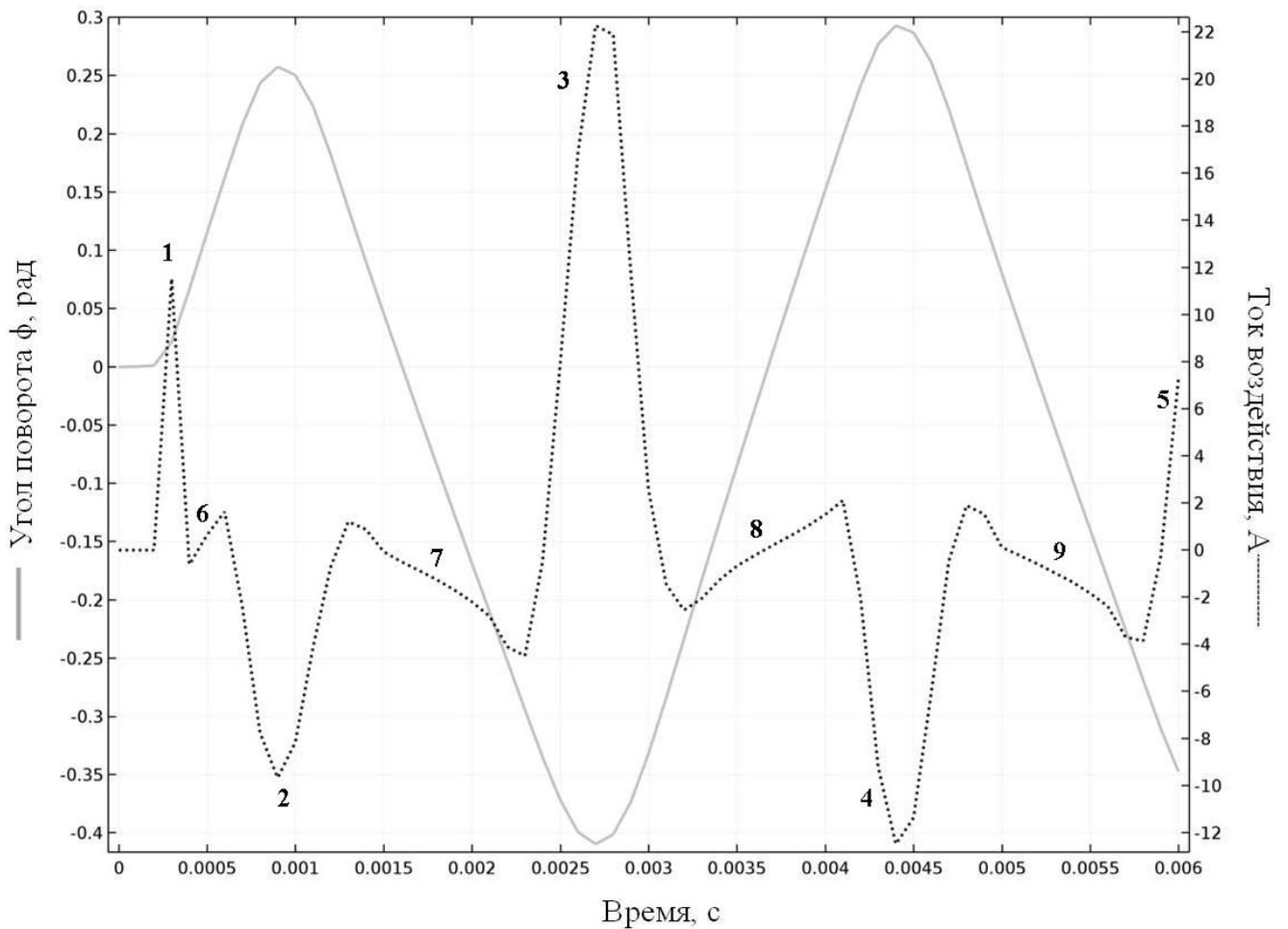


Рис. 4. Воздействие на гальво-сканатор и реакция системы (выход на режим): 1-5 – пики тока в катушках, отвечающие за изменение направления вращения ротора; 6-9 – квазилинейные участки временной зависимости тока в катушках, отвечающие за вращение ротора с постоянной угловой скоростью

Первый пик силы тока имеет меньшую амплитуду, поскольку ротор в начальный момент покоился и необходимо только придать ему ускорения для разгона, в отличие от пиков 2-5, которые сперва тормозят ротор до нулевой скорости, а потом его разгоняют в противоположном направлении. Квазилинейные участки 6-9 отвечают за движение ротора с постоянной угловой скоростью.

Асимметрия импульсов тока – положительные импульсы больше по амплитуде отрицательных приводит к несимметричному отклонению ротора – нулевое положение смещается в отрицательную область на 2 градуса.

На Рис. 5 представлен вышеописанный процесс (Рис. 4), уже вышедший на стабильные колебания.

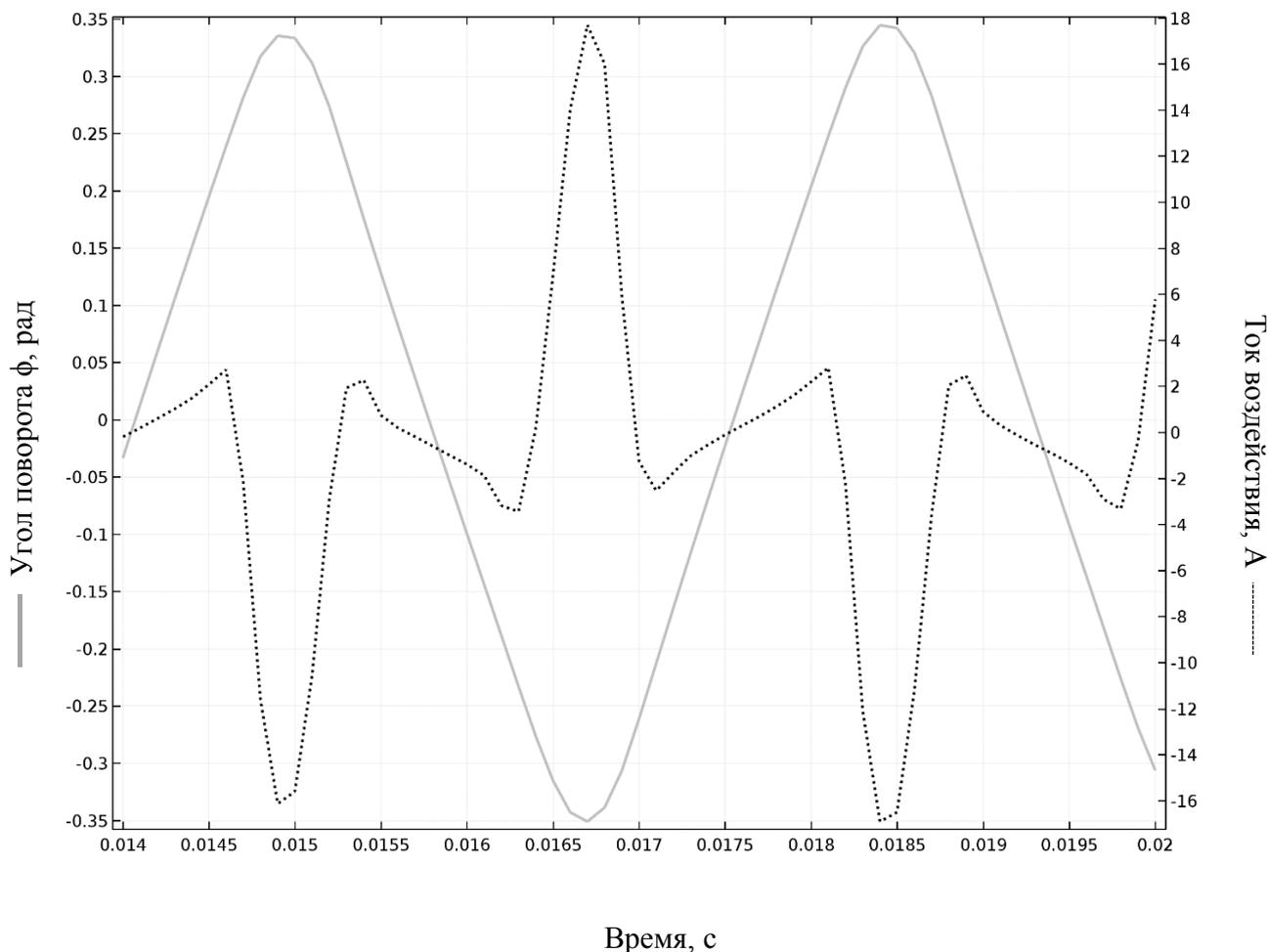


Рис. 5. Воздействие на гальво-сканатор и реакция системы (стабильное состояние)

На Рис. 6 представлены рассчитанное в интервале времени 0,0175 – 0,0183 с пространственное распределение плотности магнитного потока в центральном поперечном сечении магнитной системы сканатора.

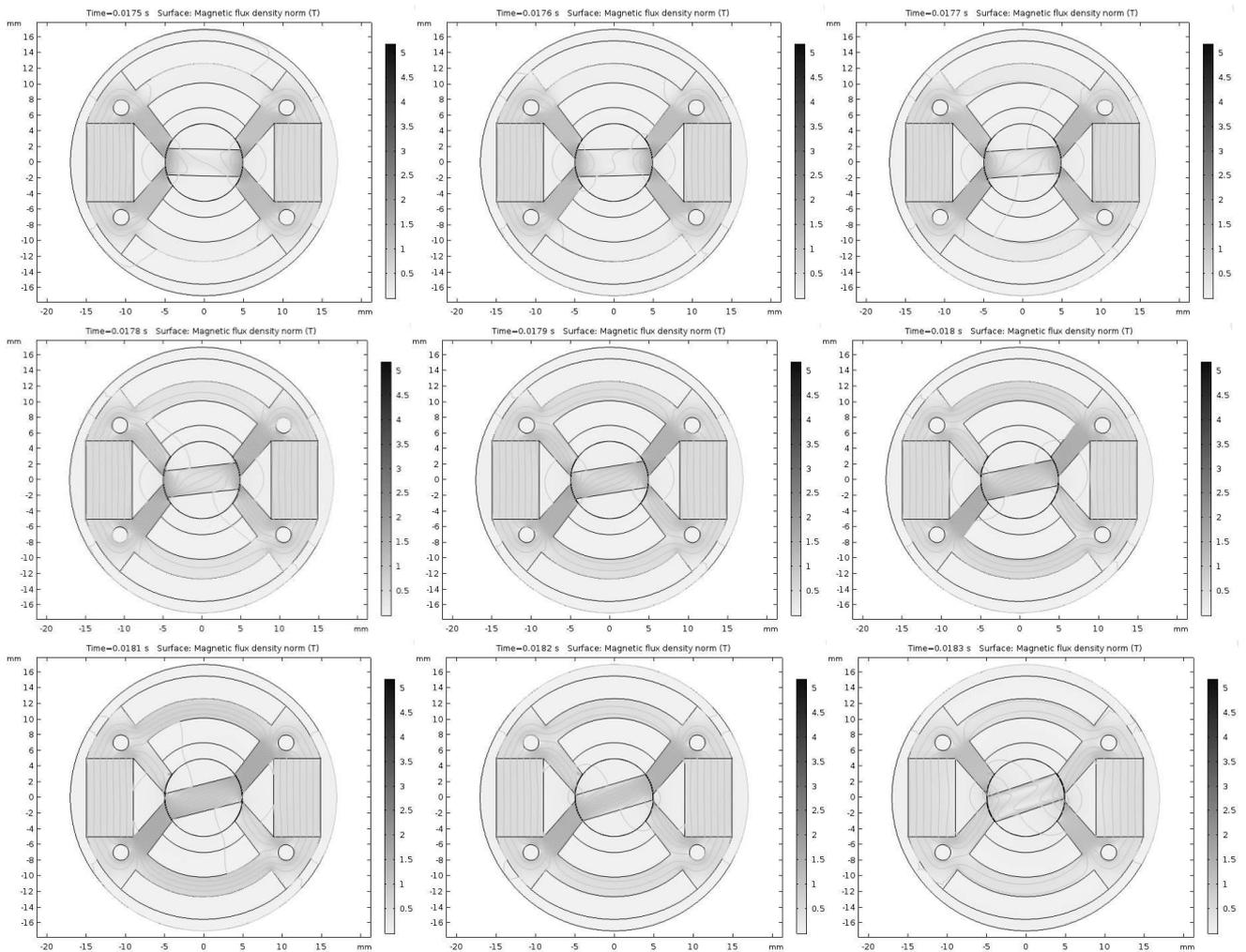


Рис. 6. Изменение магнитного потока с течением времени

На Рис. 6 видно, как по мере нарастания тока в обмотках происходит пространственное перераспределение плотности магнитного потока в магнитопроводе статора и в воздушном зазоре, что вызывает синхронный поворот ротора относительно его нейтрального положения.

Как видно из Рис. 4, установление амплитуды вынужденных колебаний ротора происходит за несколько периодов. Более наглядно этот процесс отображен на Рис. 7, где представлена зависимость от времени угла отклонения ротора сканатора. Видно, что к 4-му периоду (за время 0,02 с) амплитуда колебаний ротора выходит на

установившееся значение, демонстрируя высокую степень линейности участков нарастания и спада значения угла.

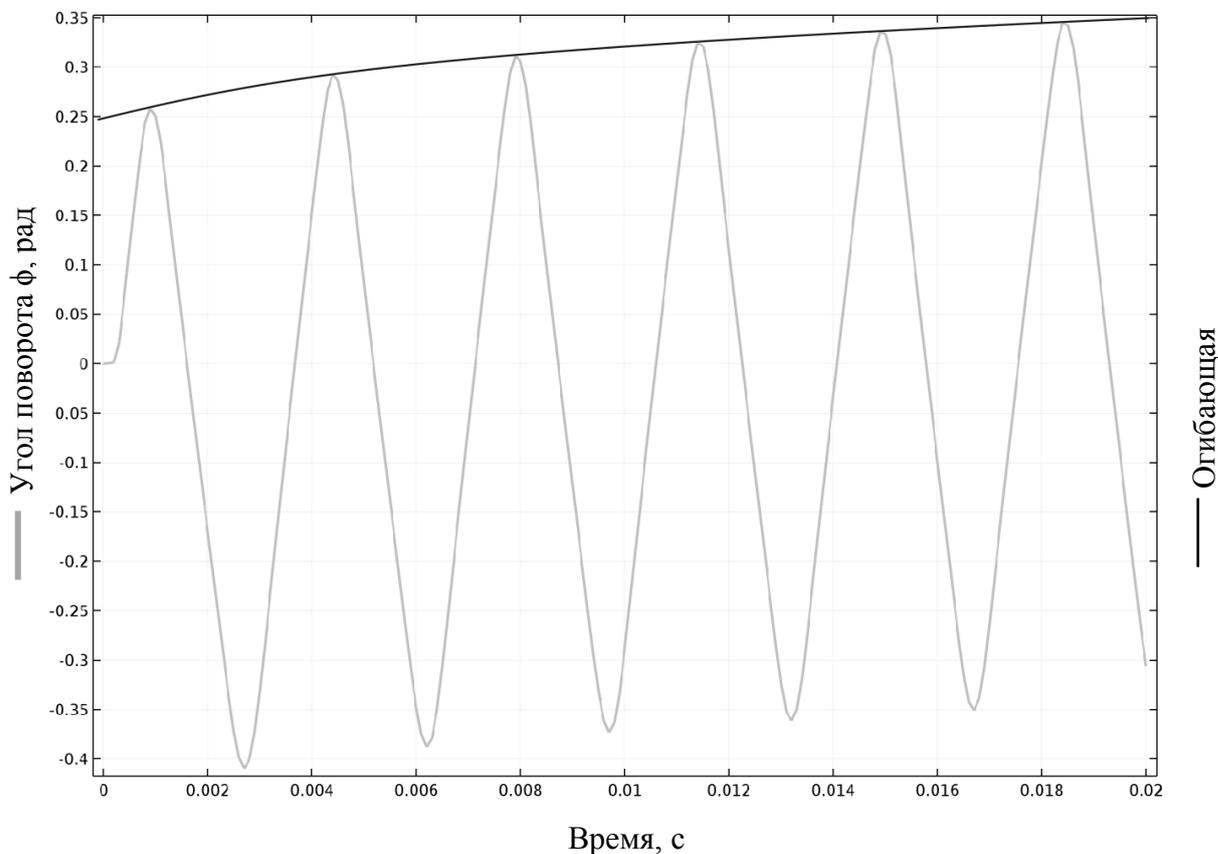


Рис. 7. Зависимость угла отклонения ротора от времени при установлении амплитуды его вынужденных колебаний.

### Заключение

Разработана конструкция и математическая модель гальво-сканатора и произведена оценка его динамических характеристик. Установлено, что собственная частота колебаний системы «зеркало-ротор-торсион» составляет 285 Гц. При этом максимальный угол отклонения ротора равен  $45^{\circ}$ . Определена форма импульсов тока, обеспечивающих максимальную линеаризацию рабочих участков зависимости

«угол поворота - ток в катушках». Определено, что за время 0,02 с амплитуда вынужденных колебаний ротора выходит на установившееся значение.

*Работа выполнена в рамках задания №9.3236.2017/4.6, Федеральной Целевой Программы №14.578.21.0245; в рамках государственного контракта № 14.Z50.31.0023, постановление Правительства №220; а также контракта №2438ГС2/22662 от 03.04.2018 при поддержке Фонда Содействия Инновациям.*

### **Библиографический список**

1. Авдеев А.В., Метельников А.А. Бортовая лазерная силовая установка для борьбы с космическим мусором // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72840>
2. Рябцев М.В. Датчик угла поворота многооборотного электропривода // Труды МАИ. 2013. № 63. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36127>
3. Марчуков Е.Ю., Кулалаев В.В., Вовк М.Ю. Методика расчета разрушения динамической мишени лазерным лучом на заданной дальности // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91645>
4. Людоговский П.Л., Комкова МА. Методы измерений геометрических параметров изделий с помощью лазерных координатно-измерительных систем в современных машиностроительных производствах // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 165 - 168.
5. Полулях К.С. Резонансные методы измерений. - М.: Энергия, 1980. - 120 с.

6. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 1986. - С. 198 - 204.
7. Wang D, Chen X. A tutorial on loop-shaping control methodologies for precision positioning systems // Advances in mechanical engineering, 2017, no. 9 (12), available at: <http://doi.org/10.1177/1687814017742824>.
8. Schaeffer R. Galvo based laser scanning systems // CircuiTree, 2003, vol. 9, no. 16, pp. 32 – 34.
9. Chuanqian Peng; Yumei He; Jie Wang. Optimization of pencil beam f-theta lens for high-accuracy metrology. Optical Engineering, available at: <https://doi.org/10.1117/1.oe.57.1.015101>
10. Schleifenbaum H., Meiners W., Wissenbach K. Individualisierte Produktion mittels High Power Selective Laser Melting (SLM) // Werkstatttechnik online, Jun 09, 2009, pp. 376 - 383.
11. Lianhua F., Hongzhong C., Ning Z., Xiping X., Xuanming D. Optical design of f-theta lens for dual wavelength selective laser melting // Advanced Optical Design and Manufacturing Technology and Astronomical Telescopes and Instrumentation (2016), available at: <https://doi.org/10.1117/12.2246995>
12. Lopez J., Mishchik K Mincuzzi G., Audouard E., Mottay E., Kling R. Efficient Metal Processing Using High Average Power Ultrafast Laser // Journal of laser micro nanoengineering, 2017, available at: [https://doi.org 10.2961/jlmn.2017.03.0020](https://doi.org/10.2961/jlmn.2017.03.0020)
13. Johnson J. Optics for Laser Scanners. 2015, available at: [www.sintecoptronics.com/ref/OpticsForScanSystem.pdf](http://www.sintecoptronics.com/ref/OpticsForScanSystem.pdf)

14. Jin K.H., Yahng J.S., Park C.S., Yang H.S., Kim C.Y., Ye J.C., Yee D.S. Telecentric F-theta Lens for High-Speed Terahertz Reflection Three-Dimensional Imaging // Proc. The International Conference on Photonics and Optical Engineering (ICPOE 2014), available at: <https://doi.org/10.1109/irmmw-thz.2014.6956093>
15. Xiaoling Sun, Bin Zhou, Weihao Xie, Yuangeng Zhang. The design of laser scanning galvanometer system // Proc. The International Conference on Photonics and Optical Engineering (ICPOE 2014), 2014, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2082774>
16. Burdenko M. US Patent 5528411, Resonant scanner, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6956093/>
17. Выскуб В.Г. Система управления оптико-механическим сканатором с магнитоэлектрическим приводом // Известия вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 2. С. 68 - 72.
18. Chen W., Xu Y., Zhang H.X., Liu P., Jiao G.H. Optical lenses design and investigations of a dynamic focusing unit for a CO2 laser scanning system // Proc. Laser Beam Shaping XVII, 27 September 2016, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2236257>
19. J. Xie. Real-time focus control in broad flat field laser material processing // Optics and Laser Technology, 2008, vol. 40, no. 2, pp. 330 – 336.
20. Takahashi K., Kwon H.N, Saruta K., Mita M., Fujita H., Toshiyoshi H. A two-dimensional f-theta micro optical lens scanner with electrostatic comb-drive XY-stage // Ieice Electronics Express, 2015, vol. 2, no. 21, pp. 542 – 547.