

Д. Г. ГРЯЗИН, М. Д. КУДРЯВЦЕВ, Н. Л. ЯВОРОВСКАЯ,
К. Н. УСАЧЕВ, Ф. БЕЛЛОН, Д. РЕЙМС, Ж. ПЕРДРИА

ОПЫТ ИСПЫТАНИЙ ЦЕНТРИФУГИ C40-ST-09 ACTIDYN SYSTEMES

Рассмотрена задача оценивания параметров центрифуги C40-ST-09 (ф. Actidyn Systemes) с помощью независимых внешних средств. Предложена методика определения угловой погрешности компенсации вращения основной оси сателлитным механизмом, основанная на использовании автоколлиматора. Указанный автоколлиматор позволяет получать информацию об угловом положении отслеживаемого объекта с частотой до 10 кГц. Представлены результаты опробования предложенной методики.

Введение

Производство новых высокотехнологичных навигационных приборов связано с необходимостью использования современного испытательного оборудования. Как правило, такое оборудование производится иностранными предприятиями-изготовителями. Номенклатура характеристик стендов, устанавливаемая производителями, не всегда соответствует нуждам потребителя. Организации, использующие это оборудование, проводят аттестацию стендов по параметрам, которые не нормируются изготовителем, то есть при аттестации требуется производить оценивание именно тех характеристик, в которых в наибольшей степени заинтересован потребитель.



Рис. 1. Общий вид центрифуги C 40-ST-09

В 2012 году ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» приобрело центрифугу C 40-ST-09 с термокамерой фирмы Actidyn Systemes (рис. 1). Известно, что на центрифугах проводятся испытания и калибровка приборов, работающих в условиях воздействия ускорений [1]. Отличительной особенностью конструкции данной центрифуги является наличие сателлитного стола, вращающегося в противоположную сторону относительно основной оси вращения. Сателлитный стол предназначен для компенсации угловой скорости, без чего проведение испытаний гироскопических датчиков угловой скорости на воздействие перегруз-

Грязин Дмитрий Геннадиевич. Доктор технических наук, главный метролог – начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Кудрявцев Михаил Дмитриевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Яворовская Наталия Львовна. Ведущий инженер ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Усачев Константин Николаевич. Директор ООО «БЛМ Синержи» (Москва).

Беллон Франсуа. Генеральный директор фирмы Actidyn Systemes (г. Эланкур, Франция).

Реймс Дидье. Президент фирмы Actidyn Systemes.

Пердриа Жак. Главный технический специалист фирмы Actidyn Systemes».

ки затруднительно. Следует отметить, что центрифуга позволяет проводить испытания в диапазоне задаваемых ускорений от 0,5 до 100 g, при этом ускорение задается с шагом 0,01 м/с². Для реализации указанного диапазона ускорений центрифуга имеет максимальную частоту вращения основной оси 320 об/мин на радиусе 0,9 м. Вывод данных о частоте вращения производится с разрешением 0,01 об/мин. Сателлитный механизм реализует максимальную частоту вращения 400 об/мин, при этом угловая погрешность компенсации вращения основной оси (точность синхронизации), заявленная предприятием-изготовителем, находится в пределах $\pm 15''$. Предприятие-изготовитель нормирует погрешность задания углового положения в пределах $\pm 0,001^\circ$. Помимо указанных изготовителем характеристик пользователь, как правило, интересуется погрешностями воспроизведения скоростей вращения основной и сателлитной осей, предельные значения которых должны быть на уровне тысячных долей процента.

Постановка задачи

Очевидно, что погрешность воспроизведения ускорения непосредственно связана с погрешностями воспроизведения скоростей вращения основной и сателлитной осей (не нормируемые производителем характеристики), а также с угловой погрешностью компенсации вращения основной оси сателлитным механизмом. При этом ограничение на угловую погрешность компенсации находится в пределах $\pm 15''$, и оно эквивалентно требованию, предъявляемому к стабильности ориентации объекта, помещенного на плоскость сателлитного стола. В ходе проведения испытаний основной задачей была оценка именно этих трех параметров.

В связи с тем что задача определения погрешности компенсации вращения ранее не решалась, потребовалась разработка методики измерений. Отметим, что при разработке центрифуги контроль указанного параметра на предприятии-изготовителе проводился с помощью штатных средств центрифуги. Подобный подход недопустим при аттестации испытательного оборудования в связи с требованиями ГОСТ Р 8.568 и ГОСТ Р 51672, согласно которым точность стенда должна оцениваться с помощью независимых внешних средств, никак не связанных со штатными датчиками аттестуемого оборудования.

Методика измерений угловой погрешности компенсации вращения основной оси с помощью сателлитного механизма

Как правило, для определения погрешности воспроизведения скорости вращения одноосных платформ используются фотоэлектрические и лазерные автоколлиматоры, позволяющие получать информацию об угловом положении отслеживаемого объекта с частотой от 1 до 10000 Гц. Задача определения погрешности компенсации вращения основной оси с помощью сателлитного механизма является во многом схожей с задачей определения погрешности воспроизведения скорости вращения, поэтому для проведения оценки погрешности компенсации в ходе испытаний было решено использовать лазерный автоколлиматор TriAngle TA HS 500-57. При проведении исследований он был установлен на неподвижное основание рядом с центрифугой, а в центре сателлитного стола был закреплен зеркальный куб, отклонение от плоскостности рабочих граней которого не более 0,001 мм. Автоколлиматор устанавливался таким образом, чтобы образовалась оптическая связь между его осью и гранью зеркального куба. Схема измерений указанных параметров приведена на рис. 2.

В режиме компенсации сателлитный стол компенсирует вращение основной оси центрифуги таким образом, что угловое положение объекта испытаний в горизонтальной плоскости не меняется. Это означает, что зеркальный куб, установленный на сателлитном столе, проходя через поле зрения автоколлиматора, должен сохранять свое угловое положение в пределах $\pm 15''$ в соответствии со спецификацией, что поясняет рис. 3. В период времени, соответствующий нахождению куба в поле зрения автоколлиматора, должны наблюдаться постоянные или незначительно меняющиеся отсчеты по его горизонтальной шкале.

Результатом таких измерений является запись сигнала в форме плосковершинного импульса, причем помимо информации об изменении углового положения куба этот импульс позволяет оценить угловую скорость платформы, так как его длительность определяется временем прохождения отражающей поверхности куба через поле зрения автоколлиматора. На рис. 4 приведен плосковершинный импульс, отображающий последовательность отсчетов по горизонтальной шкале автоколлиматора, ...", полученную в режиме компенсации при вращении со скоростью 30 град/с и частоте регистрации сигнала 500 Гц. Сигнал шума, имевший место за пределами импульса, обусловлен переотражением элементами конструкции центрифуги оптического сигнала автоколлиматора.

Для подтверждения возможности применения предложенной методики были проведены две серии экспериментов. Первая серия позволила подтвердить зависимость длительности импульса от установленной скорости вращения. На центрифуге в режиме синхронизации задавались различные значения скорости вращения. Затем, зная скорость вращения (например, $\omega = 30$ град/с = 0,523 рад/с), радиус вращения куба $R = 0,9$ м, размер поля зрения автоколлиматора $P = 40$ мм, диаметр отражающей поверхности куба $K = 50$ мм, рассчитывалась линейная скорость перемещения куба ($v = \omega/R = 0,471$ м/с), время прохождения куба через поле зрения автоколлиматора ($t = S/v = (K/2 + P + K/2)/v = 0,1911$ с) и далее, при заданной частоте регистрации сигнала $f = 5000$ Гц, определялось теоретическое количество зарегистрированных отсчетов за время прохождения одной грани зеркального куба через поле зрения автоколлиматора ($n = t \cdot f = 955$ точек). Далее рассчитанное значение n сравнивались с полученным экспериментально.

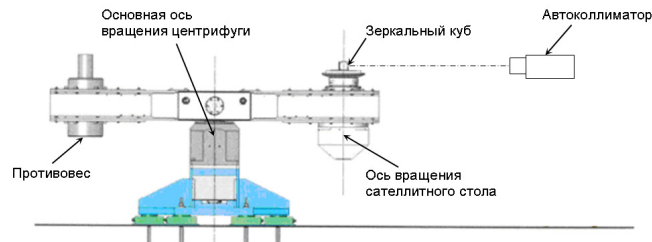


Рис. 2. Схема измерений угловой погрешности компенсации скорости вращения основной оси с помощью сателлитного механизма

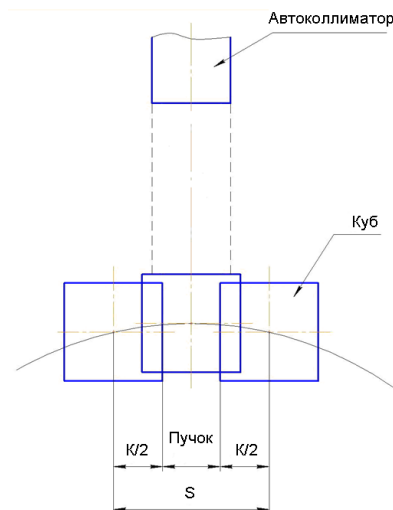


Рис. 3. Перемещение куба в поле зрения автоколлиматора в режиме компенсации угловой скорости вращения основной оси с помощью сателлитного механизма

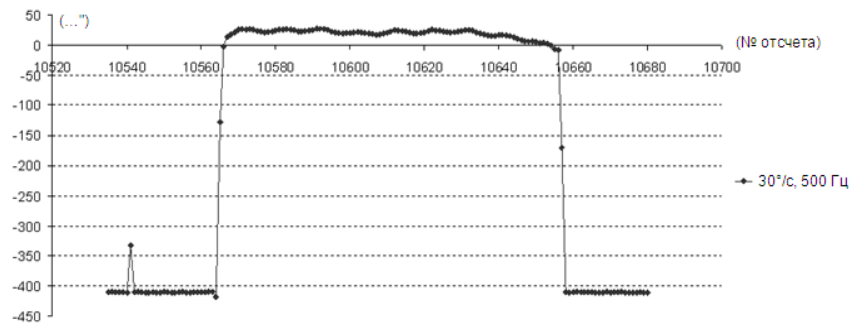


Рис. 4. Импульс, полученный при вращении со скоростью $30^\circ/\text{с}$ и частоте регистрации сигнала 500 Гц

На рис. 5 представлены импульсы, отображающие последовательность отсчетов по горизонтальной шкале автоколлиматора, "...", соответствующие скоростям 90, 180, 360, 540 град/с. Видно, что с увеличением скорости вращения длительность импульса уменьшается. При этом указанная зависимость существенно отличается от ожидаемой обратной пропорциональности из-за сложного влияния переходных процессов регистрационной системы автоколлиматора на заднем фронте сигнала.

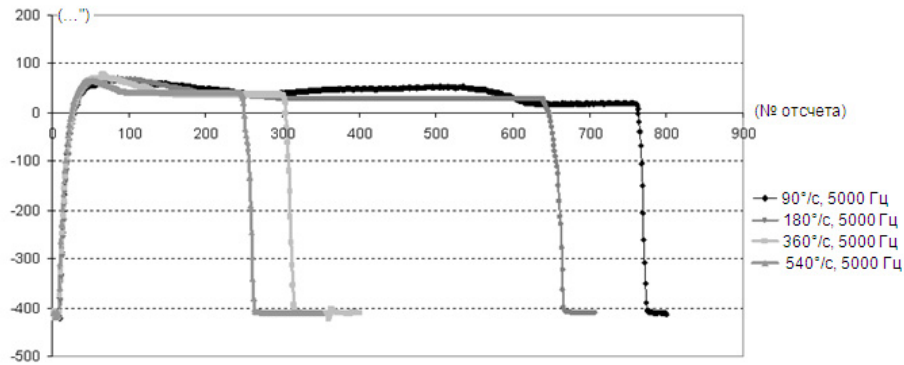


Рис. 5. Зависимость длительности импульса от скорости вращения

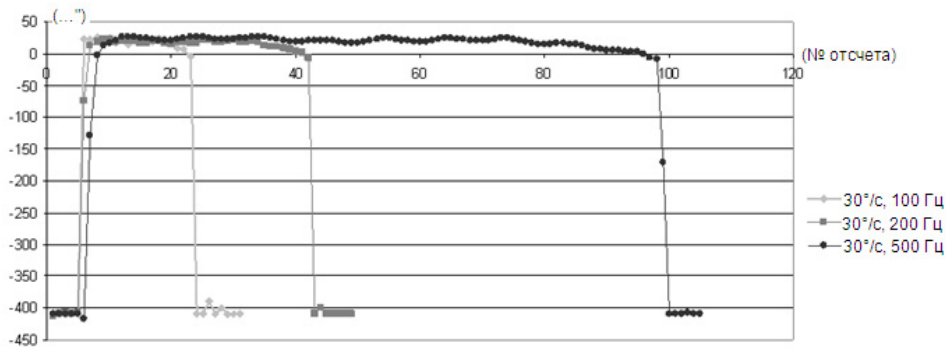


Рис. 6. Зависимость числа отсчетов от частоты регистрации сигнала

В ходе выполнения второй серии экспериментов на центрифуге в режиме синхронизации устанавливалась скорость вращения $\omega = 30$ град/с и последовательно изменялась частота регистрации сигнала от 100 до 10000 Гц. На рис. 6 представлены импульсы, отображающие последовательность отсчетов по горизонтальной шкале автоколлиматора, "...".

зонтальной шкале автоколлиматора, ...", соответствующие 100, 200, 500 Гц. Видно, что с увеличением частоты регистрации сигнала пропорционально увеличивается число зарегистрированных отсчетов в пределах импульса. Таким образом, на основании проведенных исследований был сделан вывод о возможности применения указанной методики для оценки угловой погрешности компенсации вращения основной оси сателлитным механизмом, выбрана частота регистрации данных 5000 Гц и проведены измерения по указанной методике для скоростей вращения 90, 180, 360, 540 и 720 град/с.

Результаты измерений угловой погрешности компенсации вращения основной оси с помощью сателлитного механизма

Для оценки угловой погрешности компенсации вращения применяется алгоритм аппроксимации плосковершинного дискретного импульса, позволяющий оценить указанную погрешность по среднему квадратическому отклонению. Данный алгоритм разработан на основе принципов, описанных в работах [2, 3], и подробно изложен в книге [4]. Он основан на линейной аппроксимации прямолинейного участка импульса между его фронтами методом наименьших квадратов, что позволяет отдельно оценить вклад в погрешность как различия между средними угловыми скоростями вращения основной и сателлитной осей, так и флюктуаций угловой скорости вращения сателлитной оси вследствие соответствующего управляющего воздействия. На рис. 7 представлены плосковершинный импульс, отображающий последовательность отсчетов по горизонтальной шкале автоколлиматора, ...", и аппроксимирующая его вершину прямая, полученные при скорости вращения 30 град/с и частоте регистрации данных 5000 Гц.

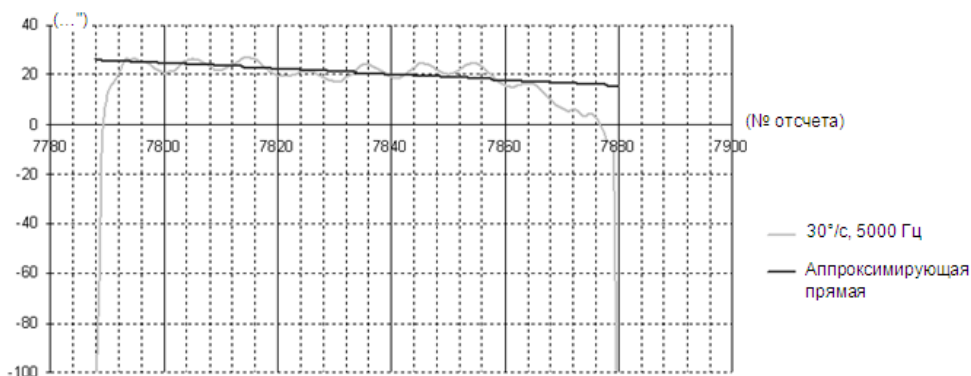


Рис. 7. Аппроксимация плосковершинного дискретного импульса

Обработка результатов измерений показала, что угловая погрешность компенсации вращения основной оси сателлитным механизмом в диапазоне угловых скоростей от 180 до 720 °/с (нормируемый по ускорению диапазон) находится в пределах $\pm 15''$.

Методика измерений погрешности воспроизведения скорости вращения основной оси центрифуги и сателлитного стола

Не менее интересной была и задача оценки погрешности воспроизведения скорости вращения основной оси центрифуги и сателлитного стола. Следует отметить, что лазерный автоколлиматор исходя из диапазона измерений и мак-

симальной частоты регистрации сигнала позволяет оценить указанный параметр только в диапазоне скоростей до 720 град/с. Поэтому при больших скоростях вращения для оценки погрешности воспроизведения скорости вращения применялся тахометр ДО-03-04, позволяющий оценить скорость в указанном диапазоне с погрешностью $\pm 0,006\%$. Тахометр представляет собой компактный прибор, работающий по принципу облучения светоотражающей метки, нанесенной на движущийся или вращающийся объект, с последующим приемом отраженного сигнала.

Результаты измерений погрешности воспроизведения скорости вращения основной оси центрифуги и сателлитного стола

Обработка результатов измерений показала, что относительная погрешность задания скорости вращения основной оси центрифуги и сателлитного стола в диапазоне угловых скоростей от 5 до 120 об/мин (от 30 до 720 град/с) не превышает 0,025%, а в диапазоне угловых скоростей от 120 до 317 об/мин (от 720 до 1900 град/с) не превышает 0,008%.

Выводы

Для решения поставленной задачи определения угловой погрешности компенсации вращения основной оси центрифуги C40-ST-09 сателлитным механизмом была разработана соответствующая методика измерений с использованием быстродействующего лазерного автоколлиматора TriAngle TA HS 500-57, имеющего частоту съема данных до 10 кГц. Получены характеристики точности и установлены диапазоны применимости указанной методики по угловым скоростям вращения основной оси. Получены также оценки погрешности воспроизведения скорости вращения основной оси центрифуги и сателлитного стола.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.actidyn.com/products/motion-simulation-and-control/laboratory-centrifuges/c40-c40-dd/>
2. Синельников, А. Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. - М.: Издательство стандартов, 1979. - 176 с.
3. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. - / Л.: Физматгиз, 1962. - 352 с.
4. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. - М., Мир, 1989. - 540 с.
5. Евсеев, В. О. Устойчивый метод оценивания параметра положения медленно меняющегося импульса с симметричными фронтами / В. О. Евсеев, М. Д. Кудрявцев // Сб. тез. докл. 2-й Всеросс. науч.-техн. конф. «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» СУДОМЕТРИКА-2008. - СПб, 2008, 5 с.

Abstract. *Parameters of C40-ST-09 centrifuge by Actidyn Systemes are estimated using independent external aids. The proposed method to determine the error in compensation of centrifuge major axis rotation by its satellite mechanism uses a TA HS 500-57 autocollimator with 10 kHz readout frequency. The results of testing the proposed method are provided.*

Key words: C40-ST-09 centrifuge, Actidyn Systemes, determine the error in compensation, satellite mechanism

Материал поступил 11.03.13