

примеси железа выполняется компьютерными средствами с использованием специально разработанного программного обеспечения. Следует отметить, что вследствие многоэтапности и большого объема выполняемых вычислений, а также необходимости длительной (около 24 ч) выдержки исследованных пластин при комнатной температуре для их возврата к исходному состоянию, соответствующему восстановлению пар Fe-B, такие измерения не относятся к исследованиям в реальном времени.

На рисунке 2 приведен пример исследования пространственного распределения примеси железа по поверхности полупроводниковой пластины-

спутника *p*-Si диаметром 150 мм без гетера с толщиной окисла 1000Å. На рисунке 2, *а* показано распределение длины диффузии ННЗ по поверхности пластины до нагрева, на рисунке 2, *б* – после нагрева. Визуализированные с использованием условных цветов результаты расчета концентрации железа в кремнии показаны на рисунке 2, *в*.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность методов зондовой электрометрии в условиях реального производства и перспективность их использования во входном и межоперационном контроле технологических процессов изготовления изделий микроэлектроники.

УДК 531.385

СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА ГРАВИМЕТРА С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ СИГНАЛА ПЕРВОГО ИНТЕГРАТОРА

Малютин Д.М.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Задача повышения точности гравиметрических измерений является актуальной [1–3]. Уровень точности применяемой аппаратуры для целей разведки месторождений углеводородного сырья должен обеспечивать уверенное обнаружение аномалий с амплитудой 0,1–0,2 мГал, в то время как средняя квадратическая погрешность измерений, присущая гравиметрическим комплексам, созданным в России и за рубежом, составляет 0,1–0,3 мГал. Обеспечение перспективной точности возможно при проведении работ, связанных с совершенствованием системы стабилизации, гравиметрического датчика, увеличением точности обработки гравиметрической информации, методики проведения гравиметрической съемки, увеличением точности навигационной информации о параметрах движения объекта-носителя.

Совершенствование системы стабилизации морского гравиметра возможно не только за счет совершенствования чувствительных элементов [4], но и за счет придания системе стабилизации новых свойств приспособляемости к заранее непредвиденным изменениям условий работы путем автоматического изменения своих свойств и параметров. Инерциальная система стабилизации не возмущаема параметрами движения носителя. Недостатком такого устройства является то, что ошибки начальной выставки, возмущающие моменты в осях подвеса гироскопа и другие факторы приводят к незатухающим и даже расходящимся колебаниям гиростабилизированной площадки с периодом Шулера относительно вертикали.

Рассмотрим устройство системы коррекции двухосной системы стабилизации (гировертикали), позволяющее обеспечить одновременно отсутствие ошибок удержания вертикали даже при ускоренном движении носителя и демпфирование собственных колебаний инерциальной гировертикали. На рисунке 1 показана функциональная схема коррекции двухосной гировертикали с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора [5].

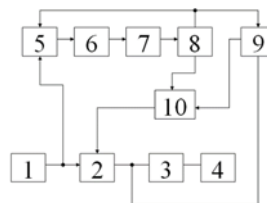


Рисунок 1 – Функциональная схема системы коррекции двухосной гировертикали

На рисунке 2 показана структурная схема системы коррекции двухосной гировертикали с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора.

Работа прибора происходит следующим образом. Сигнал с выхода акселерометра 1, пропорциональный ускорению движения транспортного средства по отношению к Земле, подается на вход интегратора 2, с выхода которого сигнал поступает на усилитель 3 и далее на датчик момента гироскопа 4, что обеспечивает удержание в горизонте стабилизируемой площадки, с которой связана неподвижная опорная система координат.

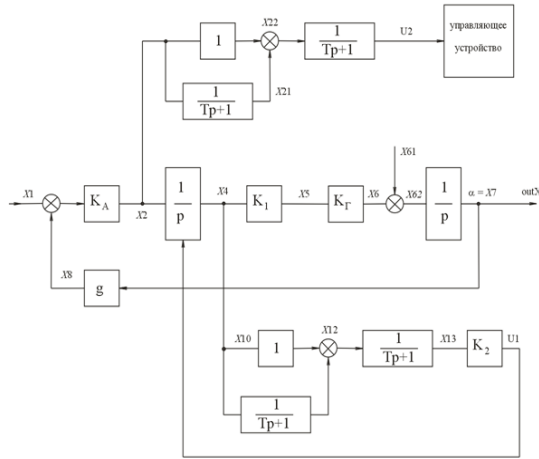


Рисунок 2 – Структурная схема системы коррекции двухосной гировертикали:

K_A – коэффициент передачи акселерометра;
 K_1, K_2 – коэффициенты усиления; $K_Г$ – коэффициент передачи гироскопа по управляющему воздействию;
 g – ускорение силы тяжести; T – постоянная времени;
 X_1 – линейное ускорение; X_i – промежуточные переменные, X_{61} – переносная угловая скорость;
 X_7 – погрешность удержания вертикали;
 U_2, U_1 – выходные сигналы фильтра наблюдателя и фильтра измерителя

Ошибки начальной выставки, возмущающие моменты в осях подвеса гироскопа и другие факторы приводят к возникновению незатухающих колебаний инерциальной вертикали относительно горизонта с периодом Шулера, что ухудшает точность стабилизации. Эти колебания измеряются акселерометром 1 в виде проекции ускорения силы тяжести и так же интегрируются интегратором 2. Сигнал с выхода интегратора 2 подается на вход полосового фильтра измерителя 9. Передаточная функция полосового фильтра измерителя 9 имеет вид:

$$W_1(p) = K_2 T p / (T \cdot p + 1)^2, \quad (1)$$

где $T = 84,4$ мин, K_2 – коэффициент передачи полосового фильтра измерителя. Полосовой фильтр измеритель при $K_2 = 2$ выделяет без искажения переменную составляющую сигнала интегратора 2 с частотой Шулера и эффективно сглаживает составляющие, имеющие частоты выше и ниже частоты Шулера. Сигнал на выходе полосового фильтра измерителя имеет нулевое отставание по фазе по отношению к выходному сигналу интегратора 2 на частоте Шулера. Сигнал с выхода акселерометра 1 подается на вход полосового фильтра наблюдателя 5, имеющего передаточную функцию:

$$W_2(p) = T p / (T \cdot p + 1)^2, \quad (2),$$

где $T = 84,4$ мин. Полосовой фильтр – наблюдатель 5 выделяет переменную составляющую сигнала акселерометра 1 с частотой Шулера и эффек-

тивно сглаживает составляющие, имеющие частоты выше и ниже частоты Шулера. Сигнал на выходе полосового фильтра наблюдателя 5 имеет нулевое отставание по фазе по отношению к выходному сигналу акселерометра 1 на частоте Шулера. Сигнал с выхода полосового фильтра наблюдателя 5 подается на вход компаратора 6. На выходе компаратора 6 положительным значениям выходного сигнала полосового фильтра наблюдателя 5 соответствует постоянный положительный уровень напряжения, а отрицательным значениям выходного сигнала полосового фильтра наблюдателя 5 соответствует постоянный отрицательный уровень напряжения. Сигнал с выхода компаратора поступает на вход фиксатора переходов 7, который выдает сигнал на вход схемы управления 8 в момент смены знака на выходе компаратора 6. По сигналу с выхода фиксатора переходов 7 схема управления 8 обеспечивает срабатывание ключа 10. При этом выходной сигнал полосового фильтра измерителя поступает на второй вход интегратора 2 и из текущего значения интегратора 2 вычитается текущее значение выходного сигнала полосового фильтра измерителя 9. Далее схема управления 8 обеспечивает приведение ключа 10 в исходное состояние «разомкнут» и установку текущего значения на выходе полосового фильтра измерителя 9 равным нулю, а также установку текущего значения на выходе полосового фильтра наблюдателя 5 равным нулю. При этом стабилизируемая площадка находится в горизонте, а на выходе интегратора 2 переменная составляющая с частотой Шулера оказывается скомпенсированной, что обеспечивает демпфирование собственных колебаний инерциальной вертикали. Параметрическая коррекция сигнала интегратора 2 не нарушает условие инвариантности по отношению к линейным ускорениям качки объекта. Таким образом, гиростабилизатор гравиметра обеспечивает нулевую погрешность удержания гравиметра по отношению к вертикали даже при ускоренном движении объекта. На основании предложенной математической модели разработана программа имитационного моделирования работы гиростабилизатора гравиметра.

На рисунке 3 представлена зависимость угла отклонения стабилизируемой площадки по отношению к горизонту от времени.

На рисунке 4 представлена зависимость X_4 – величины выходного сигнала интегратора 2 (в единицах цифрового кода) от времени.

На рисунке 5 представлена зависимость U_1 – величины выходного сигнала фильтра измерителя 9 (в единицах цифрового кода) от времени.

На рисунке 6 представлена зависимость U_2 – величины выходного сигнала фильтра наблюдателя 5 (в единицах цифрового кода (ед. ц. к.) от времени.

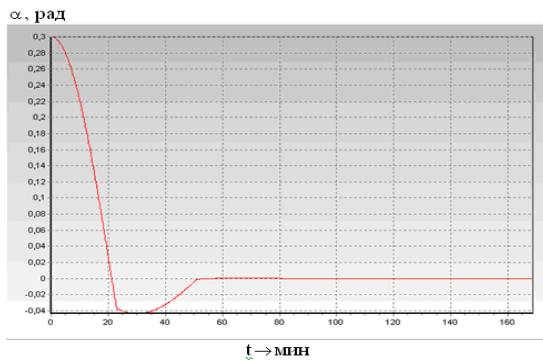


Рисунок 3 – График погрешности стабилизации

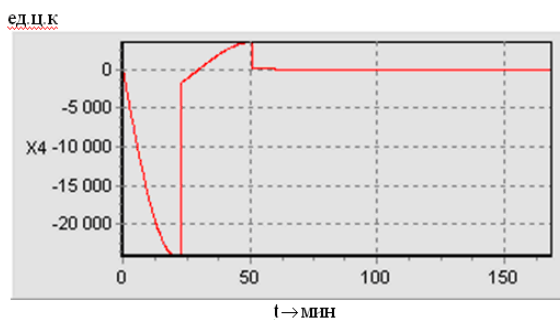


Рисунок 4 – Выходной сигнал интегратора

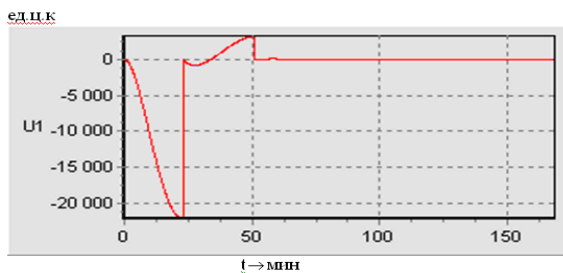


Рисунок 5 – Выходной сигнал фильтра измерителя

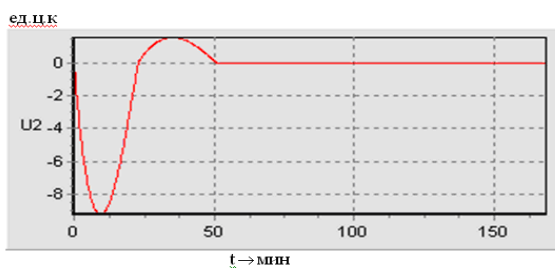


Рисунок 6 – Выходной сигнал фильтра наблюдателя

Моменты времени $t_1 = 22,9$ мин., $t_2 = 51$ мин., $t_3 = 59,7$ мин., $t_4 = 85,4$ мин соответствуют момен-

там смены знака на выходе компаратора b и параметрической коррекции сигнала интегратора 2. В момент времени $t_1 = 22,9$ мин амплитуда отклонения гиросtabilизированной площадки от горизонта уменьшается в восемь раз, а в процессе последующих циклов работы системы коррекции в момент времени $t_4 = 85,4$ мин амплитуда отклонения гиросtabilизированной уменьшается уже в 30 000 раз и составляет 0,00001 рад.

Заключение

Таким образом, в работе с целью повышения точности предложена структура построения контура коррекции гиросtabilизатора гравиметра с параметрической коррекцией показаний первого интегратора. Разработано математическое и программное описание функционирования данной системы. Проведено имитационное моделирование работы системы. Показано, что двухосная гировертикаль инвариантна к ускоренному движению носителя и одновременно в системе обеспечено демпфирование собственных колебаний. Нулевая погрешность прибора из-за ускорений основания позволяет обеспечить нулевые погрешности гравиметрических измерений из-за наклонов гиросtabilизированной платформы и из-за наклонов и ускорений гиросtabilизированной платформы.

Литература

1. Железняк Л.К., Краснов А.А., Соколов А.В. Влияние инерционных ускорений на точность гравиметра «ЧЕКАН-АМ» / Физика Земли, 2010. – № 7. – С. 29–32.
2. Малютин Д.М., Распопов В.Я. Исследование динамики гиросtabilизатора морского гравиметра с самонастройкой параметров / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 7. – 2017. – С. 97–105.
3. Малютин Д.М. Математическая модель гиросtabilизатора гравиметра с комбинированным управлением и самонастройкой параметров / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 226–232.
4. High-precision algorithmic compensation of temperature instability of accelerometers scaling factor / Alaluev R.V., Ivanov Yu.V., Malyutin D.M., Raspopov V.Ya., Dmitriev V.A., Ermilov S.P., Ermilova G.A. // Automation and Remote Control. 2011. – Vol. 72. – № 4. – Pp. 853–860.
5. Малютин Д.М., Кутуров А.Н., Малютина М.Д. Система коррекции гиросtabilизатора морского гравиметра / Патент на изобретение RU2282147 C1, 20.08.2006.