

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НЕЧЕТКОГО НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ НА СИГНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУБИТ-ДЕТЕКТОРА С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ

¹Мельник С. И., ¹Слипченко Н. И., ²Шнырков В. И.

¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

²Физико-технический институт низких температур, Харьков, Украина

E-mail: smelnyk@yandex.ru

Аннотация — Представлена модель неточного непрерывного измерения параметрического преобразования энергии колебаний Раби детектором на основе зарядово-фазового кубита. Для объяснения индуктивного взаимодействия кубита и схемы измерений, а также частичного коллапса используется квантовая теорема Байеса. Показано, что имеет место оптимум индуктивного параметра, определяющего нечеткость наблюдаемого эффекта.

I. Введение

В работе [1] проведен анализ характеристик квантового частично-когерентного детектора на основе зарядово-фазового кубита, связанного с классическим ($\omega_T < k_B T / \hbar$) резонансным контуром. Показано, что в электромагнитном поле сигнальные характеристики с максимальным коэффициентом преобразования возникают тогда, когда эффективная квантовая индуктивность кубита периодически, с частотой низкочастотных осцилляций вероятности заселенностей энергетических уровней (типа Раби) $\Omega_R \approx \omega_T$, принимает положительные и отрицательные значения (рис.1). Обсуждается физическая природа эффекта параметрического преобразования энергии (регенерации) в кубит-детекторе с периодическим изменением знака эффективной индуктивности и его возможное применение в квантовой информатике для регистрации малых сигналов. При математическом моделировании этого эффекта [2] для расчета мгновенного значения индуктивности кубита использована методика квантовомеханического усреднения его когерентного состояния, без учета обратного влияния (back-action) полученного результата измерения.

В то же время, при работе квантового кубит-детектора на пределе чувствительности именно этот эффект становится определяющим. В настоящей работе исследован случай практически чистого непрерывного нечеткого измерения (НИИ) сигнальных характеристик кубит-детектора в режиме параметрического преобразования энергии. Для его описания использован разработанный ранее [3] информационный подход к описанию динамики НИИ, основанный на квантовой теореме Байеса (КТБ), а также предложенный нами принцип инвариантности классической траектории детектора при НИИ относительно способа квантовомеханического описания кубита [4].

II. Основная часть

Эффективное значение индуктивности кубита в измерительной схеме задается классическим параметром, значение которого может быть достаточно точно определено на основании анализа сигнальных характеристик. С другой стороны, при адиабатическом режиме измерения и чистом состоянии кубита она обратно пропорциональна кривизне по φ его энергетического уровня

$$L_{\text{ин}}^{-1}(n_g, \varphi) = \frac{2\pi}{\Phi_0} \frac{\partial I_n(n_g, \varphi)}{\partial \varphi} = \left(\frac{2\pi}{\Phi_0} \right)^2 \frac{\partial^2 E_n(n_g, \varphi)}{\partial \varphi^2} \quad (1)$$

При резонансном возбуждении двухуровневой системы микроволновым полем и измерении эффективного значения обратной индуктивности кубита, мы, фактически, получаем информацию и о фазе его когерентного состояния. Эта информация (нечеткая) приводит к частичному коллапсу кубита к одному из основных состояний. Связанное с ним изменение состояния можно рассчитать на основании КТБ. Ранее мы показали, что квантово-механические описания динамики, связанные с измерением фазы Раби-осцилляций, магнитного потока через кубит или его эффективной энергии инвариантны относительно наблюдаемой траектории классического датчика. Поэтому формулу, полученную для эволюции распределения результатов нечеткого измерения энергии [5], можно использовать и для вычисления классического значения эффективной емкости кубита. Исследуя свойства непрерывности рассматриваемого случайного процесса, можно показать, что это уравнение может быть преобразовано к дифференциальному уравнению Фоккера-Планка, и решено аналитически.

$$\frac{\partial}{\partial t} f(\varphi, t) = -v \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} f(\varphi, t) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \left[\frac{\alpha(\varphi)}{2} f(\varphi, t) \right] \quad (2)$$

Здесь $\alpha(\varphi) = \Delta^2 / (\tau \cdot \delta^2) \cdot \sin^2 2\varphi$, δ - параметр нечеткости измерения, определенный таким образом, что величина $\alpha_0 = \Delta(\varphi)^2 / (\tau \cdot \delta^2)$ уже не зависит от выбора шага по времени τ . Физический смысл $\alpha(\varphi)$ - скорость получения информации (в битах в секунду) при непрерывном нечетком измерении.

При увеличении коэффициента связи кубита и детектора параметр $\alpha(\varphi)$ растет, и динамика системы переходит сначала в режим квантовых скачков, а затем замораживается в основном состоянии (квантовый эффект Зенона при четком непрерывном измерении). При этом эффект параметрического преобразования энергии также исчезает.

С другой стороны, при уменьшении этого параметра измеряемая нечетко траектория $\varphi(t)$ и рассчитанная на ее основании эффективная индуктивность кубита становятся стохастическими. Дисперсия полученного распределения растет. Математическое или приборное усреднение этой зависимости по времени сглаживает ее колебания и в пределе дает среднее нулевое значение. При этом параметрическое преобразование энергии в кубите, связанное с переменной знака индуктивности за один период низкочастотных Раби-осцилляций, также исчезает.

III. Заключение

Таким образом, в отличие от упрощенных моделей, в которых второе слагаемое формулы (2) не учитывается, мы можем более точно описать процедуру НИИ в кубите. В частности, получить оптимальное значение индуктивной связи, необходимое для максимального проявления когерентных эффектов.

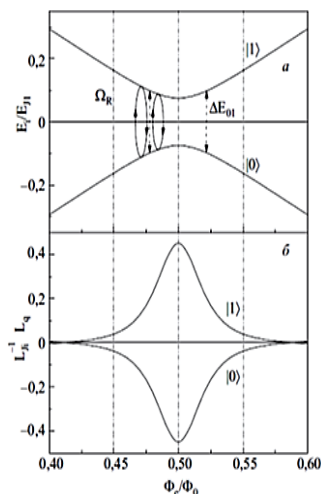


Рис. 1. Схема зависимостей основного и возбужденного уровней энергии зарядово-фазового кубита от внешнего потока. Смена знака эффективной индуктивности кубита при низкочастотных Раби-осцилляциях

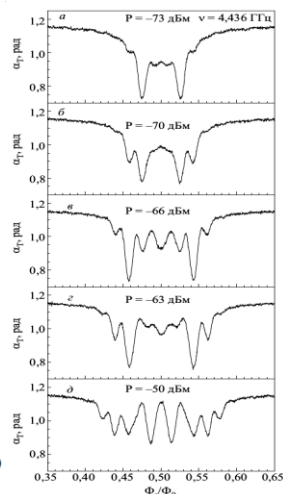


Рис. 2. Семейство зависимостей фазовых сигнальных характеристик связанного с кубитом резонансного контура от внешнего магнитного потока. Параметр семейства – выходная мощность СВЧ-генератора

Экспериментальные исследования качественно подтверждают полученные результаты. Коэффициент индуктивной связи между кубитом и измерительным контуром задается конструктивно и не может быть изменен в ходе эксперимента. Однако варьируя амплитуду СВЧ-воздействия, мы меняем также частоту Раби-осцилляций. При этом меняются как сама зависимость параметра нечеткости $\alpha(\varphi)$, так и ее оптимальные значения. Это проявляется в экспериментально полученных сигнальных характеристиках (рис.2).

IV. Список литературы

- [1] Шнырков В. И., Сорока А. А. Сигнальные характеристики зарядово-фазового кубит-детектора с параметрическим преобразованием энергии. ФНТ. 2009. Т. 35. № 8-9. С. 829-840.
- [2] V. I. Shnyrkov, Th. Wagner, D. Born, S. N. Shevchenko, W. Krech, A. N. Omelyanchouk, E. Il'ichev, and H.-G. Meyer, Phys. Rev. B73, 024506 (2006).
- [3] Melnyk S. I., Slipchenko N. I. Dynamics of weak continuous quantum measurement on the basis of the information approach, KryMiCo'2011, - С. 777-778.
- [4] Мельник С. И., Мельник С. С., Слипченко Н. И. Принципы инвариантности описания в теории непрерывных нечетких квантовых измерений Труды 4-й Межд. Конференции «Электронная комп. база. Состояние и перспективы развития» Харьков – Казивели 2011, - С. 36-39.
- [5] Мельник С. И., Слипченко Н. И., Мельник С. С. Информационный метод моделирования непрерывных нечетких измерений квантового состояния в эксперименте по наблюдению Раби-осцилляций, Труды 3-й Межд. Конференции «Электронная комп. база. Состояние и перспективы развития» Харьков – Казивели 2010, - С.91-94.

EFFECT OF INFORMATION COMPONENT OF INACCURATE CONTINUOUS MEASUREMENTS OF SIGNAL CHARACTERISTICS QUBIT-DETECTORS WITH PARAMETRIC TRANSFORMATION OF ENERGY

¹Melnyk S. I., ¹Slipchenko N. I. ²Shnyrkov V. I.
¹Kharkiv National University of Radio Electronics,
²B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the NASU, Ukraine

Abstract — The model of an inaccurate continuous measurement of parametric energy conversion in the charge-phase qubit-detector of Rabi oscillation modes is presented. Apart from the inductive interaction of the qubit, the measuring circuit allows for the effect of continuous partial collapse of the qubit state with its inaccurate measurement. The present article considers the case of practically pure continuous inaccurate measurement of the signal qubit detector characteristics operating in a parametric energy conversion mode. To describe it we have used a previously developed [3] information approach to characterizing the dynamics of the afore-mentioned type of measurement based upon the quantum Bayes theorem. We have also proposed a principle of invariance for a classical trajectory of the detector in the course of the continuous inaccurate measurement in relation to the mode of qubit quantummechanic description [4].

I. Introduction

We have investigated the case of almost pure inaccurate continuous measurement (ICM) of the signaling characteristics of the qubit-detector mode parametric energy conversion. We have describe previously developed information approach to the description of the dynamics of WCI, based on quantum Bayes theorem (QBT), and we proposed the principle of invariance of the classical trajectory of the detector with respect to the WCM method of quantum-mechanical description of the qubit.

II. The Main Part

The effective value of inductance of a qubit in the measuring circuit is given by the classical parameter, whose value can be accurately determined by analyzing the signal characteristics. On the other hand, it is inversely proportional to the curvature of its energy level by φ (1) for the adiabatic mode of measurement of the qubit pure state

For resonant excitation of a two-tier system with a microwave field and measuring the effective value of the inverse inductance of the qubit, we actually get the information on its phase coherent state. This information (fuzzy) leads to a partial collapse to the one of the qubit basic states. The associated change of state can be calculated on the basis of QBT. We have previously shown that the quantum-mechanical description of the dynamics associated with the measurement of the phase of the Rabi-oscillations or the magnetic flux through the qubit or the effective energy are invariant under the classical trajectory of the observed sensor. Therefore, the formula derived for the evolution of the distribution of the results of a WCM of energy [5], can be used to calculate the classical values of the effective capacity of a qubit. Exploring the continuity of the random process, it is seen that this equation can be transformed to a differential equation of the Fokker-Planck equation (2), and solved analytically.

By increasing the coupling coefficient of a qubit and detector parameter increases, and the dynamics of the system goes first in the regime of quantum jumps, and then frozen in the ground state (the quantum Zeno effect, with a clear continuous measurement). The effect of parametric conversion of energy also disappears.

On the other hand, as this parameter decreases, the inaccurately measured trajectory $\varphi(t)$ and calculated qubit inductance tend to be stochastic. The dispersion is growing. The mathematical or equipment time-dependent averaging smoothes its fluctuations and yield s a limiting zero value. In this case the parametric energy conversion in a qubit associated with a variations in the inductance sign for one low-frequency Rabi oscillations period disappears as well.

III. Conclusion

Thus, in contrast to the simplified models in which the second term of (2) is not taken into account, we can describe ICM the procedure in the qubit more accurately. In particular, to obtain the optimal value of inductive coupling, it is necessary that coherent effects show their maximum manifestation. Experimental studies qualitatively confirm the results. It is shown that there exists an optimal value of the parameter measuring the weakness to observe the effect.