

# Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил

УДК 621.396

Г.В. Альошин, Д.О. Бойко

Українська державна академія залізничного транспорту, Харків

## ВПЛИВ ПОХИБКИ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ФАПЧ З СИНХРОННИМ ДЕТЕКТОРОМ ТА СХЕМОЮ АРП

Отримані залежності щільності розподілу та числові моменти ймовірності відносної амплітуди сигналу від флукуційної складової похибки ФАПЧ та оцінки взаємного впливу цієї похибки на нестабільність амплітуди сигналу на виході синхронного детектору.

**Ключові слова:** ФАПЧ з АРП, синхронний детектор, нестабільність амплітуди.

### Вступ

Вплив похибки фазової синхронізації на якість синхронного детектування не настільки великий, щоб його враховувати у звичайних схемах, де потрібен амплітудний детектор. Але якщо синхронне детектування використовується для автоматичного регулювання підсилення (АРП) з метою стабілізації амплітуди сигналу для схем фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) (рис. 1), то саме використання синхронного детектування для цієї ж мети стає проблематичним.

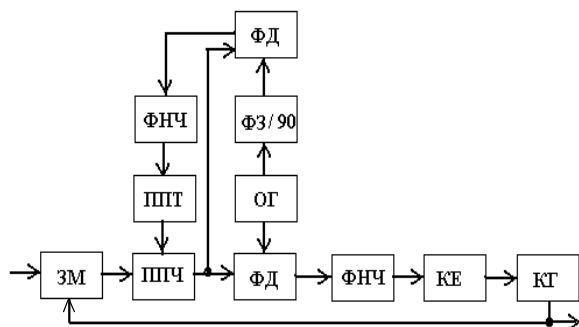


Рис. 1. ФАПЧ з підсилювачем та схемою АРП

На рис. 1 позначено: ЗМ – змішувач, ППЧ – підсилювач проміжної частоти, ФД – фазовий детектор, ФНЧ – фільтр низької частоти, КЕ – керуючий елемент, КГ – керований генератор, ОГ – опорний генератор, ФЗ – фазозсувач, ППТ – підсилювач постійного току.

### Основний матеріал

У одній з кращих структур ФАПЧ [1] (рис. 1), що містить попередній підсилювач проміжної частоти (ППЧ) і синхронний детектор, є свої переваги у завадостійкості за рахунок використання синхро-

нного детектору і ППЧ. Але крім недоліку з погіршенням стійкості за рахунок ППЧ є ще й недолік, що теж погіршує стійкість. Він пов'язаний з впливом нестабільності фази ФАПЧ на нестабільність амплітуди, що у свою чергу впливає на нестабільність фази.

Відомо, що когерентність сигналу доцільно використовувати у всіх випадках для боротьби з ортогональною складовою (по відношенню до фази сигналу) вузькосмугової завади. За рахунок цього можна збільшити відношення сигнал/шум. Але у випадку використання синхронного детектору для АРП ППЧ системи ФАПЧ це може сприяти зменшенню стабільності роботи ФАПЧ.

Оцінимо вплив похибки синхронізації в системі ФАПЧ на середню амплітуду синхронного детектору.

Допустимо, що похибка ФАПЧ невелика. Тоді детекторну характеристику синхронного детектору навколо точної настройки ФАПЧ за фазою можна розкласти у ряд Тейлора з точністю 10%

$$u(\varphi) = U \cos \varphi \approx U(1 - \varphi^2 / 2 + \varphi^4 / 4! - \dots) \approx \\ \approx U(1 - \varphi^2 / 2) \approx U \exp(-\varphi^2 / 2), \quad (1)$$

де  $U$  – максимальне значення напруги;  $\varphi$  – різниця фаз прийнятого та опорного сигналів.

Похибка ФАПЧ при відношенні потужностей сигналу до шуму більше 5 ( $q > 5$ ) згідно [1] має практично нормальний розподіл ймовірності, що обумовлено вузькою смугою утримання та дією декількох рівномірних факторів.

$$p(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x}} \exp\left(-\frac{\varphi^2}{2D_x}\right), \quad (2)$$

де  $D_x$  – дисперсія шумової складової похибки ФАПЧ.

У режимі автосупроводження сигналу за фазою природно, що дисперсія флуктуацій повинна бути менше  $\pi$ , що відповідає півперіоду сигналу. Для цього випадку в межах максимуму доброю апроксимацією характеристики синхронного детектору, тобто, з тією ж точністю, може бути закон:

$$G = \frac{u(\varphi)}{U} = \exp\left(-\frac{\varphi^2}{2}\right), \quad (3)$$

тому що справедлива рівність (1) у першому наближенні.

Цей ефект з точністю до позначень співпадає з ефектом нормальних флуктуацій діаграми спрямованості антени з майже гаусовою діаграмою спрямованості [2].

Скористаємось тим же методом перетворень співвідношень.

Знайдемо щільність розподілу ймовірності відносного рівня сигналу, використовуючи якобіан перетворень.

$$p(G) = 2p(\varphi) \left| \frac{\partial \varphi}{\partial G} \right|. \quad (4)$$

Оскільки

$$\varphi = \sqrt{2 \ln \frac{1}{G}}, \quad (5)$$

то

$$p(G) = \sqrt{\alpha / \pi} \frac{G^{\alpha-1}}{\sqrt{\ln(1/G)}}, \quad (6)$$

де  $\alpha = 1/D_x$ .

Сімейство  $\rho(\alpha, G)$  представлено на рис. 2. Звідси математичне сподівання відносного рівня сигналу дорівнює:

$$M[G] = \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha+1}}, \quad (7)$$

а n-й початковий момент:

$$M[G^n] = \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha+n}}. \quad (8)$$

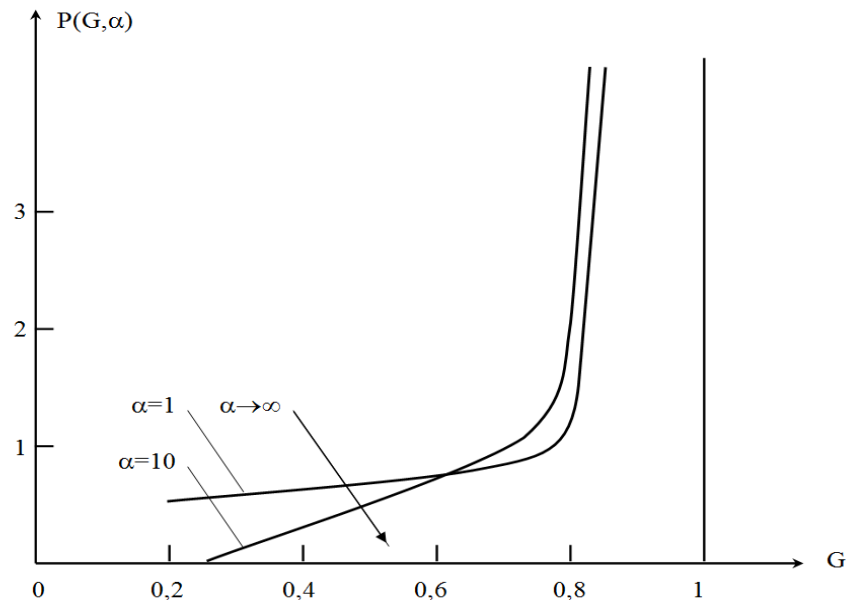


Рис. 2. Щільність розподілу рівня сигналу

Залежності  $M[G]$  і  $M[G^2]$  представлені на рис. 3.

Стосовно енергетичних втрат потрібно вирішити наступне. Принцип синхронного детектування зменшує середній рівень шуму у  $\sqrt{2}$  рази. Але для цього потрібне синхронне детектування з його нестабільністю фази, що вже зменшує рівень сигналу на виході фазового детектору згідно виразам (7,8) та рис. 3.

При нестабільності 0,5 радіан виграшу може не бути. Але це нереально погана робота.

З виразів (7), (8), а також з рис. 3 видно, що врахування зменшення відносної

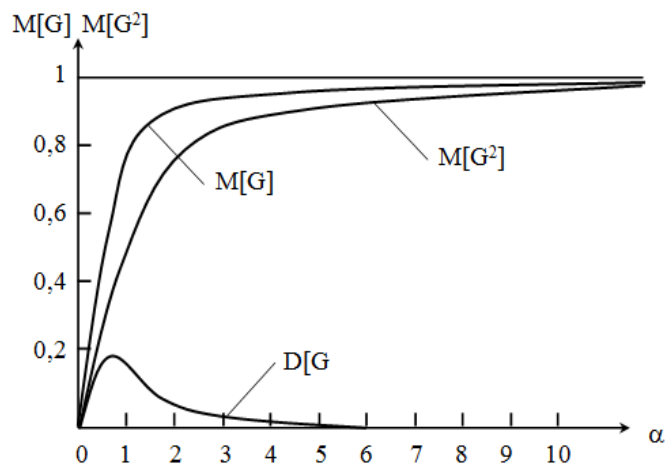


Рис. 3. Математичне сподівання рівнів сигналу

амплітуди за рахунок фазової похибки доцільний вже при  $\alpha \leq 8$ , а при  $\alpha \approx 1$  він просто необхідний, оскільки при  $\alpha = 8$  середні енергетичні втрати складають 10%, а при  $\alpha = 1$  – 50%. Очевидно, що із зменшенням  $\alpha$  зростає роль мультиплікативної завади АРП за рахунок флуктуацій фази ФАПЧ, що має розподіл (6), обумовлений формами розподілу флуктуацій фази і характеристики синхронного детектору.

У роботі [2] доведено, що вплив допустимої нестабільності амплітуди сигналу для системи ФАПЧ не повинна перевищувати відношенню шум/сигнал.

$$G = \frac{u}{U} \leq \frac{1}{q}. \quad (9)$$

Це умова, за якою похибка системи ФАПЧ, що обумовлена нестабільністю амплітуди, не перевищує флуктуаційну похибку. Якщо нам потрібна високоточна система, то треба відповідно стабілізувати амплітуду сигналу

Наприклад, якщо потрібна середня флуктуаційна похибка ФАПЧ у  $5^\circ$ , то відносна нестабільність повинна бути меншою за  $1/36$ .

Таким чином, виникає ситуація, коли за рахунок завади чомусь фаза керованого генератора зменшується. Тоді за рахунок синхронного детектору зменшиться напруга на його виході. Зменшення напруги сигналу на вході фазового детектору призведе до наступного додаткового зменшення фази на його виході.

Можливий зрив синхронізму. Тобто, АРП при наявності синхронного детектору зменшує стійкість ФАПЧ. Потрібен або амплітудний детектор і відказатись від виразу у боротьбі з завадою, або синхронний детектор і ускладнена боротьба за стійкість ФАПЧ.

Без врахування оцінок нестабільностей амплітуди та флуктуаційної складової фази сигналу керованого генератору і без мір до підвищення стійкості не можна отримати значний вигравш у відношенні потужностей сигнал/завада при використанні синхронного детектування в системі ФАПЧ з підсиленням.

## Висновки

1. У роботі була акцентована необхідність підвищення уваги до стабілізації амплітуди сигналу на вході фазового детектору однієї з кращих систем ФАПЧ з попереднім ППЧ і з синхронним детектором.

2. Отримані залежності щільності та числових характеристик розподілу ймовірності середньої відносної амплітуди сигналу від дисперсії флуктуаційної складової похибки ФАПЧ, що дозволяють робити відповідні оцінки.

3. Показано взаємозв'язок параметрів ФАПЧ.

## Список літератури

1. Тузов Г.И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах / Г.И. Тузов. – М.: Сов. Радио, 1967. – 270 с.

2. Альошин Г.В. Оцінка якості інформаційно-вимірвальних систем / Г.В. Альошин. – Х.:УкрДАЗТ, 2008. – 288 с.

Надійшла до редколегії 13.09.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.О. Кузнецов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ НА КАЧЕСТВО ФАПЧ С СИНХРОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ И СХЕМОЙ АРУ

Г.В. Алешин, Д.А. Бойко

*Получены зависимости плотности распределения и числовые моменты вероятности относительной амплитуды сигнала от флуктуационной составляющей погрешности ФАПЧ и оценки взаимного влияния этой погрешности на нестабильность амплитуды сигнала на выходе синхронного детектора.*

**Ключевые слова:** ФАПЧ с АРУ, синхронный детектор, нестабильность амплитуды.

## INFLUENCE OF PHASE SYNCHRONIZATION ERRORS ON THE QUALITY OF THE PLL WITH SYNCHRONOUS DETECTOR AND AGC

G.V. Aleshin, D.A. Boiko

*The dependences of the density and numerical aspects of the relative signal amplitude probability of the fluctuation component of the error loop and evaluate the mutual influence of this error on the instability of the signal amplitude at the output of the synchronous detector.*

**Keywords:** PLL with AGC, synchronous detector, instability of amplitude.