

## INCREASE OF THE RESPONSE SPEED OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR LOAD ANGLE SENSOR

### ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКА УГЛА НАГРУЗКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Serhii M. Novohretskiy  
[sergii.novogretskiy@nuos.edu.ua](mailto:sergii.novogretskiy@nuos.edu.ua)  
ORCID: 0000-0003-0240-1847  
Aleksandr A. Chernov  
[alextchernov@gmail.com](mailto:alextchernov@gmail.com)  
ORCID: 0000-0003-1670-8276

С. Н. Новогрецкий,  
канд. техн. наук, и. о. доц. каф. СЭЭС;  
А. А. Черно,  
канд. техн. наук, доц. каф. КСУ

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

**Abstract.** The increase of the response speed of the load angle measuring means in the dynamic operating mode of a synchronous generator for efficiency upgrading of the automatic regulation systems has been discussed. The aim of the study is the analysis of the possibilities of the mathematical realization of the high-speed load angle sensors. Its development suggests using a microcontroller device with a sampling frequency a sequence higher than the frequencies of the armatures voltage of the synchronous generator. The mathematical algorithm of the calculation of the synchronous machine angle load is offered. It is based on three serial samples of instantaneous values of the voltages of the machine and the synchronous tachogenerator located on the one shaft with the machine and working in the no-load mode. The algorithm which allows taking into account the alterations of the voltages frequency in the transient mode is suggested for the reduction of the dynamic error of the angle measurement. The calculation model which allowed analyzing the work of the mathematical algorithm when changing uniformly the phase shift angle between two sinusoidal signals is developed. The results of the calculation showed that the algorithm allows monitoring with high accuracy the behaviour of the phase shift angle between two sinusoidal signals for the time period a sequence shorter than the periods of the studied signals.

**Keywords:** synchronous generator; load angle; algorithm.

**Аннотация.** Рассмотрен алгоритм расчета угла нагрузки синхронного генератора, основанный на математических операциях над тремя последовательными выборками напряжений синхронного генератора и синхронного тахогенератора, расположенного на одном валу с ним. Показана высокая точность и приемлемое быстродействие алгоритма при отслеживании угла нагрузки в динамических режимах.

**Ключевые слова:** синхронный генератор; угол нагрузки; алгоритм.

**Анотація.** Розглянуто алгоритм розрахунку кута навантаження синхронного генератора, заснований на математичних операціях над трьома послідовними вибірками напруг синхронного генератора і синхронного тахогенератора, розташованого на одному валові з ним. Показано високу точність і прийнятну швидкість алгоритму при відстеженні кута навантаження в динамічних режимах.

**Ключові слова:** синхронний генератор; кут навантаження; алгоритм.

#### REFERENCES

- [1] Kasparov E.A., Sokolov N.I. Upravleniye regimom raboty sinkhronnykh kompensatorov s poperechnoy obmotkoy vzbuzhdeniya na rotore [Control of the operating mode of synchronous compensators with the field quadrature winding on the rotor]. *Elektricheskie stantsii* [Electric power stations], 1976, no. 9, pp. 62–66.
- [2] Kochegarov Yu.I., Yakimenko Yu.V. Izmereniye chastoty v pribornom module releynoy zashity i avtomatiki «Diamant» [Measurement of the frequency in the instrument module of the relay protection and automatics «Diamant»]. *Elektricheskie seti i sistemy – Electric networks and systems*, 2013, no. 3, pp. 70–72.
- [3] Osin I.L., Shakaryan Yu.G. *Elektricheskiye mashiny: Sinkhronnyye mashiny* [Electric machines: Synchronous machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 304 p.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Для лабораторного исследования динамических режимов работы и для организации эффективных обратных связей в системах автоматического регулирования наличие быстродействующего датчика угла нагрузки позволяет значительно расширить возможности исследовательской и инженерной деятельности. Например, введение обратной связи по отклонению угла нагрузки в канал регулирования возбуждения дает возможность увеличить диапазон углов статически устойчивой работы синхронного генератора на мощную сеть [3], а также увеличить предельное значение потребляемой реактивной мощности синхронных компенсаторов [1]. Однако измерить угол нагрузки с требуемой точностью в промежутке времени, который на порядок меньше периода напряжения, весьма сложно.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Угол нагрузки синхронной машины – это угол между изображающим вектором ЭДС возбуждения и вектором напряжения якоря машины, которые в режиме холостого хода совпадают по фазе. Поэтому большая часть датчиков угла нагрузки основана на сравнении синусоиды напряжения якоря генератора и синусоиды тахогенератора, который расположен на валу генератора и работает на холостом ходу. Изменение фазового сдвига между этими двумя напряжениями будет соответствовать изменению угла нагрузки, но измерение выполняется не чаще одного раза в полпериод, что для сети частотой 50 Гц предполагает минимальную задержку времени 10 мс. С учетом действия дополнительных фильтров высших гармоник, которые могут быть использованы для выделения полезного сигнала, постоянная времени таких датчиков принимает неприемлемые значения для исследования переходных процессов синхронного генератора. В [2] предложено измерять частоту напряжения сети переменного тока на основании *n*-го числа выборок мгновенного значения напряжения и дискретного преобразования Фурье, что позволит повысить точность и быстродействие датчика частоты. Тот же принцип, но в более упрощенном виде, можно использовать и при определении угла нагрузки.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – разработка на базе микроконтроллерной техники датчика угла нагрузки с периодом измерения на порядок ниже периода изменения напряжения якоря синхронного генератора.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

Упрощение алгоритма расчета угла нагрузки по сравнению с изложенным в [2] заключается в использовании только трех значений последовательной вы-

борки напряжения якоря  $u_1(t)$  и напряжения тахогенератора  $u_2(t)$ .

Рассмотрим возможность определения изменения во времени угла сдвига фаз  $Q$  между этими двумя синусоидальными сигналами:

$$u_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t); \quad u_2(t) = A_2 \sin(\omega_2 t + \Theta).$$

В установившемся режиме  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , а в переходных синусоиды могут смещаться относительно друг друга, что эквивалентно приращению частоты  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ . Положим, что через одинаковый промежуток времени дискретизации  $\Delta T$  были сняты подряд три мгновенных значения каждого сигнала:

$$u_{1-}(t) = A_1 \sin(\omega_1 t - \Delta\alpha_1); \quad u_{2-}(t) = A_2 \sin(\omega_2 t - \Delta\alpha_2 + \Theta);$$

$$u_{10}(t) = A_1 \sin(\omega_1 t); \quad u_{20}(t) = A_2 \sin(\omega_2 t + \Theta);$$

$$u_{1+}(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \Delta\alpha_1); \quad u_{2+}(t) = A_2 \sin(\omega_2 t + \Delta\alpha_2 + \Theta);$$

$$\Delta\alpha_1 = \omega_1 \cdot \Delta T; \quad \Delta\alpha_2 = \omega_2 \cdot \Delta T,$$

где  $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2$  – углы дискретизации для каждого сигнала.

Путем несложных тригонометрических преобразований можно доказать следующее тождество:

$$\cos(\Theta) = \frac{B_{1-} + B_{1+} - 2 B_0 \cos(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)}{A_1 A_2 [1 - \cos(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)]}; \quad (1)$$

$$B_{1-} = u_{1-}(t) \cdot u_{2-}(t); \quad B_0 = u_{10}(t) \cdot u_{20}(t); \quad B_{1+} = u_{1+}(t) \cdot u_{2+}(t).$$

Если задать начальный угол сдвига между синусоидальными сигналами равным 90 электрических градусов путем относительного смещения роторов машин, то получим синусоидальную зависимость изменения угла сдвига во времени:

$$\sin(\beta) = \cos(\pi/2 - \beta) = \cos(\Theta).$$

Последнее выражение очень интересно, так как позволяет с некоторой долей погрешности в достаточно большом диапазоне изменения угла считать  $\sin(\beta) = \beta$ , т. е. при реализации рассмотренного математического алгоритма с использованием микропроцессорной элементной базы можно упростить программу исключением тригонометрических преобразований.

При выводе уравнения (1) полагалось  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , что допустимо, если учесть разность частот при определении углов  $\Delta\alpha_1$  и  $\Delta\alpha_2$ . Можно приравнять  $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2$ , аргументируя малым значением  $\Delta\omega$  по сравнению с величиной  $\omega$ . Однако это приведет к появлению в переходных режимах синусоидальной скоростной ошибки большой амплитуды и частотой  $\omega_{\text{ош}} = 2 \omega$ . Это нежелательное явление можно скомпенсировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \cos(2\Delta\alpha_1) &= \frac{2(u_{1-}(t)u_{1+}(t) - u_{10}(t)^2)}{A_1^2} + 1; \\ \cos(2\Delta\alpha_2) &= \frac{2(u_{2-}(t)u_{2+}(t) - u_{20}(t)^2)}{A_2^2} + 1; \\ \cos(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) &\approx \frac{\cos(2\Delta\alpha_1) + \cos(2\Delta\alpha_2)}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) оперируют только результатами трех подряд выборок исследуемых сигналов, производя над ними простые математические действия, которые просто реализуются в микроконтроллерной среде. В среде MathLAB была собрана математическая модель рассмотренного алгоритма, представленная на рис. 1–4.

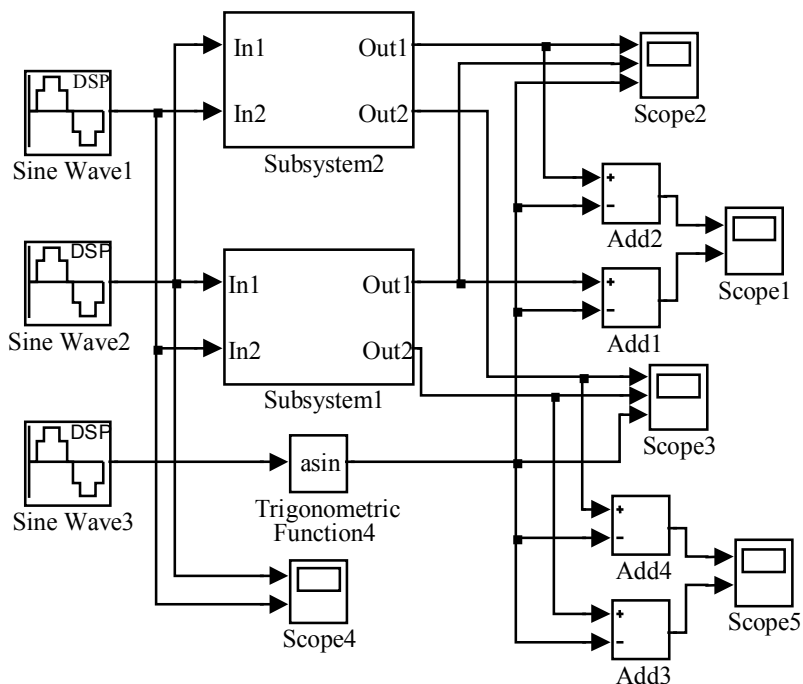


Рис. 1. Общая модель сравнения реального изменения угла во времени (блок Sine Wave3) с расчетными согласно рассмотренным алгоритмам при учете (подсистема Subsystem2) и без учета (Subsystem1) формулы (2)

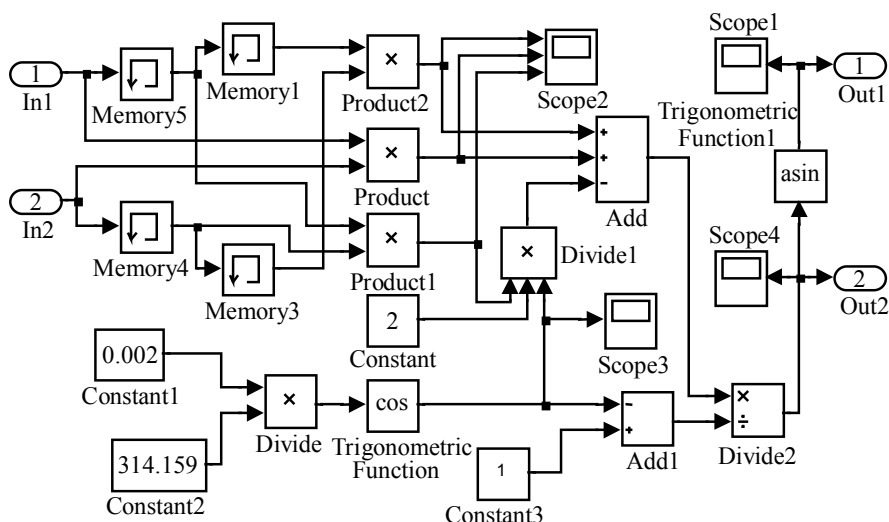


Рис. 2. Модель подсистемы Subsystem2, реализующей алгоритм расчета угла без учета уточняющей формулы (2)

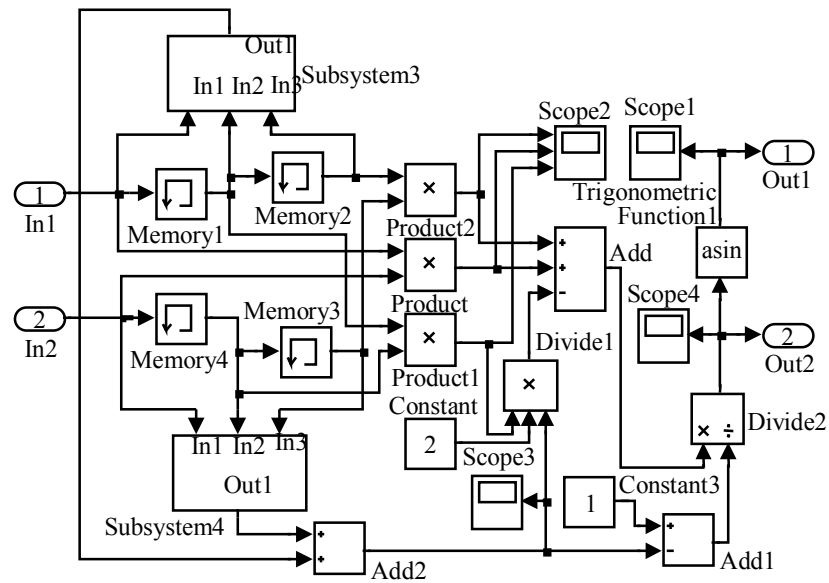


Рис. 3. Модель подсистемы Subsystem1, реализующей алгоритм расчета угла при учете уточняющей формулы (2)

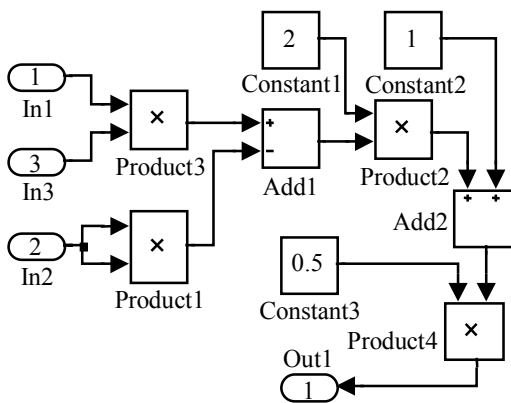


Рис. 4. Модель подсистем Subsystem3 и Subsystem4, реализующих алгоритм уточнения  $\cos(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)$  по формуле (2)

Для моделирования были приняты следующие условия:

- основная частота  $\omega = \omega_1 = 100 \pi \text{ с}^{-1}$  ( $f = 50 \text{ Гц}$ );
- частота второго сигнала  $\omega_2 = 120 \pi \text{ с}^{-1}$  ( $f = 60 \text{ Гц}$ ) (если полагать установившееся значение  $\omega_2 = 100 \pi \text{ с}^{-1}$ , то получаем пилообразное изменение во времени угла сдвига фаз со скоростью  $20 \pi \text{ рад/с}$  или  $1800$  электрических градусов в секунду, т. е. за период основного сигнала угол линейно изменяется на  $36$  электрических градусов);

- время дискретизации  $\Delta T = 0,001 \text{ с}$  (двадцать выборок за период основного сигнала);
- амплитуды сигналов равны единице:  $A_1 = A_2 = 1$ ;
- задаемся начальным сдвигом фаз в  $90$  электрических градусов и измеряем угол  $\beta$ .

Результаты расчетов представлены на рис. 5. Как видно из графиков, пренебрегая изменением углов  $\Delta\alpha_1$  и  $\Delta\alpha_2$  и принимая их значения равными ( $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2$ ), получаем значительную скоростную ошибку (рис. 5, в, г), хотя в установившемся режиме ошибка измерения не зависит от уточнения углов  $\Delta\alpha_1$  и  $\Delta\alpha_2$ , т. е. использование формул (2) позволяет резко уменьшить динамическую ошибку без дополнительных фазовых сдвигов полезного сигнала. Также графики на рис. 5, б, г наглядно показывают, что замена  $\beta$  на  $\sin(\beta)$  несущественно влияет на ошибку в диапазоне изменения угла  $\pm 0,52 \text{ рад}$  ( $\pm 30$  эл. град). В то же время в установившемся режиме отличие  $\beta$  от  $\sin(\beta)$  при  $\beta = 0,52 \text{ рад}$  ( $30$  эл. град) составляет  $0,02 \text{ рад}$  ( $1,2$  эл. град), а при  $\beta = 1,04 \text{ рад}$  ( $60$  эл. град) составляет  $0,15 \text{ рад}$  ( $9$  эл. град). Что касается динамической ошибки, то она при использовании формул (2) практически во всем диапазоне изменения угла находится в пределах  $0,05 \dots 0,1 \text{ рад}$  ( $3 \dots 6$  эл. град).

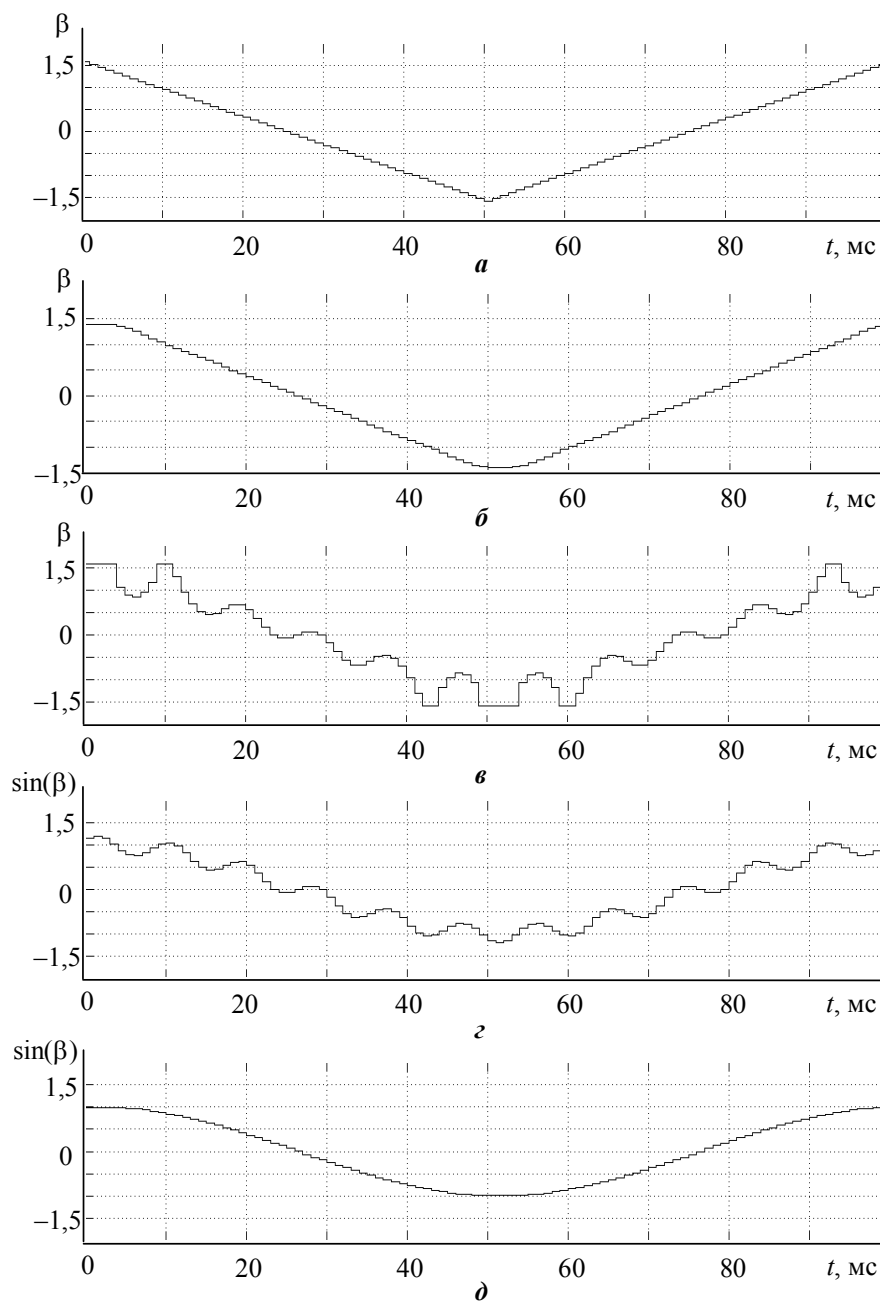


Рис. 5. Графики изменения во времени угла сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами: *a* – действительное значение  $\beta$ ; *b* – расчетное значение  $\beta$  с учетом формулы (2); *в* – расчетное значение  $\beta$  без учета формулы (2); *г* – расчетное значение  $\sin(\beta)$  без учета формулы (2); *д* – расчетное значение  $\sin(\beta)$  с учетом формулы (2)

### ВЫВОДЫ

1. В предложенной математической модели датчика расчет угла нагрузки синхронной машины производится по трем подряд выборкам мгновенного значения напряжения машины и синхронного тахогенератора, установленного на одном валу с машиной и работающего на холостом ходу.

2. Математическая модель позволяет учитывать изменения частоты напряжений в переходных режимах

для уменьшения динамической ошибки измерения угла, а также может быть реализована с помощью простых арифметических действий на базе микроконтроллерной техники.

3. Датчик позволяет с высокой точностью отслеживать характер изменения угла сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами за период времени на порядок меньше периодов исследуемых сигналов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Каспаров, Э. А.** Управление режимом работы синхронных компенсаторов с поперечной обмоткой возбуждения на роторе [Текст] / Э. А. Каспаров, Н. И. Соколов // Электрические станции. – 1976. – № 9. – С. 62–66.
- [2] **Кочегаров, Ю. И.** Измерение частоты в приборном модуле релейной защиты и автоматики «Діамант» [Текст] / Ю. И. Кочегаров, Ю. В. Якименко // Электрические сети и системы. – К. : ООО «Гнозис», 2013. – № 3. – С. 70–72.
- [3] **Осин, И. Л.** Электрические машины. Синхронные машины [Текст] : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высш. школа, 1990. – 304 с.

---

© С. М. Новогрецький, О. О. Черно

Надійшла до редколегії 17.11.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. *А. А. Ставинський*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2014