

МОЖЛИВОСТІ РЕСТРУКТУРИЗАЦІЇ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ СТАБІЛІЗАТОРА ЗМІННОЇ НАПРУГИ З ВОЛЬТОДОДАВЧИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

К.О. Липківський, докт. техн. наук, **А.Г. Мажаровський**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

У виконавчих структурах стабілізаторів напруги змінного струму, в складі яких є вольтододавчий трансформатор (ВДТ), мостовий комутатор (МК) виконується розподіленням – без спільної точки ключових елементів (КЕ), що ускладнює їх управління та тепловідведення. Пропонується створення такої спільної точки шляхом секціонування первинної обвитки ВДТ та варіювання розміщення отриманих секцій в плечах МК, яке ґрунтується на принциповій багатоваріантності побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС). Отримано аналітичні залежності, що дають змогу порівнювати між собою можливі варіанти такої структури. Бібл. 4, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: стабілізатор, виконавча структура, вольтододавчий трансформатор, ключові елементи, спільна точка, встановлена потужність.

Єдиним класом перетворювачів напруги змінного струму, що апріорі не генерує у мережу або до споживача небажаних гармонічних складових струму/напруги, є перетворювачі з так званою трансформаторно-ключовою виконавчою структурою – ТКВС [1]. Один з найбільш поширених видів ТКВС передбачає використання вольтододавчого трансформатора – ВДТ, вторинна обвитка якого вмикається послідовно у коло основного струму, а напруга на первинній обвитці регулюється необхідним чином переважно за допомогою напівпровідникових ключових елементів (КЕ), внаслідок чого відбувається відповідне регулювання або стабілізація напруги живлення споживача [4].

Найпростіший ТКВС цього типу, який характеризується зниженими відносно силових струмами, що протікають по напівпровідникових ключових елементах з природною комутацією (тиристорах, тріаках), містить вольтододавчий трансформатор, первинна обвитка якого перемикається згідно/зустрічно ключами мостового комутатора, що керується дискретно-разово [3]. Така ТКВС може працювати в одному з трьох режимів – вольтододавання (при знижених вхідних напругах), прямої передачі напруги мережі до споживача та вольтовіднімання (при підвищених вхідних напругах). Особливістю цієї структури є те, що силові ключі комутатора розділено на дві групи по два ключі, що не мають спільної точки. При цьому в системі їх керування доводиться використовувати трансформатор з кількома (у даному випадку – чотирма) вихідними обвитками, міжобвиткова ізоляція яких повинна розраховуватися на максимальну напругу у пристрої не тільки між первинною та вторинною обвитками з керуючими вузлами, а й між окремими вторинними, що вимагає додаткових технологічних та конструктивних заходів і відповідно матеріальних витрат. Крім того, у комутаторі, що складається з окремих груп ключів, конструктивно кожна з них повинна мати свій радіатор для відведення тепла або, якщо він єдиний, треба передбачити заходи для ізоляції кожної з груп, що також пов'язано з певними ускладненнями.

Для усунення зазначених недоліків видається доцільною реструктуризація ТКВС таким чином, щоб при збереженні функціональності та всіх основних позитивних властивостей таких структур ключові елементи комутатора отримали спільну точку.

Мета роботи: дослідити багатоваріантність і особливості виконання вольтододавчого трансформатора стабілізатора напруги з мостовим комутатором, ключові елементи якого мають єдину спільну точку (назвемо її мостовою структурою – МС).

У роботі [2] було запропоновано первинну обвитку ВДТ поділити на окремі секції і винести їх з діагоналі мостового комутатора у його плечі, завдяки чому всі КЕ приєднуються до єдиної точки. У зв'язку з тим, що така процедура поділу й переміщення секцій обвиток по

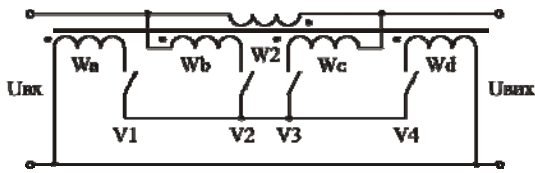


Рис. 1

відносними значеннями витків секцій первинної обвитки: $a=W_a/W_2$, $b=W_b/W_2$, $c=W_c/W_2$, $d=W_d/W_2$.

(Зауважимо, що таке рознесення секцій первинної обвитки ВДТ крім задекларованої мети – організації спільної точки КЕ – забезпечує можливість переходу до так званої модернізованої мостової структури з більш широкими функціональними можливостями, про що мова піде згодом).

При трьох можливих станах ($J=3$) звичайної мостової структури її характеристика вхід-вихід на полі стабілізації має вигляд, наведений на рис. 2 а, де μ та ρ – нормовані по номінальній вихідній напрузі значення мінімальної та максимальної вхідної напруги ($\mu=U_{\text{вх min}}/U_{\text{вих н}}$, $\rho=U_{\text{вх max}}/U_{\text{вих н}}$), δ – похибка стабілізації, а кути α_1 , α_2 , α_3 визначають коефіцієнти передачі ТКВС за напругою ($K_1=\arctg \alpha_1$, $K_2=\arctg \alpha_2=1$, тобто $\alpha_2=\pi/4$; $K_3=\arctg \alpha_3$). Якщо позначити, як і у попередніх роботах авторів, $(1+\delta)/(1-\delta)$ через γ , то перехід з першого стану в другий (і навпаки) буде відбуватися при відносній вхідній напрузі, що дорівнюватиме $\mu\gamma$, від другої до третьої при $\mu\gamma^2$. Крім того, зрозуміло, що при цьому $K_1=\gamma$, $K_3=1/\gamma$, а при $K_2=1$, маємо $\mu\gamma=1-\delta=2\gamma/(\gamma+1)$, звідки знаходимо $\mu=2/\gamma(\gamma+1)$ та $\rho=\mu\gamma^3=2\gamma^2/(\gamma+1)$, тобто $\gamma=\sqrt[3]{\rho/\mu}$. Таким чином, задана нестабільність (δ або γ) чітко визначає межі діапазону зміни вхідної напруги, в якому відбувається стабілізація вихідної напруги.

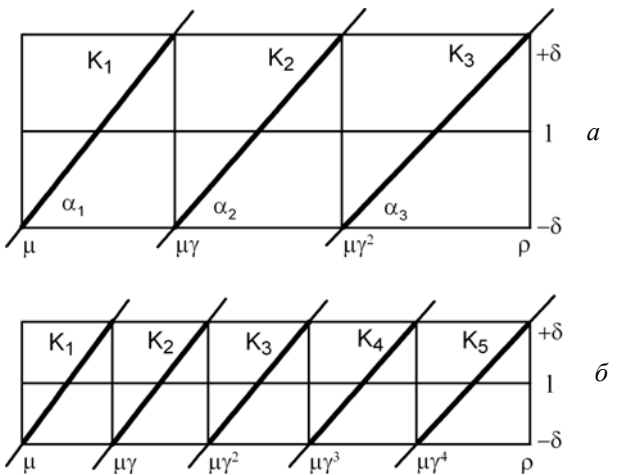


Рис. 2

Як уже зазначалося, можливі різні варіанти розташування секцій первинної обвитки ВДТ. Розглянемо, наприклад, варіант з секціями W_a та W_b ($W_c=W_d=0$). У першому режимі (задіяні ключі V_2 , V_4) максимальне значення вхідної напруги (відносно $U_{\text{вих н}}$) $\mu\gamma=1-\delta=2/(\gamma+1)$ прикладається до секції W_b , а вихідна напруга $U_{\text{вих max}}^*=1-\delta=2\gamma/(\gamma+1)$ знімається з послідовно з'єднаних секції W_b та обвитки W_2 , тобто $K_1=\gamma=(W_b+W_2)/W_2=1+1/b$, звідки знаходимо $b=1/(\gamma-1)$. При цьому через W_2 тече струм $I_{\text{вих max}}=I_{\text{вих н}}2\gamma/(\gamma+1)$, вхідний струм дорівнює $I_{\text{вх max}}=K_1I_{\text{вих max}}$, а струм у W_b

визначається їх різницею $I_{Wb}=(\gamma-1)I_{\text{вих max}}$. У другому режимі (задіяні ключі V_2 та V_3) внаслідок короткого замикання обвиток ВДТ (струми обвиток дорівнюють відповідно $I_{W2}=I_{\text{вих max}}/\gamma$ та $I_{Wb}=I_{\text{вих max}}(\gamma-1)/\gamma$, що у γ разів менше, ніж у попередньому режимі) вхідна напруга $U_{\text{вх}}=\mu\gamma^2=2\gamma/(\gamma+1)$ надходить безпосередньо до споживача. У третьому режимі (задіяні ключі V_1 та V_3) відносна максимальна вхідна напруга $\rho=2\gamma^2/(\gamma+1)$ подається на послідовно з'єднані секції W_2 та W_a , напруга останньої прикладається до споживача, тобто $K_3=1/\gamma=W_a/(W_2+W_a)$, звідки знаходимо $a=1/(\gamma-1)=b$. Максимальний вихідний струм, як і у попередніх режимах, дорівнює $I_{\text{вих max}}$, вхідний $I_{\text{вх}}=I_{\text{вих max}}/\gamma$, а струм секції W_a визначається

ся їх різницею $I_{\text{вих max}}(\gamma - 1)/\gamma$. Саме у цьому режимі до обвитки W_2 прикладається найбільша напруга $U_{W2 \text{ max}} = U_{\text{вих}} \cdot 2\gamma(\gamma - 1)/(\gamma + 1) = (\gamma - 1)U_{\text{вих max}}$, і цю напругу будемо брати за визначальну при розрахунку напруг секцій: $U_{Wa} = aU_{W2} = U_{\text{вих max}}$, $U_{Wb} = bU_{W2} = U_{\text{вих max}}$.

Встановлена (розрахункова) потужність п'ятиобвиткового ВДТ визначається формулою

$$P_{\text{ВДТ}} = 0,5(U_{W2 \text{ max}}I_{W2 \text{ max}} + U_{Wa \text{ max}}I_{Wa \text{ max}} + U_{Wb \text{ max}}I_{Wb \text{ max}} + U_{Wc \text{ max}}I_{Wc \text{ max}} + U_{Wd \text{ max}}I_{Wd \text{ max}}). \quad (1)$$

Оскільки тут $c=d=0$, то

$$P_{\text{ВДТ}} = 0,5(U_{W2 \text{ max}}I_{W2 \text{ max}} + U_{Wa \text{ max}}I_{Wa \text{ max}} + U_{Wb \text{ max}}I_{Wb \text{ max}}).$$

Підставляючи знайдені вище складові, отримуємо

$$P_{\text{ВДТ}} = 0,5P_{\text{вих max}} [(\gamma - 1) + (\gamma - 1)/\gamma + (\gamma - 1)],$$

або у нормованому вигляді

$$P_{\text{ВДТ}}^* = P_{\text{ВДТ}} / P_{\text{вих max}} = (\gamma - 1)(2\gamma + 1)/2\gamma. \quad (2)$$

Аналогічними цьому варіанту (перший рядок у таблиці) є ще три можливі варіанти з двома секціями первинної обвитки (рядки 2–4 таблиці), а також варіант з чотирма однаковими (але вдвічі меншими за кількістю витків) секціями (рядок 5 таблиці). Зрозуміло, що останній варіант дещо поступається попереднім за технологічністю внаслідок збільшення кількості секцій. Як видно з таблиці, незважаючи на зміну в розташуванні секцій ВДТ, його встановлена потужність залишається однаковою.

Від узагальненої ТКВС (рис. 1) можна, як декларувалося вище, перейти до модернізованої мостової структури (ММС), що відзначається – при тій же кількості ключових елементів – більшою кількістю можливих робочих станів (п'ять замість трьох), тобто суттєво меншою похибкою стабілізації.

Почнемо з варіанту, коли у всіх плечах мостового комутатора розміщені відповідні секції первинної обвитки ВДТ (рядок 6 таблиці). Тут поле стабілізації поділяється на п'ять частин, яким відповідає п'ять нетотожних робочих режимів (рис. 2 б), тобто при тому ж діапазоні зміни вхідної напруги (при тих же μ та ρ) отримуємо значно меншу, ніж у МС, похибку стабілізації δ , бо тут $\gamma = \sqrt[5]{\rho/\mu} < \sqrt[3]{\rho/\mu}$. У ММС безпосередня передача вхідної напруги до споживача відбувається у третьому режимі ($K_3=1$), коли працюють ключі V_2 та V_3 . Звідси маємо $\mu\gamma^3 = 2\gamma/(\gamma + 1)$, $\mu = 2/\gamma^2(\gamma + 1)$, $\rho = 2\gamma^3/(\gamma + 1)$. Переходи від режиму до

№	a	b	c	d	γ	$P_{\text{ВДТ}}^*$
1	$\frac{1}{\gamma - 1}$	$\frac{1}{\gamma - 1}$	0	0	$\sqrt[3]{\frac{\rho}{\mu}}$	$\frac{(\gamma - 1)(2\gamma + 1)}{2\gamma}$
2	0	0	$\frac{1}{\gamma - 1}$	$\frac{1}{\gamma - 1}$		
3	$\frac{1}{\gamma - 1}$	0	0	$\frac{1}{\gamma - 1}$		
4	0	$\frac{1}{\gamma - 1}$	$\frac{1}{\gamma - 1}$	0		
5	$\frac{1}{2(\gamma - 1)}$	$\frac{1}{2(\gamma - 1)}$	$\frac{1}{2(\gamma - 1)}$	$\frac{1}{2(\gamma - 1)}$		
6	$\frac{0,5\gamma}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{1 + 0,5\gamma}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{1 + 0,5\gamma}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{0,5\gamma}{\gamma^2 - 1}$	$\sqrt[5]{\frac{\rho}{\mu}}$	$\frac{(\gamma^2 - 1)(\gamma^3 + 2\gamma^2 + \gamma + 1)}{2\gamma^2}$
7	$\frac{\gamma}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{\gamma + 1}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{1}{\gamma^2 - 1}$	0		$\frac{(\gamma^2 - 1)(2\gamma^3 + 2\gamma^2 + 1)}{2\gamma^2}$

8	0	$\frac{1}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{\gamma + 1}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{\gamma}{\gamma^2 - 1}$	$\frac{(\gamma^2 - 1)(2\gamma^2 + 2\gamma + 1)}{2\gamma^2}$
---	---	--------------------------	-----------------------------------	-------------------------------	---

режиму будуть відбуватися при нормованих значеннях вхідної напруги $\mu\gamma = 2/\gamma(\gamma_2 + 1)$, $\mu\gamma^2 = 2/(\gamma + 1)$, $\mu\gamma^3 = 2\gamma/(\gamma + 1)$ та $\mu\gamma^4 = 2\gamma^2/(\gamma + 1)$.

У першому режимі (працюють ключі $V1$ та $V2$) $K_1 = \gamma^2 = (W_2 + W_b - W_a)/(W_b - W_a)$, звідки $(b-a) = 1/(\gamma^2 - 1)$; $I_{\text{вх}}^* = I_{\text{вх}}/I_{2\text{max}} = K_1 = \gamma^2$, $I_{V1}^* = I_{V2}^* = I_{W_a}^* = I_{W_b}^* = \gamma^2 - 1$.

У другому режимі (працюють ключі $V2$ та $V4$) $K_2 = \gamma = (W_2 + W_b + W_d)/(W_b + W_d)$, звідки $(b+d) = 1/(\gamma - 1)$; $I_{\text{вх}}^* = K_2 = \gamma$, $I_{V2}^* = I_{V4}^* = I_{W_b}^* = I_{W_d}^* = \gamma - 1$.

У третьому режимі – короткого замикання обвиток ВДТ (працюють $V2$ та $V3$) – їх струми визначаються наступним чином: $I_{W_2}^* = (b+c)/(1+b+c)$, $I_{W_b}^* = I_{W_c}^* = 1/(1+b+c)$.

У четвертому режимі (працюють ключі $V1$ та $V2$) $K_4 = 1/\gamma = (W_a + W_c)/(W_2 + W_a + W_c)$, звідки $(a+c) = 1/(\gamma - 1)$, $I_{V1}^* = I_{V3}^* = I_{W_a}^* = I_{W_c}^* = (\gamma - 1)/\gamma$.

Нарешті, у п'ятому режимі (працюють ключі $V3$ та $V4$) $K_5 = 1/\gamma^2 = (W_c - W_d)/(W_2 + W_c - W_d)$, звідки $(c-d) = 1/(\gamma^2 - 1)$, $I_{V3}^* = I_{V4}^* = I_{W_c}^* = I_{W_d}^* = (\gamma^2 - 1)/\gamma^2$. Зауважимо, що саме у цьому режимі до обвитки W_2 прикладається найбільша напруга $U_{W_2\text{max}} = (\gamma^2 - 1)U_{\text{вих max}}$, яка буде визначати й найбільші напруги на всіх секціях первинної обвитки ВДТ.

Аналіз досліджених режимів показав, що вони можуть бути реалізовані лише за умови $a=d=0,5\gamma/(\gamma^2 - 1)$ та $b=c=(1+0,5\gamma)/(\gamma^2 - 1)$.

Встановлена потужність ВДТ у такій ММС визначається формулою (1), яка після підстановки визначених напруг і струмів у окремих секціях, буде мати вигляд

$$P_{\text{ВДТ}} = 0,5P_{\text{вих max}} \left[(\gamma^2 - 1) + 0,5\gamma(\gamma^2 - 1) + (1 + 0,5\gamma)(\gamma^2 - 1) + (1 + 0,5\gamma)(\gamma^2 - 1)/\gamma^2 + 0,5\gamma(\gamma^2 - 1)/\gamma^2 \right]$$

або у нормованому вигляді

$$P_{\text{ВДТ}}^* = (\gamma^2 - 1) (\gamma^3 + 2\gamma^2 + \gamma + 1) / 2\gamma^2.$$

Можливі й два варіанти ММС лише з трьома секціями первинної обвитки ВДТ: без витків у секції W_d ($d=0$) – сьомий рядок таблиці (при цьому $a+c=b=1/(\gamma - 1)$) або без витків у секції W_a ($a=0$) – восьмий рядок таблиці (при цьому $b+d=c=1/(\gamma - 1)$). Як видно, у цих варіантах формули для визначення встановленої потужності ВДТ дещо відрізняються від першого варіанта ММС, хоча чисельно їх різниця, як буде проілюстровано далі, незначна.

Для порівняння розглянутих варіантів ТКВС задамо для ТКВС з МС значення похибки $\delta = \pm 4,85\%$ (на 3% менше припустимого стандартом відхилення напруги $\pm 5\%$ при номінальній вхідній/вихідній напрузі 220 В). Тоді $\gamma = (1 + \delta)/(1 - \delta) = 1,102$, $\mu = 2/\gamma(\gamma + 1) = 0,864$, $\rho = 2\gamma^2/(\gamma + 1) = 1,1563$, звідки $U_{\text{вих max}} = 230,67$ В, $U_{\text{вих min}} = 209,33$ В, $U_{\text{вх max}} = 254,4$ В, $U_{\text{вх min}} = 190,1$ В, $P_{\text{ВДТ}}^* = 0,148$. Щодо ключових елементів, то вони розраховуються на струми $(\gamma - 1)I_{\text{вих max}} \approx 0,1 I_{\text{вих max}}$, тобто втрати в них і радіатори для тепловідведення будуть незначними.

Зберігаючи ті ж самі μ та ρ , знайдемо параметр γ для ТКВС з ММС: $\gamma = \sqrt[5]{1,1563/0,864} = 1,06$, звідки визначаємо, що $\delta = \pm 2,91\%$, тобто у ММС похибка стабілізації зменшилася у 1,67 разу. При цьому $U_{\text{вих max}} = 226,4$ В, $U_{\text{вих min}} = 213,6$ В. Ключові елементи при цьому слід розраховувати на струм $(\gamma^2 - 1)I_{\text{вих max}} = 0,1236 I_{\text{вих max}}$, що дещо більше, ніж у ТКВС з МС. Щодо розрахункової потужності ВДТ, то для варіантів ММС трьох останніх рядків таблиці відповідно маємо $P_{\text{ВДТ6}}^* = 0,3024$, $P_{\text{ВДТ7}}^* = 0,3105$, $P_{\text{ВДТ8}}^* = 0,2952$. Зростання цього

параметра у ММС відносно МС є певною "платою" за суттєве зростання точності стабілізації без збільшення кількості ключових елементів.

Якщо у ММС не ставити за мету зменшення похибки стабілізації, тобто залишити $\gamma=1,102$, як у МС, то можна значно (приблизно в 1,7 разу) розширити припустимий діапазон зміни вхідної напруги, а саме отримати $\rho=1,274$ ($U_{\text{вх max}}=280,8$ В), $\mu=0,784$ ($U_{\text{вх min}}=172,5$ В). Проте при цьому відповідно (також майже в 1,7 разу) зросте розрахункова встановлена потужність ВДТ: $P_{\text{ВДТ6}}^*=0,518$, $P_{\text{ВДТ7}}^*=0,532$, $P_{\text{ВДТ8}}^*=0,505$.

Таким чином, проведений порівняльний аналіз свідчить, що є багато достатньо простих варіантів ТКВС з ВДТ, в яких всі напівпровідникові ключові елементи комутатора мають спільну точку. Залежно від цільової функції оптимізації можна обирати варіанти, в яких необхідна точність стабілізації забезпечується або при мінімізації кількості ключових елементів, або при мінімізації встановленої (розрахункової) потужності вольтодобавочного трансформатора.

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наук. думка, 1983. – 216 с.
2. Пат. на корисну модель 67805, Україна, МПК G05F 5/00, H02M 5/00. Пристрій для регулювання величини напруги змінного струму / К.О. Липківський, В.А. Халіков, А.Г. Можаровський // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 5.
3. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting // IEEE Power Electronics Society News – letter/ Forth Quarter – 2007. – Vol. 19. – № 4. – P. 11–20.
4. Stemmler H., Güth G. Der Vollstatische Querregler, eine neue Möglichkeit zur Leistungssteuerung in Drehstromnetzen // Brown Boveri Mitteilungen. – 1982. – V. 69. – № 3. – P. 73–78.

УДК 621.314

К.А. Липковский, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Возможности реструктуризации исполнительного органа стабилизатора переменного напряжения с вольтодобавочными трансформаторами

В исполнительных структурах стабилизаторов напряжения переменного тока, в составе которых есть вольтодобавочный трансформатор (ВДТ), мостовой коммутатор (МК) выполняется распределенным – без общей точки ключевых элементов (КЕ), что усложняет их управление и теплоотвод. Предлагается создание такой общей точки путем секционирования первичной обмотки ВДТ и вариации размещения полученных секций в плечах МК, которая основывается на принципиальной многовариантности построения трансформаторно-ключевых исполнительных структур (ТКИС). Получены аналитические зависимости, позволяющие сравнивать между собой возможные варианты такой структуры. Библ. 4, рис. 2, таблица.

Ключевые слова: стабилизатор, исполнительная структура, вольтодобавочный трансформатор, ключевые элементы, общая точка, установленная мощность.

К.О. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 036890, Ukraine

Possibility of restructuring the executive body alternating voltage stabilizer with boosting transformers

In the executive branch of the alternating current voltage stabilizer, which is composed of booster transformer (BT), a bridge switch (BS) is performed distributed – without a common point of the key elements (KE), which complicates their management and heat dissipation. Proposes the creation of a common point by partitioning of the primary winding and variations BT placement sections obtained at the shoulders BS, which is based on the concept of multi-variant construction of transformer switching executive structures (TSES). Analytical dependences allow to compare the options of such a structure. References 4, figures 2, table.

Key words: stabilizer, executive structure, booster transformer, switches elements, common point, installed power.

Надійшла 6.10.2014

Received 6.10.2014