

Н. Г. БАБАЕВ
(Сумгаит)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ СЛЕДЯЩИХ АВТОКОМПЕНСАТОРОВ ПРЯМОУГОЛЬНО-КООРДИНАТНОГО ТИПА

Исследование и разработка цифровых приборов для измерения комплексных величин переменного тока (цифровых автоматических компенсаторов) встречают большие трудности, когда контуры уравнивания по регулируемым параметрам оказываются взаимосвязанными. Это присуще в основном приборам, работающим в диапазоне низких частот. При этом среди известных методов кодирования следящий метод обеспечивает минимальную ошибку измерения [1, 2].

Однако применение следящего метода уравнивания снижает быстродействие прибора и может привести в отдельных случаях к неустойчивой работе их в условиях взаимосвязи контуров уравнивания.

Разработанные автором методы квантования переменным шагом по уровню [1, 3, 4] позволяют конструировать цифровые приборы переменного тока низкой частоты с требуемой скоростью уравнивания [5]. При этом вопросы устойчивости связаны с выбором порогов срабатывания исполнительных элементов по регулируемым параметрам.

В данной статье рассматриваются вопросы возникновения неустойчивых режимов работы цифровых следящих автокомпенсаторов прямоугольно-координатного типа со связанными контурами уравнивания и обоснования выбора оптимальных уровней порогов срабатывания всех исполнительных элементов схем, обеспечивающих устойчивую работу автокомпенсатора с некоторым запасом при минимально допустимых ошибках измерения составляющих вектора переменного тока.

Исследование вопросов влияния взаимосвязи контуров уравнивания на процесс последовательного приближения к равновесию в цифровых следящих автокомпенсаторах прямоугольно-координатного типа с применением в компенсирующих контурах переменных шагов квантования по уровню показывает, что в зависимости от степени взаимосвязи контуров в указанных приборах могут возникать расходящиеся и циклические процессы [1]. Обычно расходящиеся процессы возникают при больших углах взаимосвязи контуров (выше 45°), когда управляющие векторы теряют ориентацию при изменении знака составляющих результирующего вектора. Данный режим может быть только в случае неточной установки фаз компенсирующих напряжений цифро-

вых делителей и опорных напряжений фазочувствительных схем соответствующих осей автокомпенсатора.

Неточная регулировка фазовой чувствительности исполнительных органов с векторами компенсирующих напряжений и неточная установка 90° сдвига между компенсирующими осями приводит к определенной взаимосвязи контуров уравновешивания. Из-за нелинейности характеристик отдельных элементов она по величине и знаку не остается постоянной. Поэтому всегда между управляющими векторами A_x и A_y и компенсирующими $U_{кx}$ и $U_{кy}$ имеются некоторые углы сдвига α_x и α_y с любыми знаками, т. е. управляющие векторы могут отставать от векторов компенсирующей оси или опережать их. Возможны три случая: 1) A_x и A_y отстают от векторов $U_{кx}$ и $U_{кy}$ или опережают их; 2) A_x опережает $U_{кx}$ и A_y отстает от $U_{кy}$, т. е. между управляющими векторами сдвиг меньше 90° ; 3) A_x отстает от $U_{кx}$, а A_y опережает $U_{кy}$, сдвиг между управляющими векторами больше 90° .

Режим неустойчивости цифровых автокомпенсаторов, где производится параллельная отработка компенсирующих напряжений осей, характеризуется возникновением в конце траекторий компенсации определенных циклов вокруг точки равновесия. Указанные циклы могут охватить по оси одинаковые шаги квантования по уровню или смешанные.

Сначала рассмотрим циклические режимы с участием одинаковых и самых младших шагов квантования по уровню. На рис. 1, а приведен график в пределах одного шага дискретностью q по осям, где управляющие векторы одинаково смещены по часовой стрелке.

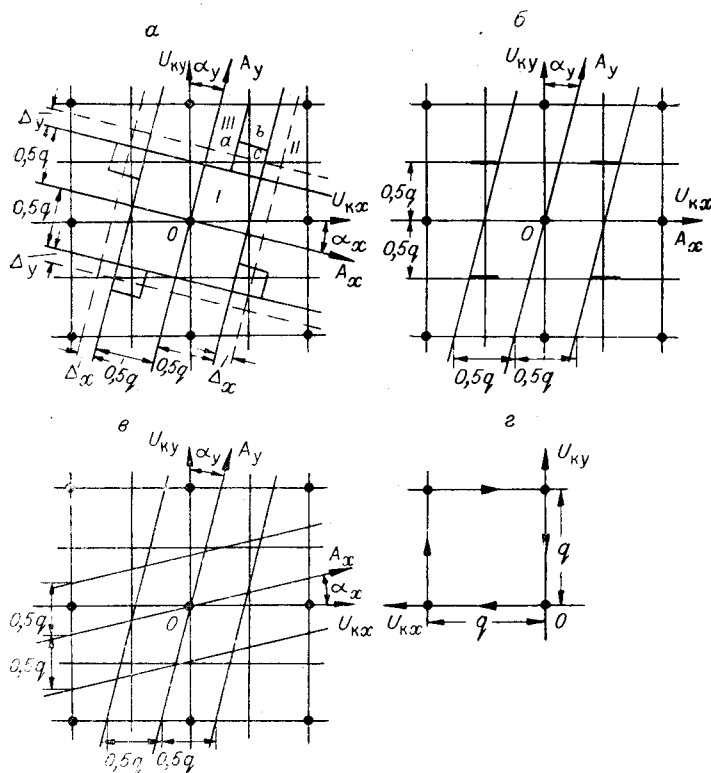


Рис. 1.

Из приведенного графика видно, что если результирующий вектор находится в пределах области I , заключенной между управляющими осями на расстоянии, равном половине шагов дискретностей, то в системе полное равновесие и она абсолютно устойчива при пороге срабатывания индикаторов осей, равном $0,5 q$. При этом максимальное значение погрешности по составляющим равно

$$\Delta = 0,5 q (1 + \operatorname{tg} \alpha), \quad (1)$$

т. е. с увеличением угла взаимосвязи погрешность возрастает и при $\alpha = 45^\circ$ значение ее достигает шага дискретности.

Если результирующий вектор находится в области II , где точки расположены от начала координатной системы управляющих осей на расстоянии больше половины шага дискретности по обеим осям, срабатывают исполнительные органы осей и одновременно вводится еще один шаг напряжения по компенсирующим осям. После чего результирующий вектор приобретает новое значение, которое попадает в область I . В данном случае снова в системе обеспечивается абсолютная устойчивость.

Область III , где точки расположены так, что проекции их на управляющей оси A_x составляют меньше половины шага дискретности, а проекция по оси A_y больше, можно делить на три участка. В случае нахождения результирующего вектора на участке a срабатывает один канал и после ввода шага компенсирующего напряжения результирующий вектор попадает в область устойчивости I . Когда результирующий вектор попадает в зону b , после срабатывания одного из каналов и введения компенсирующего напряжения новое значение вектора попадает в противоположный квадрант (в данном случае по часовой стрелке) в зону a . После очередного срабатывания другого канала вектор входит в зону абсолютной устойчивости I . Как видно, в рассмотренных случаях устойчивость в системе автокомпенсатора обеспечивается даже при пороге срабатывания, равном $0,5 q$.

Наконец, когда результирующий вектор попадает в зону c , то после введения шага компенсирующего напряжения по одной оси приводит к тому, что новое значение результирующего вектора попадает в ту же зону в противоположном квадранте и процесс повторяется бесконечно и последовательно. При этом контур замыкается и разностный вектор вращается вокруг точки равновесия, образуя определенные циклы. Площадь данной зоны при малых углах взаимосвязи незначительна. Она определяется

$$S_{\alpha} = q^2 \operatorname{tg} \alpha_x \operatorname{tg} \alpha_y. \quad (2)$$

Если $\alpha_x = \alpha_y = 6^\circ$, зона возникновения циклических режимов составляет примерно одну сотую части квадрата, заключенного на расстоянии шага дискретности между компенсирующими осями.

Практически для исключения зоны возникновения циклических режимов необходимо увеличить уровни порогов срабатывания исполнительных органов осей, т. е. расширить область абсолютной устойчивости I до захвата половины площади зоны возникновения циклов c . На рис. 1, a достаточный предел расширения этой области показан штриховыми линиями. При этом необходимо увеличить пороги срабатывания исполнительных элементов соответственно на величины:

$$\Delta_x = 0,5 q \operatorname{tg} \alpha_x; \quad \Delta_y = 0,5 q \operatorname{tg} \alpha_y.$$

При одинаковых сдвигах управляющих векторов $\alpha_x = \alpha_y = \alpha$ уровень порога срабатывания точных исполнительных элементов осей равен

$U_{cp} = 0,5 q(1 + \operatorname{tg} \alpha)$. Здесь для критических углов взаимосвязи, при которых возможны циклические режимы данной формы, определяем

$$\alpha_{кр} = \operatorname{arctg} \left(\frac{U_{cp}}{0,5 q} - 1 \right). \quad (3)$$

На рис. 2 дана зависимость необходимых уровней порогов срабатывания от критических углов взаимосвязи в одном контуре уравнивания, при которых исключается возможность возникновения циклических режимов в общей системе автокомпенсатора. Здесь следует отметить, что уровни порогов срабатывания исполнительных органов осей выбираются исходя из условий сдвигов управляющих векторов. Как мы показали, площадь зоны возникновения циклических режимов зависит от углов взаимосвязи контуров. Если в одном контуре обеспечивается совпадение управляющего вектора с компенсирующим, то из приведенной формулы (2) видно, что площадь, где возможно возникновение циклов, равна нулю. Если представить, что осуществляется не полное совпадение векторов, а имеется бесконечно малый угол, тогда указанные площади можно показать линией, где циклические режимы возможны только в случае совпадения разностного вектора с указанными линиями (см. рис. 1, б). При этом вероятность возникновения циклов довольно незначительна. Кроме того, незначительное увеличение уровня порога срабатывания исполнительного органа оси, где векторы совпадают, дает возможность полностью исключить циклический режим и обеспечить устойчивую работу при номинальных уровнях порогов срабатывания исполнительных органов осей.

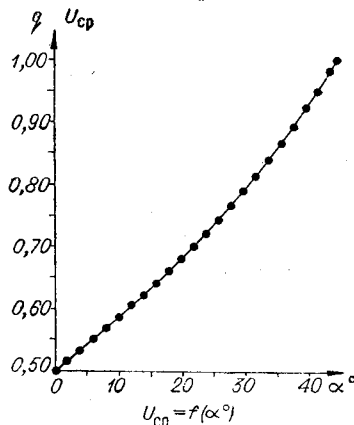


Рис. 2.

Данная задача практически решается довольно просто, так как имеется возможность питания цифрового делителя синфазной цепи и фазочувствительного исполнительного органа оси x от одного источника. При этом незначительный фазовый сдвиг ($1-2^\circ$), вносимый в тракт усиления усилителя, может быть скорректирован фазосдвигающей цепочкой на входе фазочувствительного выпрямителя.

На рис. 1, в дан график, когда между управляющими векторами не соблюдается 90° сдвиг. В данном случае разностный вектор при переходе из одного квадранта в другой, где ожидается циклический режим, попадает в область абсолютной устойчивости и в системе автокомпенсатора всегда обеспечивается устойчивый режим работы. Здесь условия возникновения циклов отсутствуют. Данное обстоятельство является весьма ценным при конструировании цифровых прямоугольно-координатных компенсаторов, так как практически всегда имеется такая возможность, например, опорный сигнал фазочувствительного выпрямителя оси y сдвигать больше или меньше 90° в зависимости от сдвига α_x .

Из вышеизложенного следует, что циклические процессы возникают только в случае сдвига управляющих векторов одновременно по часовой стрелке или против нее по отношению к компенсирующим. В таких циклах после каждой операции уравнивания последовательно по осям в контур уравнивания вводится или снимается обратно шаг компенсирующего напряжения. При этом в каждом канале показания

по составляющим будут колебаться между двумя значениями. В таблице приведены уровни компенсирующих напряжений по контурам уравнивания в зависимости от последовательности тактов для вектора с составляющими $x=25$, $y=5$.

На основе дальнейших исследований установлен еще один вид циклического режима, который может возникать при больших углах взаимосвязи контуров. Он возникает в тех случаях, когда разностный вектор по направлению близко совпадает с направлением векторов компенсирующих осей и имеет уровень, достаточный для одновременного срабатывания пороговых устройств каналов. При этом в одном контуре снимается шаг компенсирующего напряжения, а во втором контуре — вводится. После очередного такта положение меняется, т. е. в первом контуре вводится шаг компенсирующего напряжения, а во втором снимается. Таким образом, процесс повторяется бесконечно. Площадь областей неустойчивости зависит от углов взаимосвязи контуров (рис. 3). Указанные площади имеют максимальное значение при углах взаимосвязи контуров, превышающих $30^{\circ}40'$ по обеим осям компенсирующих осей $\alpha_x = \alpha_y = 45^{\circ}$ общая площадь возникновения циклов в одном квадрате $S_{\Pi} = 0,9 q^2$ и составляет 11,1 части квадранта.

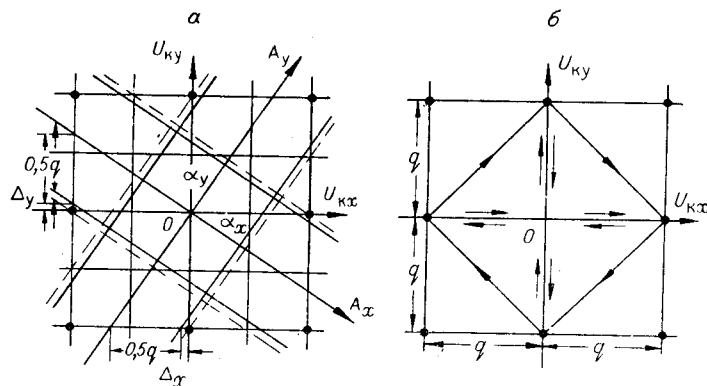


Рис. 3.

С уменьшением углов связи площадь возникновения циклов уменьшается и при углах $\alpha_x = \alpha_y = 30^{\circ}40'$ равна нулю. Из приведенного анализа и расчетов видно, что рассмотренные циклы возникают при больших углах взаимосвязи контуров, превышающих $30^{\circ}40'$ по обеим осям компенсатора. Если в одном контуре угол взаимосвязи окажется меньше критического ($30^{\circ}40'$), то указанные циклы не возникают.

Практически для исключения данных циклов и обеспечения устойчивости работы прибора при больших углах взаимосвязи необходимо увеличить уровень порогов срабатывания исполнительных органов осей. Она определяется $U_{cp} = q \sin \alpha$ и при минимальном критическом угле $30^{\circ}40'$ равна $0,5 q$, а при угле взаимосвязи 45° значение последнего достигает $0,707 q$.

Следовательно, критические углы возникновения циклических режимов второй формы определяются из выражения

$$\alpha_{кр} = \arcsin \frac{U_{cp}}{q} \quad (4)$$

В рассмотренном виде циклического режима после каждой операции уравнивания показание прибора по составляющим в одном канале будет соответствовать истинному значению (в пределах допустимой погрешности), а в другом — будет больше или меньше одного шага дискретности. Следовательно, в каждой оси показание будет колебаться между тремя значениями дискретных шагов, средние цифры которых соответствуют реальным значениям составляющих измеряемого вектора. Например, цикл с составляющими вектора, равными $x=25$ и $y=5$, будет протекать последовательно следующим образом (см. таблицу). Из таблицы видно, что при больших частотах практически исключается возможность съема показания прибора по составляющим в данном режиме циклов.

Номер такта	Циклы с малыми шагами первого вида		Циклы с малыми шагами второго вида		Циклы со смешанными шагами при $Q = 10 q$	
	$x = 25$	$y = 5$	$x = 25$	$y = 5$	$x = 25$	$y = 5$
1	25	6	25	6	25	15
2	25	5	26	5	24	5
3	24	5	25	4	14	6
4	24	6	24	5	15	16
5	25	6	25	6	25	15

Циклические режимы возможны и при обработке компенсатора «большими шагами по каналам, равным $10 q$ или $100 q$ при методе последовательного уравнивания и $11 q$ или $111 q$ при методе одновременного уравнивания [1, 3].

Рассмотрим циклический режим, аналогичный первому виду, возникающий при неравномерных шагах квантования по осям (наиболее часто встречающийся режим работы прибора). В первом рассмотренном виде циклических режимов (см. рис. 1) в случае квантования «грубыми» шагами при срабатывании порогового устройства грубого шага одного канала одновременно срабатывает точное пороговое устройство другого, так как в компенсаторе осуществляется параллельная обработка параметров каналов. Поэтому в таких циклах непрерывно в одном из каналов вводится или снимается грубый шаг квантованного напряжения и одновременно в другом — та же операция осуществляется маленькими шагами (рис. 4). Из-за того, что точка расположения разностного вектора при переходе квадрантов смещается на целый шаг q в ту или другую сторону, площадь областей неустойчивости ограничивается с двух сторон шириной q по каждой оси, так как векторы, расположенные в этих зонах, при переходе к следующему квадранту выходят из областей неустойчивости.

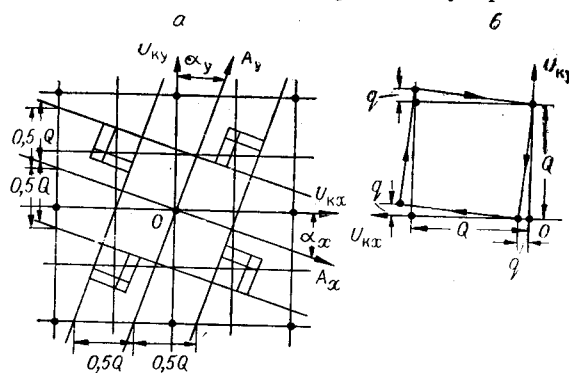


Рис. 4.

Критический угол возникновения таких циклов определяется шириной областей неустойчивости по координатным осям, которые должны

быть меньше младшего шага дискретности. Данные условия определяются из $(Q \operatorname{tg} \alpha - q) \leq q$, где значение критических углов составляет

$$\alpha_{\text{кр}} = \operatorname{arctg} \frac{2q}{Q}. \quad (5)$$

Здесь Q — величина грубого шага. Если $Q = 10q$, то $\alpha_{\text{кр}} = 11^\circ$, а если $Q = 11q$, то $\alpha_{\text{кр}} \approx 10^\circ$.

Исследования показывают, что рассмотренные циклы возможны только при участии старших и последующих младших шагов, т. е. цикл с участием самого старшего и самого младшего шагов не возникает. В таблице приведен пример последовательности тактов и положение компенсирующих осей для вектора с составляющими, равными $x = 25$ и $y = 5$.

Критические углы для циклов с шагами $100q$ и $10q$, а также для $111q$ и $11q$ примерно равны 11° .

Для исключения циклов со смешанными шагами здесь также подобно предыдущим случаям необходимо увеличить уровни порогов срабатывания грубых исполнительных органов осей автокомпенсатора, т. е. расширить область устойчивости при уравнивании грубыми шагами. При удовлетворяющем пределе расширения необходимые уровни порогов срабатывания грубых исполнительных элементов по отдельным осям определяются

$$U_{\text{ср}} = 0,5 Q (\operatorname{tg} \alpha + 1) - 0,5 q. \quad (6)$$

Для приведенных выше критических углов при $\alpha = 10^\circ$ и $Q = 11q$ $U_{\text{ср}} \approx 6q (0,54 Q)$, а при $\alpha = 11^\circ$ и $Q = 10q$ $U_{\text{ср}} = 5,47 q (0,547 Q)$. Соответственно для следующих больших шагов при $\alpha = 11^\circ$ и $Q = 100q$ $U_{\text{ср}} = 54,72 q (0,547 Q)$. Наконец, при $Q = 111q$ $U_{\text{ср}} = 60,78 q (0,547 Q)$. Если $U_{\text{ср}}$ брать с округлением, то во всех случаях независимо от величины шага квантования уровни порогов срабатывания грубых исполнительных органов при $0,55 Q$ шагов достаточны для исключения подобных циклических режимов.

Анализ показывает, что циклические режимы второго вида возможны и с участием больших шагов. Такие циклы при использовании смешанных шагов не возникают.

В рассмотренных случаях, как и в предыдущих, для исключения указанных циклов необходимо увеличить уровни порогов срабатывания грубых исполнительных органов каналов, т. е. значение их желательно выбирать больше половины соответствующих шагов. Согласно приведенной формуле (4), можно написать

$$U_{\text{ср}} = Q \sin \alpha. \quad (7)$$

При максимальном критическом угле $\alpha = 45^\circ$ для всех грубых шагов порог срабатывания примерно равен $0,7 Q$ соответствующих шагов.

Экспериментальные исследования показывают, что в прямоугольно-координатном цифровом следящем автокомпенсаторе переменного тока промышленной частоты, собранном на обычных схемах, углы взаимосвязи контуров уравнивания без дополнительных регулировок и схемных решений не превышают $5-6^\circ$. Как следует из приведенных расчетов и графика на рис. 2, для обеспечения абсолютной устойчивости работы прибора в диапазоне изменения углов взаимосвязи с удвоенным запасом до 12° уровня порогов срабатывания всех исполнительных органов осей достаточно брать не более $0,6$ части соответствующих шагов.

Исследования на макете прибора оправдали все теоретические предположения. Автокомпенсатор стабилен в работе и обеспечивает однозначность показания по составляющим измеряемого вектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Бабаев. Исследования вопросов повышения быстродействия цифровых автокомпенсаторов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Баку, 1967.
2. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
3. Т. М. Алиев, Н. Г. Бабаев. Цифровой следящий автокомпенсатор переменного тока.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды VI конференции), т. II. Новосибирск, «Наука», 1967.
4. Т. М. Алиев, Н. Г. Бабаев. О повышении быстродействия цифровых следящих автокомпенсаторов.— За технический прогресс, 1965, № 5.
5. Т. М. Алиев, Н. Г. Бабаев. Быстродействующий цифровой следящий автокомпенсатор на двоично-десятичных реверсивных счетчиках.— Приборы и системы управления, 1968, № 3.

*Поступила в редакцию
12 января 1968 г.*