

Ю. Р. АГАМАЛОВ, В. Ю. КНЕЛЛЕР

(Москва)

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КООРДИНИРОВАННОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В [1] было введено понятие координированного уравнивания измерительных цепей переменного тока двумя регулирующими органами и рассмотрен алгоритм координированного уравнивания, который наилучшим образом реализуется в упрощенных цифровых приборах с одним дискретным и одним аналоговым (вспомогательным) регулирующим органом.

Быстродействующие приборы для одновременного измерения обеих составляющих с двумя дискретными регулирующими органами целесообразно строить на основе алгоритмов однонаправленного координированного уравнивания, описанных в [2], которые позволяют уравновесить измерительную цепь даже при плохом угле сходимости за число тактов, не превышающее суммарного числа образцовых элементов регулирующих органов. Здесь будут исследованы сходимость и погрешности процесса уравнивания по этим алгоритмам и выявлены пути уменьшения погрешностей.

Вначале поясним сущность анализируемых алгоритмов. Сигналы управления, которые можно сформировать из сигнала разбаланса нулевой измерительной цепи, уравниваемой двумя параметрами (p и q), как правило, зависят от отклонений (Δp и Δq) обоих регулируемых параметров от их равновесных значений (p_0 и q_0), т. е.

$$U_1 = f_1(p_0; q_0; \Delta p; \Delta q); \quad U_2 = f_2(p_0; q_0; \Delta p; \Delta q). \quad (1)$$

Определим условия, при которых можно уравновесить измерительную цепь по таким сигналам, регулируя каждый параметр (p и q) по методу взвешивания — наиболее быстрому методу однонаправленного поиска состояния равновесия, широко используемому в приборах с одним регулирующим органом. Как известно, метод взвешивания обязательно предполагает, что знак сигнала управления однозначно определяет знак отклонения регулируемого параметра от равновесного значения.

Представим выражение (1) в виде

$$U_1 = \Delta p F_1(p_0; q_0; \Delta p; \Delta q) \quad (\Delta p \neq 0); \quad (2)$$

$$U_2 = \Delta q F_2(p_0; q_0; \Delta p; \Delta q) \quad (\Delta q \neq 0). \quad (3)$$

Путем соответствующего выбора параметров измерительной цепи и настройки нуль-органа удастся обеспечить знакопостоянство и неравенство нулю функций $F_1(p_0; q_0; \Delta p; 0)$ (при $\Delta q=0$) и $F_2(p_0; q_0; 0; \Delta q)$ (при $\Delta p=0$) во всем диапазоне измерения (в противном случае по знакам сигналов U_1 и U_2 вообще нельзя было бы осуществить уравнивание измерительной цепи). При $\Delta p \neq 0$ и $\Delta q \neq 0$ в зависимости от значений измеряемых и регулируемых параметров функции F_1 и F_2 могут иметь любой знак, а следовательно, уравновесить измерительную цепь, одновременно регулируя по методу взвешивания параметр p , основываясь лишь на знаке U_1 , и параметр q на основании лишь знака U_2 , не удастся. Но это можно сделать при определенной координации регулировок параметров p и q .

Для определенности будем считать правильным соответствием знаков сигналов управления и отклонений от состояния равновесия

$$\text{sign } U_1 = \text{sign } \Delta p; \quad \text{sign } U_2 = \text{sign } \Delta q. \quad (4)$$

Тогда при регулировке параметра p по методу взвешивания ошибки по этому параметру будут иметь место в области значений параметров, в которой $F_1 \leq 0$. Эту область будем называть областью ошибок при регулировке p . Ошибки при регулировке параметра q будут иметь место при $F_2 \leq 0$, и соответствующую область будем называть областью ошибок при регулировке q .

Располагая информацией о знаках F_1 и F_2 (т. е. о попадании в области ошибок), можно было бы вести регулировку каждого параметра по методу взвешивания, как обычно, но при попадании в область ошибок при регулировке какого-либо параметра приостанавливать регулировку этого параметра до выхода из этой области. Если при этом функции F_1 и F_2 не становятся отрицательными одновременно, т. е.

$$\text{при } F_1 \leq 0 \quad F_2 > 0, \quad \text{а при } F_2 \leq 0 \quad F_1 > 0, \quad (5)$$

то можно утверждать, что такой процесс координированного уравнивания будет продолжаться до тех пор, пока либо не закончится коммутация образцовых элементов обоих регулирующих органов, либо пока не закончится коммутация всех образцовых элементов одного из этих органов и коммутация элементов второго регулирующего органа не приостановится из-за попадания в область ошибок при регулировке относящегося к нему параметра. При этом наибольшее число тактов, необходимое для уравнивания, не превысит числа образцовых элементов обоих регулирующих органов, так как на каждом такте обязательно переключается элемент какого-либо регулирующего органа. Среднее число тактов будет меньшим, так как в области, в которой выполняется условие $F_1 > 0$ и $F_2 > 0$, происходит одновременное переключение образцовых элементов обеих цепочек.

Все сказанное остается в силе и в том случае, если вместо информации о попадании в область ошибок по каждому параметру (информации о знаках F_1 и F_2) располагать информацией о попадании этого параметра в область, которая несколько больше действительной области ошибок и полностью охватывает последнюю. Будем называть такие области областями возможных ошибок. В этом случае вместо F_1 и F_2 рассматриваются функции F_1^* и F_2^* , каждая из которых положительна лишь при положительных F_1 и F_2 соответственно. При этом процесс уравнивания сходится, если

$$\text{при } F_1^* \leq 0 \quad F_2^* > 0, \quad \text{а при } F_2^* \leq 0 \quad F_1^* > 0. \quad (5a)$$

Выясним теперь, на основании какой информации можно судить о попадании в области действительных или возможных ошибок и при каких значениях параметров системы обеспечивается сходимость такого процесса уравнивания.

Координированное уравнивание можно в принципе осуществлять как по сигналам, полученным с помощью фазочувствительных нуль-органов (ФЧНО), так и по сигналам, полученным с помощью экстремум-детекторов. Здесь мы рассмотрим случай формирования сигналов управления с помощью ФЧНО, для которого использование однонаправленного координированного уравнивания представляется особенно перспективным.

Анализ для большей краткости и наглядности будет проведен на том же примере, что и анализ в [1], а именно на примере четырехплечих мостовых цепей, образованных двумя трехэлементными цепочками и уравниваемыми регулировкой разнородных элементов, расположенных в одном плече. Методика такого анализа одинаково применима при любом типе измерительной цепи и любом выборе регулируемых параметров; отличны лишь получаемые аналитические зависимости.

Воспользуемся выведенными в [1] [см. (7) и (8)] выражениями для сигналов управления, сформированных ФЧНО, заменив в них относительные приращения регулируемых параметров $\delta\beta_2$ и $\delta\gamma_2$ на абсолютные:

$$\Delta\beta_2 = \beta_2 - \beta_{20} = \delta\beta_2\beta_{20}; \quad \Delta\gamma_2 = \gamma_2 - \gamma_{20} = \delta\gamma_2\gamma_{20}.$$

При этом

$$U_1 = k_1 \frac{1}{\beta_{20}} (\Delta\beta_2 \cos \psi + \Delta\gamma_2 \sin \psi); \quad (6)$$

$$U_2 = k_2 \frac{1}{\beta_{20}} (-\Delta\beta_2 \sin \Theta + \Delta\gamma_2 \cos \Theta). \quad (7)$$

Все величины, входящие в (6) и (7), определяются точно так же, как и в [1] (см. формулы (9)–(14) в [1]).

Согласно (2), (3), (6) и (7), для рассматриваемого случая функции F_1 и F_2 имеют вид:

$$F_1 = k_1 \frac{1}{\beta_{20}} \cos \psi \left(1 + \operatorname{tg} \psi \frac{\Delta\gamma_2}{\Delta\beta_2} \right); \quad (8)$$

$$F_2 = k_2 \frac{1}{\beta_{20}} \cos \Theta \left(1 - \operatorname{tg} \Theta \frac{\Delta\beta_2}{\Delta\gamma_2} \right). \quad (9)$$

Поскольку с учетом (4) должны выполняться условия

$$\cos \psi > 0; \quad (10)$$

$$\cos \Theta > 0, \quad (11)$$

можно утверждать, что область ошибок при регулировке параметра $\beta_2(p)$ имеет место при

$$1 + \operatorname{tg} \psi \frac{\Delta\gamma_2}{\Delta\beta_2} \leq 0, \quad (12)$$

а область ошибок при регулировке параметра $\gamma_2(q)$ при

$$1 - \operatorname{tg} \Theta \frac{\Delta\beta_2}{\Delta\gamma_2} \leq 0. \quad (13)$$

Рассмотрим вначале неравенство (12). Обозначив

$$\Delta \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta \gamma_2}{\Delta \beta_2}, \quad (14)$$

из (12) получим

$$\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \Delta \varphi \leq -1. \quad (15)$$

Следовательно, при $\psi > 0$ в области ошибок по β_2

$$90^\circ \leq \Delta \varphi \leq 90^\circ + \psi \text{ или } 270^\circ \leq \Delta \varphi \leq 270^\circ + \psi. \quad (16)$$

Получить сигнал, определяющий непосредственно величину $\Delta \varphi$, мы не можем, но эта величина связана с доступной для восприятия величиной $\operatorname{arg} \dot{U}_p$ — фазовым углом усиленного напряжения разбаланса мостовой цепи. Учитывая, что

$$\operatorname{arg} \dot{U}_p = -\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_y + \Delta \varphi = \eta - \psi + \Delta \varphi, \quad (17)$$

из (16) находим:

$$90^\circ + \eta - \psi \leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq 90^\circ + \eta; \quad 270^\circ + \eta - \psi \leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq 270^\circ + \eta. \quad (18)$$

Аналогично для случая $\psi < 0$ из (15) получаем:

$$90^\circ + \eta \leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq 90^\circ + \eta + |\psi|; \quad 270^\circ + \eta \leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq 270^\circ + \eta + |\psi|. \quad (19)$$

Непосредственно воспользоваться неравенствами (18) и (19), определяющими значение $\operatorname{arg} \dot{U}_p$ в области ошибок при регулировке параметра β_2 также нельзя, поскольку в них входит переменная величина ψ . Эта величина, так же как и величина Θ , зависит от изменяющихся в пределах диапазона измерения величин φ_1 и φ_2 , а также от фазового сдвига в усилителе φ_y , который изменяется вследствие неустойчивости параметров усилителя и нелинейности его функции преобразования.

Зная пределы изменений φ_1 и φ_2 и задавшись предельными значениями величины φ_y (в них обычно учитывают и возможные неточности установки фаз опорных напряжений нуль-органов), а также выбрав надлежащие значения параметров настройки η и ξ (обычно из условий минимизации максимальных значений ψ и Θ), можно оценить возможные предельные значения ψ и Θ и перейти от неравенств, определяющих область ошибок, к неравенствам, определяющим область возможных ошибок.

Так, если максимально возможное положительное значение ψ равно ψ_1 , а максимальное по модулю отрицательное значение ψ составляет $|\psi_2|$, то ошибки при регулировке параметра β_2 могут иметь место лишь при значениях $\operatorname{arg} \dot{U}_p$, определяемых неравенствами:

$$\begin{aligned} 90^\circ + \eta - |\psi_1| &\leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq 90^\circ + \eta + |\psi_2|; \\ 270^\circ + \eta - |\psi_1| &\leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq 270^\circ + \eta + |\psi_2|. \end{aligned} \quad (20)$$

Аналогичным путем можно ограничить значения $\operatorname{arg} \dot{U}_p$, при которых могут иметь место ошибки при регулировке параметра γ_2 :

$$\begin{aligned} \xi - |\Theta_1| &\leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq \xi + |\Theta_2|; \\ 180^\circ + \xi - |\Theta_1| &\leq \operatorname{arg} \dot{U}_p \leq 180^\circ + \xi + |\Theta_2|. \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь Θ_1 — максимально возможное положительное, а $|\Theta_2|$ — максимальное по модулю отрицательное значение угла Θ .

Подобные соотношения, полученные в результате анализа других вариантов выбора регулируемых параметров в мостовых цепях, образованных трехэлементными цепочками, приведены в табл. 1.

Итак, в соответствии с рассмотренным алгоритмом регулировка каждого параметра производится по методу взвешивания в соответствии со знаком относящегося к нему сигнала управления до тех пор, пока $\arg \dot{U}_p$ не окажется в одной из областей возможных ошибок, определяемых неравенствами (20) и (21) (при этом в области, определяемой (20), запрещается регулировка параметра β_2 , а в области, определяемой (21), запрещается регулировка параметра γ_2). Для обнаружения попадания в области возможных ошибок предусматриваются дополнительные индикаторы, оценивающие расположение вектора усиленного напряжения разбаланса относительно опорных векторов, устанавливаемых в соответствии с (20) и (21). Условия сходимости такого алгоритма в соответствии с (5а), (8) и (9) имеют вид:

$$1 - \operatorname{tg} \Theta_m \frac{\Delta \beta_2}{\Delta \gamma_2} > 0 \text{ при } 1 + \operatorname{tg} \psi_m \frac{\Delta \gamma_2}{\Delta \beta_2} \leq 0; \quad (22)$$

$$1 + \operatorname{tg} \psi_m \frac{\Delta \gamma_2}{\Delta \beta_2} > 0 \text{ при } 1 + \operatorname{tg} \Theta_m \frac{\Delta \beta_2}{\Delta \gamma_2} \leq 0, \quad (23)$$

где ψ_m и Θ_m — максимально возможные по модулю значения углов ψ и Θ . Нетрудно показать, что эти условия при одинаковых знаках ψ и Θ выполняются при любых значениях Θ_m и ψ_m , а при разных знаках ψ и Θ — лишь при условии

$$\operatorname{tg} \Theta_m \operatorname{tg} \psi_m < 1. \quad (24)$$

Если записать величины $(\varphi_1 + \varphi_2)$ и φ_y в отклонениях от их средних значений $(\varphi_1 + \varphi_2)_0$ и φ_{y0}

$$(\varphi_1 + \varphi_2) = (\varphi_1 + \varphi_2)_0 \pm \frac{1}{2} |\Delta (\varphi_1 + \varphi_2)|, \quad \varphi_y = \varphi_{y0} \pm \frac{1}{2} |\Delta \varphi_y|$$

и выбрать η и ξ таким образом, чтобы

$$\psi_0 = (\varphi_1 + \varphi_2)_0 + \eta + \varphi_{y0} = 0; \quad \Theta_0 = (\varphi_1 + \varphi_2)_0 + \xi + \varphi_{y0} = 0, \quad (25)$$

то из (24) следует, что максимально возможные допустимые колебания величин ψ и Θ

$$\psi_{mm} = \pm |\Delta \psi|_m = \pm \frac{1}{2} \{ |\Delta (\varphi_1 + \varphi_2)| + |\Delta \varphi_y| \};$$

$$\Theta_{mm} = \pm |\Delta \Theta|_m = \pm \frac{1}{2} \{ |\Delta (\varphi_1 + \varphi_2)| + |\Delta \varphi_y| \}$$

составляют $\pm 45^\circ$.

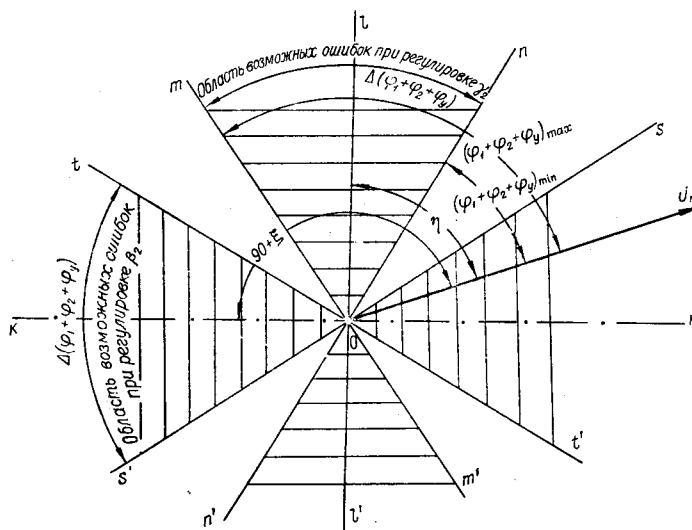
Соотношения между введенными выше угловыми величинами графически представлены на рисунке. Здесь опорные напряжения квадратурных нуль-органов выбраны таким образом, что линии, перпендикулярные к ним, делят области возможных ошибок пополам, т. е. когда η и ξ выбраны в соответствии с соотношениями (25). Для индикации областей возможных ошибок по каждому регулируемому параметру в этом случае необходимо по два дополнительных опорных напряжения на каждый параметр. Можно обойтись лишь одним дополнительным опорным напряжением на каждый параметр, если направить векторы

Таблица I

Регулируемые параметры	Значение $\arg \dot{U}_p$ в пределах области возможных ошибок при регулировке параметра p	Значение $\arg \dot{U}_p$ в пределах области возможных ошибок при регулировке параметра p
$p = \alpha_1$ $q = \beta_2$	$\xi - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq \xi + \theta_2 $ $180 - \xi - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 180 - \xi + \theta_2 $	$90 + \eta - \arctg \frac{\beta_{20}}{\gamma_2} - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 90 + \eta - \arctg \frac{\beta_{20}}{\gamma_2} + \psi_2 $ $270 + \eta - \arctg \frac{\beta_{20}}{\gamma_2} - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 270 + \eta - \arctg \frac{\beta_{20}}{\gamma_2} + \psi_2 $
$p = \alpha_1$ $q = \gamma_2$	$90 + \eta - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 90 + \eta + \psi_2 $ $270 + \eta - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 270 + \eta + \psi_2 $	$\xi + \arctg \frac{\gamma_{20}}{\beta_2} - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq \xi + \arctg \frac{\gamma_{20}}{\beta_2} + \theta_2 $ $180 + \xi + \arctg \frac{\gamma_{20}}{\beta_2} - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 180 + \xi + \arctg \frac{\gamma_{20}}{\beta_2} + \theta_2 $
$p = \alpha_2$ $q = \beta_2$	$\xi - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq \xi + \theta_2 $ $180 + \xi - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 180 + \xi + \theta_2 $	$90 + \eta - \arctg \frac{\beta_1}{\gamma_1} - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 90 + \eta - \arctg \frac{\beta_1}{\gamma_1} + \psi_2 $ $270 + \eta - \arctg \frac{\beta_1}{\gamma_1} - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 270 + \eta - \arctg \frac{\beta_1}{\gamma_1} + \psi_2 $
$p = \alpha_2$ $q = \gamma_2$	$90 + \eta - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 90 + \eta + \psi_2 $ $270 + \eta - \psi_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 270 + \eta + \psi_2 $	$\xi + \arctg \frac{\gamma_1}{\beta_1} - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq \xi + \arctg \frac{\gamma_1}{\beta_1} + \theta_2 $ $180 + \xi + \arctg \frac{\gamma_1}{\beta_1} - \theta_1 \leq \arg \dot{U}_p \leq 180 + \xi + \arctg \frac{\gamma_1}{\beta_1} + \theta_2 $

опорных напряжений квадратурных нуль-органов таким образом, чтобы перпендикуляры к ним совпадали с одной из границ, указанных на рисунке областей возможных ошибок, например с линиями om и os' .

Максимально возможная погрешность уравнивания для обоих вариантов выделения областей возможных ошибок одинакова. Она возникает в том случае, когда после окончания уравнивания по одному из параметров (с точностью до единицы дискретности регулируемого параметра) система оказывается внутри области возможных ошибок по последнему параметру, вблизи одной из ее границ, в то время как значение $(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_y)$ соответствует другой границе этой области.



Максимально возможная погрешность уравнивания по параметру β_2 $|\Delta \beta_{2mx}|$ может быть найдена из системы неравенств (20). Первое из них при $|\psi_1| = |\psi_2| = |\psi_m|$ с учетом (17) дает $90^\circ - |\psi_m| < < -\psi + \Delta \varphi < 90^\circ + |\psi_m|$. При $\psi \cong |\psi_m|$ $0 < \Delta \varphi - 90^\circ < 2|\psi_m|$, откуда с учетом (14) $\Delta \beta_{2mx} = -\text{tg} 2|\psi_m| \delta \gamma_2$, где $\delta \gamma_2$ — дискретность параметра γ_2 . При $\psi \cong -|\psi_m|$ $\Delta \beta_{2mx} = \text{tg} 2|\psi_m| \delta \gamma_2$, т. е.

$$|\Delta \beta_{2mx}| = |\text{tg} 2\psi_m \delta \gamma_2| + |\delta \beta_2|, \quad (26)$$

где $\delta \beta_2$ — дискретность параметра β_2 .

Эту же формулу можно получить и из второго неравенства системы (20). Аналогично оценивается и максимально возможная погрешность уравнивания по параметру γ_2 [исходя из неравенств (21)]:

$$|\Delta \gamma_{2mx}| = |\delta \beta_2 \text{tg} 2\theta_m| + |\delta \gamma_2|. \quad (27)$$

Погрешности уравнивания при первом варианте выбора опорных напряжений можно уменьшить, если после окончания уравнивания по одному параметру снимать запрет на регулировку другого параметра. В этом случае регулировка последнего будет продолжаться до тех пор, пока не будет отработан с точностью, определяемой единицей дискретности, сигнал разбаланса, относящийся к этому параметру

(U_1 или U_2). При этом $|\overline{\Delta \beta_{2mx}}|$ и $|\overline{\Delta \gamma_{2mx}}|$ определяются из (6) и (7) соответственно как

$$|\overline{\Delta \beta_{2mx}}| = |\operatorname{tg} \psi_m \delta \gamma_2| + |\delta \beta_2|; \quad (28)$$

$$|\overline{\Delta \gamma_{2mx}}| = |\operatorname{tg} \Theta_m \delta \beta_2| + |\delta \gamma_2|. \quad (29)$$

Аналогичные выражения для погрешностей уравнивания имеют место и при других способах уравнивания, осуществляемых по сигналам управления, которые формируются с помощью ФЧНО.

Процесс однонаправленного координированного уравнивания можно осуществить без введения дополнительных опорных напряжений, основываясь лишь на знаках сигналов управления U_1 и U_2 . При этом приходится жертвовать областями, в которых ранее разрешалась одновременная регулировка параметров (областями, не заштрихованными на рисунке), причисляя их к соответствующим областям возможных ошибок. Проанализируем этот случай, для чего разрешим уравнения (6) и (7) относительно $\Delta \beta_2$ и $\Delta \gamma_2$:

$$\Delta \beta_2 = \beta_{20} \frac{\frac{U_1}{k_1} \cos \Theta - \frac{U_2}{k_2} \sin \psi}{\cos(\psi - \Theta)}; \quad (30)$$

$$\Delta \gamma_2 = \beta_{20} \frac{\frac{U_2}{k_2} \cos \psi + \frac{U_1}{k_1} \sin \Theta}{\cos(\psi - \Theta)}. \quad (31)$$

Для сходимости процесса уравнивания при регулировке каждого параметра по методу взвешивания необходимо и достаточно, чтобы [с учетом (4)] регулировка β_2 производилась лишь при

$$\operatorname{sign} U_1 = \operatorname{sign} \Delta \beta_2, \quad (32)$$

а регулировка γ_2 — лишь при

$$\operatorname{sign} U_2 = \operatorname{sign} \Delta \gamma_2, \quad (33)$$

Из выражений (30) и (31) видно, что если в дополнение к условиям (10) и (11) потребовать, чтобы выполнялись условия:

$$\sin \psi \geq 0; \quad \sin \Theta \geq 0, \quad (34)$$

то при

$$\operatorname{sign} U_1 = \operatorname{sign} U_2, \quad (35)$$

а также при $U_2 = 0$ всегда будет выполняться условие (33) [см. (31)], и при

$$\operatorname{sign} U_2 = -\operatorname{sign} U_1, \quad (36)$$

а также при $U_1 = 0$ будет всегда выполняться условие (32). Таким образом, при одинаковых знаках U_1 и U_2 можно регулировать параметр γ_2 в соответствии со знаком U_2 , а при разных знаках U_1 и U_2 можно регулировать β_2 в соответствии со знаком относящегося к нему сигнала U_1 . Условия сходимости такого алгоритма, получаемые из (34), (10) и (11), имеют вид:

$$0 < \psi < 90^\circ; \quad 0 < \Theta < 90^\circ. \quad (37)$$

Эти выражения определяют допустимые фазовые нестабильности в системе и оптимальные настройки фаз опорных напряжений ФЧНО. Так, для рассматриваемого случая при настройках $\eta = \xi = (\varphi_1 + \varphi_2)_0 \varphi_{y0}$ максимально допустимые колебания величин ψ и Θ составляют $\pm 45^\circ$.

При выборе других сочетаний регулируемых параметров мостовой цепи, образованной трехэлементными цепочками, условия сходимости для случая $\gamma > 0$ имеют вид: $0 < \psi < 90^\circ + \lambda$; $\lambda < \Theta < 90^\circ$ или $\lambda < \psi < 90^\circ$; $0 < \Theta < 90^\circ + \lambda$, где λ определяется для различных вариантов выбора регулируемых параметров согласно табл. 2.

Таблица 2

Регулируемые параметры	α_1, β_2	α_1, γ_2	α_2, β_2	α_2, γ_2
λ	$-\arctg \frac{\beta_{20}}{\gamma_2}$	$\arctg \frac{\gamma_{20}}{\beta_2}$	$-\arctg \frac{\beta_1}{\gamma_1}$	$\arctg \frac{\gamma_1}{\beta_1}$

В случае $\gamma < 0$ справедливы все результаты, полученные для $\gamma > 0$, но с учетом того, что топографические диаграммы для $\gamma < 0$ являются зеркальным отображением относительного вектора напряжения питания диаграмм для $\gamma > 0$.

При выполнении условий сходимости (37) процесс уравнивания по данному алгоритму продолжается до тех пор, пока полностью не закончится уравнивание по одному из регулируемых параметров, а регулировка второго параметра не приостановится из-за попадания в область возможных ошибок по данному параметру. Возникающие при этом погрешности уравнивания будут иметь максимальное значение при остановке процесса вблизи границ области возможных ошибок, которыми являются прямые $U_1=0$; $U_2=0$. Погрешность уравнивания по параметру β_2 $\Delta \beta_2$ в зависимости от того, у какой из границ закончится регулировка параметра β_2 , определится выражением

$$\overline{\Delta \beta_2}' = -\operatorname{tg} \psi \delta \gamma_2 \quad (38)$$

или

$$\overline{\Delta \beta_2}'' = \operatorname{ctg} \Theta \delta \gamma_2. \quad (39)$$

Аналогично погрешность уравнивания по параметру γ_2 определится выражением

$$\overline{\Delta \gamma_2}' = -\operatorname{ctg} \psi \delta \beta_2 \quad (40)$$

или

$$\overline{\Delta \gamma_2}'' = \operatorname{tg} \Theta \delta \beta_2. \quad (41)$$

Алгоритм можно существенно улучшить, если по окончании регулировки одного из параметров снимать запрет на регулировку другого параметра при попадании в ранее определенную область возможных ошибок. При этом погрешности уравнивания по параметрам β_2 и γ_2 будут определяться лишь выражениями (38) и (41). Максимальные величины погрешностей уравнивания при оптимальном выборе величин η и ξ определяются выражениями:

$$|\overline{\Delta \gamma_{2mx}}| = \operatorname{tg} [|\Delta(\varphi_1 + \varphi_2)| + |\Delta \varphi_y|] \delta \beta_2; \quad (42)$$

$$|\overline{\Delta \beta_{2mx}}| = \operatorname{tg} [|\Delta(\varphi_1 + \varphi_2)| + |\Delta \varphi_y|] \delta \gamma_2. \quad (43)$$

Эти погрешности можно уменьшить еще в два раза, сделав их равными погрешностям уравнивания при первом из рассмотренных здесь алгоритмов [см. (28), (29)], если одновременно со снятием запрета после

окончания регулировки одного из параметров повернуть фазу опорного напряжения ФЧНО другого параметра таким образом, чтобы $|\Psi_m|$ и $|\Theta_m|$ не превышали величины $\frac{|\Delta(\varphi_1 + \varphi_2)| + |\Delta\varphi_y|}{2}$. При практической реализации алгоритма в ряде случаев может оказаться удобным вместо того, чтобы осуществлять такой поворот фаз опорных напряжений, предусмотреть еще два ФЧНО, векторы опорных напряжений которых выбраны так, чтобы линии, перпендикулярные этим векторам (при квадратурных ФЧНО), проходили посередине соответствующих областей возможных ошибок. По сигналам этих ФЧНО производится окончательная коммутация образцовых элементов регулирующих органов, в то время как координация регулировок осуществляется в соответствии с сочетанием знаков сигналов основных ФЧНО. В таком варианте этот алгоритм реализован в быстродействующем цифровом автоматическом мосте для измерения C и $\operatorname{tg} \delta$, разработанном в ИАТ (ТК). Мост измеряет C в пределах от 10 пф до 10 мкф (в шести пределах измерения) с погрешностью $(0,3 \div 0,5)\%$ и $\operatorname{tg} \delta$ от $5 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-1} с погрешностью $(2 \div 3)\% + 5 \cdot 10^{-4}$. Максимально возможное время измерения внутри предела измерения менее 90 мсек (24 такта, в среднем по $3,6 \text{ мсек}$ на такт), полное время измерения, включая время на автоматический выбор диапазона, не превышает 125 мсек при частоте питания мостовой цепи 1 кГц .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из полученных в работе соотношений, алгоритмы однонаправленного координированного уравнивания допускают существенные фазовые нестабильности в системе.

Для уменьшения погрешностей уравнивания необходимо после перебора всех образцовых элементов одного из регулирующих органов снимать запрет на регулировку вторым органом при попадании в его область возможных ошибок, а также осуществить поворот фазы опорного напряжения на заранее определяемую величину. При этом погрешности однонаправленного координированного уравнивания не превышают по величине погрешностей при использовании любого другого способа уравнивания по сигналам, сформированным ФЧНО.

Алгоритм, допускающий как поочередное, так и одновременное переключение образцовых элементов обоих регулирующих органов, целесообразно использовать в случае цепей с линиями уравнивания, близкими к прямым (например, при прямоугольно-координатных компенсационных цепях, при некоторых цепях с тесной индуктивной связью плеч и т. п.). При этом области ошибок обычно невелики и среднее (по всему диапазону измерения) число тактов уравнивания будет приближаться к числу образцовых элементов одного регулирующего органа (с наибольшим числом этих элементов).

Алгоритм с поочередным переключением образцовых элементов регулирующих органов допускает большие фазовые нестабильности в системе и его целесообразно применять при уравнивании цепей с большими колебаниями фазовых соотношений в пределах диапазона измерения.

Выражения для оценки допустимых фазовых нестабильностей, оценки погрешностей уравнивания и выбора настроек ФЧНО, полученные для случая четырехплечих мостовых цепей, уравниваемых па-

параметрами β_2 и γ_2 , справедливы и для прямоугольно-координатных компенсаторов. Для последнего случая выражения для сигналов управления, сформированных ФЧНО, также имеют вид (6) и (7) с тем отличием, что теперь $\Delta\beta_2$ и $\Delta\gamma_2$ следует считать отклонениями регулирующих органов, создающих синфазную и квадратурную составляющие компенсирующего напряжения, а входящие в ψ и Θ величины φ_1 и φ_2 следует считать равными нулю.

Предложенная методика анализа сходимости алгоритмов координированного однонаправленного уравнивания позволяет получить необходимые оценки и выбрать параметры настроек ФЧНО и при использовании других измерительных цепей переменного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Десова, В. Ю. Кнеллер. Об одном алгоритме координированного уравнивания для цифровых приборов переменного тока.— *Автоматика*, 1967, № 4.
2. В. Ю. Кнеллер. Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления. М., «Энергия», 1967.

*Поступила в редакцию
10 июля 1968 г.,
окончательный вариант —
18 января 1969 г.*