

В. Б. КАНТОРОВИЧ,
А. М. МЕЛИК-ШАХНАЗАРОВ, И. Л. ШАЙН

(Баку)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УРАВНОВЕШИВАНИЯ В ЦИФРОВЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА*

В статье изложен графоаналитический метод исследования процесса уравнивания в цифровых автоматических прямоугольно-координатных компенсаторах переменного тока, заключающийся в построении на плоскости компенсирующих напряжений годографа разностного напряжения ΔU и в анализе характера его перемещения. Получена зависимость допустимой степени взаимосвязи контуров уравнивания от параметров компенсатора.

Развитие методов и средств цифровой измерительной техники до последнего времени почти не затрагивало вопросов измерения комплексных величин. Между тем во многих случаях применение цифровых методов измерения комплексных значений сопротивлений, токов и напряжений позволяет значительно повысить метрологические качества служащих для этой цели устройств [1, 2].

Автоматические компенсаторы переменного тока являются универсальными приборами для измерения различных комплексных величин, поэтому исследование процесса уравнивания в цифровых компенсаторах этого типа представляет значительный интерес. Цифровые компенсаторы более подвержены взаимовлиянию контуров уравнивания, чем аналоговые [1]. В частности, из-за взаимосвязи контуров уравнивания возможно возникновение автоколебаний исполнительных органов даже при частоте генератора тактовых импульсов, близкой к нулю.

При разработке и наладке схем компенсаторов степень взаимосвязи контуров уравнивания может быть сведена к минимуму. Однако в процессе эксплуатации вследствие износа и старения элементов компенсатора, а также при колебаниях напряжения и частоты питающего тока степень взаимосвязи контуров уравнивания изменяется. Поэтому при разработке схем цифровых компенсаторов переменного тока прежде всего необходимо обеспечить их устойчивость при наличии определенной степени взаимосвязи контуров уравнивания.

В автоматических цифровых компенсаторах наиболее распространенным является способ уравнивания снизу, начиная с младшей декады [3, 4]. Однако, как показали исследования [3], устойчивая работа

* Материал доложен на VI Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1964 г. в Новосибирске.

автоматического компенсатора возможна при весьма малой степени взаимосвязи контуров уравнивания и поэтому существенно зависит от колебаний частоты и напряжения питания.

Авторами проведено исследование процесса уравнивания в автоматических цифровых компенсаторах переменного тока, позволившее выявить рациональные пути построения последних. Учитывая возможность незатухающего процесса при частоте генератора тактовых импульсов, близкой к нулю, можно пренебречь инерционностью элементов компенсатора и провести исследование графоаналитическим методом. Это позволяет выявить допустимую степень взаимосвязи контуров уравнивания в функции параметров компенсатора и принятого метода уравнивания и тем самым обеспечивает построение структурно устойчивых компенсаторов. Исследование можно провести и методом математического моделирования, используя электронную цифровую вычислительную машину в качестве модели цифрового компенсатора переменного тока [5].

Графоаналитический метод исследования заключается в построении векторов измеряемого, компенсирующего и разностного напряжений в различные моменты времени на плоскости компенсирующих напряжений и в анализе закона перемещения в этой плоскости вектора разностного напряжения $\Delta \dot{U}$ в процессе уравнивания.

Кроме того, на плоскости компенсирующих напряжений наносятся векторы фазовой чувствительности \dot{A}_x и \dot{A}_y и характерные участки работы исполнительных органов. Если конец вектора разностного напряжения $\Delta \dot{U} = \dot{U}_n - \dot{U}_{kx} - \dot{U}_{ky}$ находится в области I (рис. 1), то его проекции на направления векторов фазовой чувствительности \dot{A}_x и \dot{A}_y больше порогов чувствительности соответствующих исполнительных органов, и поэтому при поступлении тактового импульса оба исполнительных органа изменят компенсирующие напряжения.

Если же конец вектора $\Delta \dot{U}$ находится в области II, то его проекция на вектор \dot{A}_x меньше δU , и поэтому при поступлении следующего тактового импульса изменится только компенсирующее напряжение \dot{U}_{ky} (подобное наблюдается соответственно и в области III).

Область IV является зоной нечувствительности. Расположение конца вектора $\Delta \dot{U}$ в этой зоне означает окончание процесса уравнивания.

Предположим, что в момент подачи на вход компенсатора измеряемого напряжения \dot{U}_n имеем $\dot{U}_{kx} = 0$, а \dot{U}_{ky} равно напряжению, снимаемому с пяти дискретных делений (секций) младшей декады, т. е. конец вектора $\Delta \dot{U}$ расположен в точке N (5). В этом случае проекции вектора $\Delta \dot{U}$ на \dot{A}_x и \dot{A}_y имеют положительные значения, поэтому при следующем тактовом импульсе по каждой из осей вводятся положительные значения единиц компенсирующих напряжений и конец вектора $\Delta \dot{U}$ переместится в точку 6, а затем в точки 7, 8 и 9. Точке 9 соответствуют значения компенсирующих напряжений: $\dot{U}_{kx} = 4$ и $\dot{U}_{ky} = 9$. Так как проекции вектора разностного напряжения $\Delta \dot{U}$ на векторы фазовой чувствительности сохраняют свои знаки и по величине превышают пороги чувствительности соответствующих исполнительных органов, то компенсирующие напряжения изменяются в прежнем направлении. Но, согласно принятому способу уравнивания (снизу, начиная с младшей декады), по оси \dot{U}_{ky} будут вводиться секции следующей, старшей декады (т. е. десятки), и поэтому конец вектора $\Delta \dot{U}$ переместится в точку 10, а затем в точку 11.

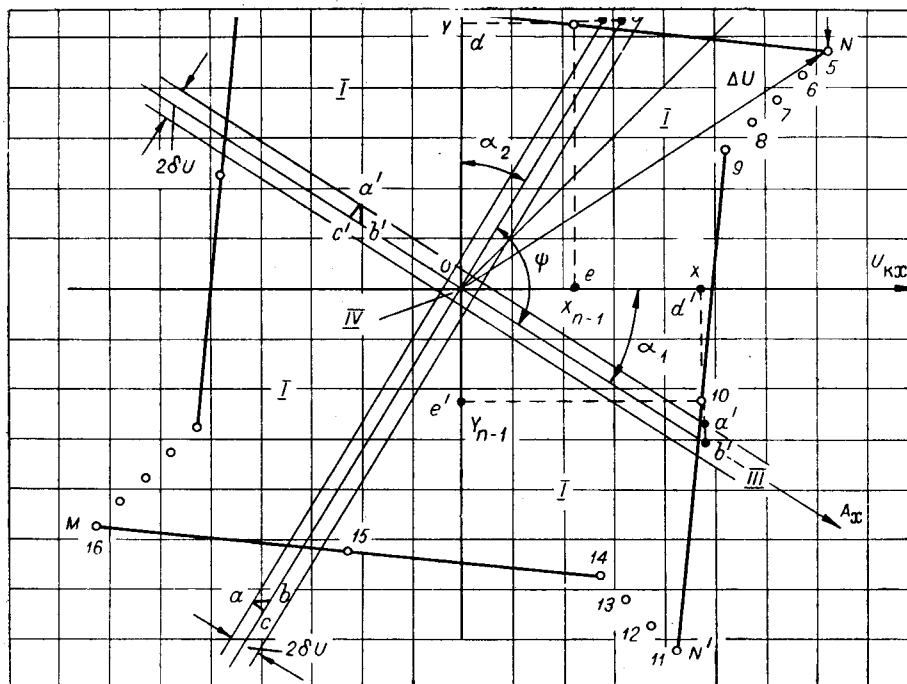


Рис. 1.

Проекция вектора ΔU на вектор A_x , соответствующая положению 11, изменяет свой знак, и поэтому проекция компенсирующего напряжения на ось $U_{кx}$ будет изменяться в обратном направлении, причем изменение начнется с единиц. При поступлении следующего тактового импульса конец вектора ΔU перемещается в точки 12, 13, 14, 15 и т. д.

Конец вектора разностного напряжения периодически вращается вокруг начала координат, не попадая в область IV (см. рис. 1), т. е. в системе компенсатора имеют место автоколебания исполнительных органов.

В автоматических компенсаторах возможно большое разнообразие циклов автоколебаний, которые зависят от числа декад делителей компенсирующих напряжений, участвующих в автоколебаниях, от числа секций старшей декады, входящих в цикл автоколебаний, и от сдвига между автоколебаниями по каждой из осей компенсирующих напряжений. Кроме того, автоколебания могут быть симметричными и несимметричными относительно начала координат. Однако можно показать, что углы α_1 и α_2 (см. рис. 1), определяющие минимально допустимую степень взаимосвязи контуров уравнивания автоматического компенсатора, получаются при симметричных автоколебаниях, и поэтому в дальнейшем рассматриваются только симметричные автоколебания.

Автоколебания в цифровом компенсаторе характеризуются следующими параметрами:

1) периодом колебаний T , который условно принимается равным количеству срабатываний вдоль данной оси при обходе всего цикла автоколебаний:

$$T = 2 [l(k - 1) + n_k],$$

где k — количество декад делителей напряжения, участвующих в автоколебаниях;

n_k — число секций старшей декады, участвующих в автоколебаниях;
 l — максимальное число секций каждой декады (например, на рис. 1 $l = 9$, $k = 2$, $n_k = 2$);

2) амплитудой автоколебаний по данной оси A_k , равной половине расстояния между крайними точками цикла M и N или M' и N' :

$$A_k = \frac{10^{k-1} n_k + l \sum_{m=0}^{k-2} 10^m}{2};$$

3) временным сдвигом φ , равным количеству срабатываний, на которое автоколебания по оси \dot{U}_{kx} сдвинуты относительно автоколебаний по оси \dot{U}_{ky} . В плоскости \dot{U}_{kx} , \dot{U}_{ky} (см. рис. 1) сдвиг φ выражается количеством срабатываний от точки M' до точки N , причем отсчет ведется по направлению движения конца вектора $\Delta \dot{U}$ (на рис. 1 $\varphi = 5$).

Как видно из рис. 1, при $\left(\frac{T}{2} - 1\right)$ -м срабатывании исполнительного органа, вводящего компенсирующее напряжение \dot{U}_{kx} , конец вектора $\Delta \dot{U}$ подходит к зоне II (точка 4), а при $\left(\frac{T}{2} - 1\right)$ -м срабатывании исполнительного органа, вводящего \dot{U}_{ky} , конец вектора $\Delta \dot{U}$ подходит к зоне III. Это является необходимым условием возникновения данного цикла автоколебаний. Если это условие не выполняется, то процесс уравнивания либо может оказаться устойчивым, либо возникает другой цикл автоколебаний.

Сформулированное необходимое условие возникновения автоколебаний можно выразить следующими соотношениями (см. рис. 1):

$$\begin{cases} 0e < ad; \\ 0e' < a'd'. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь

$$ad = bd - ab; \quad 0e = 0e' = X_{n-1} = -Y_{n-1};$$

$$bd = Y \operatorname{tg} \alpha_2;$$

$$ab = \frac{\delta U}{\cos \alpha_2}.$$

Поэтому (1) принимает вид

$$X_{n-1} < Y \operatorname{tg} \alpha_2 - \frac{\delta U}{\cos \alpha_2}. \quad (3)$$

Аналогично преобразуется и (2):

$$-Y_{n-1} < X \operatorname{tg} \alpha_1 - \frac{\delta U}{\cos \alpha_1}. \quad (4)$$

Координаты X_{n-1} и $-Y_{n-1}$ определяются выражением

$$Z_{n-1} = \frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1}, \quad (5)$$

где

$$Z_{n-1} = \begin{cases} X_{n-1} & \text{для автоколебаний по оси } \dot{U}_{kx}; \\ -Y_{n-1} & \text{для автоколебаний по оси } \dot{U}_{ky}. \end{cases}$$

Например, при $k=1$ (т. е. если в автоколебаниях участвует только младшая декада)

$$Z_{n-1} = \frac{n_1}{2} - 1.$$

Подставляя (5) в (3) и (4), получаем:

$$\left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1} \right] \cos \alpha_2 < Y \sin \alpha_2 - \delta U; \quad (6)$$

$$\left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1} \right] \cos \alpha_1 < X \sin \alpha_1 - \delta U. \quad (7)$$

Неравенства (6) и (7) выражают собой необходимое условие возникновения данного типа автоколебаний.

При уменьшении углов α_1 и α_2 до значений $\alpha_{1 \text{ гр}}$ и $\alpha_{2 \text{ гр}}$ нарушается соответствующее из неравенств (6) или (7). Граничные значения углов $\alpha_{1 \text{ гр}}$ и $\alpha_{2 \text{ гр}}$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{1 \text{ гр}} = & \frac{\delta UX + \left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1} \right] \times}{X^2 + \left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \right.} \\ & \left. \times \sqrt{X^2 - \delta U^2 + \left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1} \right]^2} \right. \\ & \left. + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) \cdot 10^{k-1} \right]^2}; \quad (8) \end{aligned}$$

$$\sin \alpha_{2 \text{ гр}} = \frac{\delta UY + \left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1} \right] \times}{Y^2 + \left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1} \right]^2} \times \sqrt{\frac{Y^2 - \delta U^2 + \left[\frac{l}{2} \sum_{m=0}^{k-2} 10^m + \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1} \right]^2}{+ \left(\frac{n_k}{2} - 1 \right) 10^{k-1}]} \quad (9)$$

При повороте вектора \dot{A} в сторону уменьшения α первым оказывается равным граничному тот из углов α , для которого $\alpha_{\text{гр}}$ больше, поэтому при определении $\alpha_{\text{гр}}$ для данного цикла автоколебаний следует брать ту из формул (8) и (9), которая соответствует большему $\alpha_{\text{гр}}$, т. е. для которой

$$Z = \begin{cases} X & \text{при } X \leq Y; \\ Y & \text{при } X > Y. \end{cases} \quad (10)$$

Значения X и Y определяются так:

$$X = (n_k - 1) 10^{k-1} + M - (n_k - 1 + s'l - \varphi) 10^{k-s'-2} - X_{n-1}; \quad (11)$$

$$Y = 10^{k-1} + X_{n-1} + (s''l - \varphi + 1) 10^{s''} - l \sum_{m=0}^{s''-1} 10^m, \quad (12)$$

где

$$M = \begin{cases} 0 & \text{при } s' = 0; \\ l \sum_{m=k-2}^{k-s'-1} 10^m & \text{при } s' \geq 1; \end{cases}$$

$$s' = \lambda \left[\frac{\varphi - n_k + 1}{l} \right]; \quad s'' = \lambda \left[\frac{\varphi - 1}{l} \right]; \quad \lambda \left[\frac{\varphi - n_k + 1}{l} \right]; \quad \lambda \left[\frac{\varphi - 1}{l} \right] -$$

меньшая целая часть от выражения в квадратных скобках.

Из выражений (11) и (12) видно, что X и Y зависят от φ . Очевидно, что минимально допустимое значение граничного угла $(\alpha_{\text{гр}}(\alpha_{\text{грmin}}))$, которое в конечном счете нас интересует, имеет место при $Z = Z_{\text{max}}$.

Можно показать, что $Z = Z_{\text{max}}$ при $\varphi_{\text{гр}} = \frac{l}{2}(k-1) + \frac{n_k}{2}$.

В некоторых случаях (при нечетных значениях k и n_k) $\varphi_{\text{гр}}$ оказывается дробным числом вида $\frac{N}{2}$, где N — целое число. Поскольку такое значение $\varphi_{\text{гр}}$ практически невозможно, так как φ — целое число, то в качестве $\varphi_{\text{гр}}$ берется ближайшее целое значение: $\varphi'_{\text{гр}} = \varphi_{\text{гр}} \pm 0,5$. Тогда при определении $\alpha_{\text{грmin}}$, либо в (11) подставляется значение $\varphi_{\text{гр}} - 0,5$ (тогда $Z_{\text{max}} = X$ и используется (8)), либо в (12) — значение $\varphi_{\text{гр}} + 0,5$ (тогда $Z_{\text{max}} = Y$ и используется (9)).

Для примера определим $\alpha_{\text{гpmin}}$ автоматического компенсатора, у которого $k=3$, $l=14$, $\delta U=0,6$ и $n_k=1$. Расчеты производятся по приведенным выше формулам в следующей последовательности:

1. $\varphi_{\text{гp}} = \frac{14}{2}(3-1) + \frac{1}{2} = 14,5$. Принимаем $\varphi'_{\text{гp}} = 14$.
2. $s' = \lambda \left[\frac{14-1+1}{14} \right] = 1$.
3. $M = 14 \cdot 10 = 140$.
4. $X_{n-1} = \frac{14}{2}(1+10) + \left(\frac{1}{2}-1\right)10^2 = 27$.
5. $X = 140 - (1-1+1 \cdot 14-14) \cdot 1 - 27 = 113$.
6. $\sin \alpha_{\text{гpmin}} = \frac{0,6 \cdot 113 + 27 \sqrt{113^2 - 0,6^2 + 27^2}}{113^2 + 27^2} = 0,237$.
7. $\alpha_{\text{гpmin}} = 13^\circ 43'$.

Если в (8) или (9) подставить значения: $\delta U=0,5$, $l=9$, $n_k=1$, то независимо от Z и k $\sin \alpha_{\text{гp}} = 0$ и $\alpha_{\text{гp}} = 0$.

При других же значениях n_k ($2 \leq n_k \leq l$) $\sin \alpha_{\text{гp}} > 0$. Следовательно, минимально допустимый угол $\alpha_{\text{гpmin}}$ как функцию δU и l следует определять, рассматривая циклы колебаний с $n_k=1$.

Необходимо иметь в виду, что в автоматических компенсаторах возможны автоколебания, не зависящие от l , когда $k=1$ и в цикле автоколе-

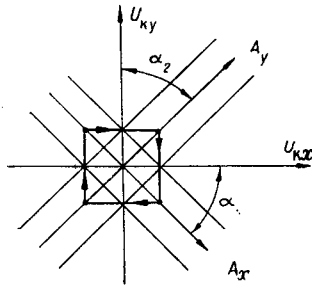


Рис. 2.

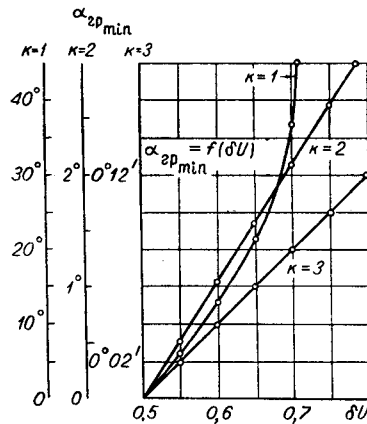


Рис. 3.

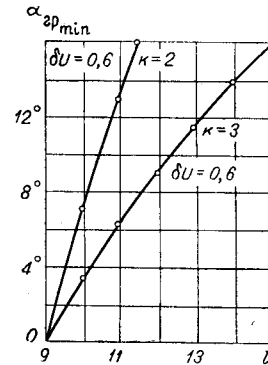


Рис. 4.

баний участвуют только секции младшей декады. На рис. 2 изображен цикл автоколебаний для $n_k=1$. Соответствующая зависимость $\alpha_{\text{гpmin}} = f(\delta U)$ дана на рис. 3.

Пользуясь полученными выше выражениями, можно определить зависимость $\alpha_{\text{гpmin}} = f(k, \delta U)$. Из графика рис. 3, построенного для автоматического компенсатора при $l=9$ для различных значений k , видно, что при $k \geq 2$ $\alpha_{\text{гpmin}}$ имеет малые значения, что и определяет недостаточно устойчивую работу такого цифрового компенсатора.

Наряду с этим из (8) и (9) видно, что $\alpha_{гр}$ можно увеличить за счет увеличения δU и l . Однако значительное увеличение δU нерационально, так как это уменьшает точность измерения прибора. Поэтому в качестве одного из путей повышения устойчивости работы цифровых автоматических прямоугольно-координатных компенсаторов со способом уравнивания снизу, начиная с младшей декады, может быть рекомендовано увеличение числа секций в декадах делителей напряжения в зависимости от ожидаемой взаимосвязи контуров уравнивания (рис. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Мелик-Шахназаров, И. Л. Шайн, Т. М. Алиев. К вопросу разработки автоматических цифровых компенсаторов переменного тока. ИВУЗ, Приборостроение, 1961, № 6.
2. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
3. А. М. Мелик-Шахназаров, Т. М. Алиев, И. Л. Шайн. Автоматический прямоугольно-координатный компенсатор. Авторское свидетельство № 146872 (приоритет от 4 мая 1961 г.). Бюллетень изобретений, 1962, № 9.
4. Н. В. Кирианаки. Автоматический цифровой вольтамперметр постоянного тока и пути увеличения быстродействия и срока службы цифровых электромеханических приборов.— Труды конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
5. И. Л. Шайн. Исследование процесса уравнивания в автоматических цифровых компенсаторах переменного тока методом моделирования на электронной цифровой вычислительной машине.— Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания по радиоэлектронным методам измерений электрических напряжений и омических сопротивлений. Таллин, 1964.

*Поступила в редакцию
15 сентября 1964 г.*