

## О СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МНГОВЫХОДНОГО ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЙ ПИТАНИЯ

В.В. Талов

Обосновывается метод стабилизации с заданными погрешностями выходных напряжений независимо от нагрузки на выходах в многовыходном источнике напряжений питания без использования обратных связей по току нагрузок с одним регулирующим элементом, например, обмоткой возбуждения в многовыходном электромашинном генераторе. Метод заключается во введении в систему автоматического регулирования напряжений источника сигналов обратных связей по напряжению всех выходов со своими весовыми коэффициентами. Весовой коэффициент показывает, какую часть составляет сигнал обратной связи по напряжению данного выхода от общего сигнала обратной связи по напряжению. Приведена методика расчёта весовых коэффициентов, исходя из заданных пределов уровней стабилизации выходных напряжений и статизмов внешних характеристик выходов источника. В качестве иллюстрации приведён расчёт весовых коэффициентов обратных связей по напряжению выходов источника и значений уровней стабилизации выходных напряжений для четырёхвыходного источника.

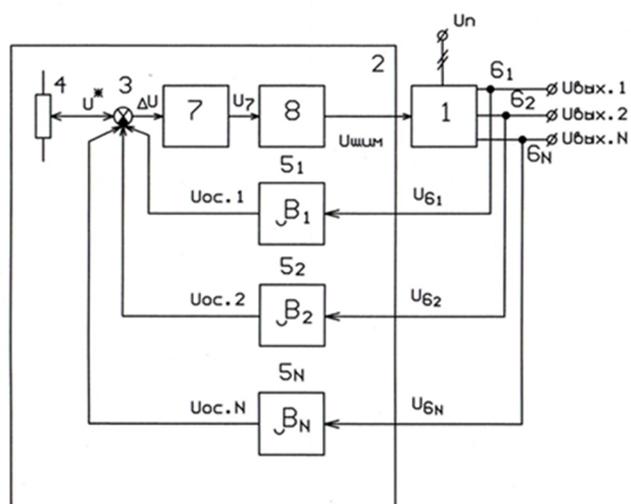
**Ключевые слова:** многовыходной источник напряжений питания, весовой коэффициент сигнала обратной связи по напряжению, заданный предел уровня стабилизации напряжения, статизм внешней характеристики выхода источника, система автоматического регулирования напряжений.

Существуют многовыходные источники напряжений питания, в которых возникает задача стабилизации выходных напряжений при изменении нагрузки на выходах с помощью одного регулирующего элемента. Таким источником является, например, многовыходной электромашинный генератор с одним регулирующим элементом – обмоткой возбуждения. В этом случае система регулирования напряжения на выходах обычно строится с обратной связью по напряжению того выхода, на котором погрешность стабилизации напряжения должна быть минимальной [1, 2].

Однако при изменении нагрузок на выходах стабилизация напряжения независимо от нагрузок будет осуществляться на том выходе, по выходному напряжению которого осуществлена обратная связь в системе регулирования. На остальных выходах погрешности стабилизации напряжений будут определяться не только падениями напряжений от токов нагрузок на внутренних импедансах выходов, но и взаимным влиянием выходов через общий импеданс источника.

В статье предлагается решение задачи стабилизации напряжений на выходах источника с заданными погрешностями независимо от нагрузок на них с помощью одного регулирующего элемента, например, обмотки возбуждения в многовыходном электромашинном генераторе без использования обратных связей по токам нагрузок.

На рис. 1 представлена функциональная схема многовыходного источника напряжений питания, где: 1 – многовыходной источник напряжений питания; 2 – устройство регулирования; 3 – узел сравнения; 4 – задатчик входного сигнала;  $\beta_1 \dots \beta_N$  – делители напряжений обратных связей;



**Рис. 1. Функциональная схема многовыходного источника напряжений питания**

$\beta_1 \dots \beta_N$  – датчики напряжений обратных связей; 7 – усилитель сигнала рассогласования; 8 – модулятор выходного сигнала усилителя сигнала рассогласования;  $U^*$  – сигнал заданного значения выходных напряжений;  $U_7$  – выходной сигнал усилителя сигнала рассогласования;  $U_{шмм}$  – выходной сигнал модулятора;  $U_{вых.1} \dots U_{вых.N}$  – выходные напряжения источника;  $U_{б1} \dots U_{бN}$  – выходные сигналы датчиков напряжений;  $U_{ос.1} \dots U_{ос.N}$  – выходные сигналы делителей напряжений, сигналы обратных связей по выходным напряжениям;  $\beta_1 \dots \beta_N$  – весовые коэффициенты передачи делителей напряжений. (Весовой коэффициент  $\beta_m$  ( $m=1 \dots N$ ) показывает, какую часть составляет сигнал обратной связи по напряжению с выхода  $m$  от общего сигнала обратной связи по напряжению.)

На рис. 2 приведена схема замещения многовыходного источника. В схеме введены следующие обозначения:  $E$  – ЭДС источника (ЭДС генератора, если источником является многовыходной генератор, или напряжение на первичной обмотке трансформатора с несколькими вторичными обмотками);  $U_{\text{вых } 1}^* \dots U_{\text{вых } N}^*$  – выходные напряжения, приведённые к первичной стороне,  $B$ ;  $R_3$  – эквивалентное внутреннее сопротивление источника, Ом;  $R'_{31} \dots R'_{3m} \dots R'_{3N}$  – внутренние сопротивления выходов  $1, \dots, m, \dots, N$ , приведённые к первичной стороне, Ом;  $R'_{d1} \dots R'_{dm} \dots R'_{dN}$  – сопротивления нагрузок  $1, \dots, m, \dots, N$ , приведённые к первичной стороне.

Введены следующие соотношения на примере  $m$ -го выхода, имея в виду, что аналогичные соотношения справедливы для любого из  $N$  выходов:

$$\delta_{m1} = \frac{R_3}{R_3 + R'_{31} + R'_{d1}} - \text{статизм внешней характеристики, т. е. зависимость ошибки выходного напряжения выхода } m \text{ при нагрузке выхода } 1 \text{ и холостого хода на остальных } (N-1) \text{ выходах;}$$

$\delta_{mm} = \frac{R_3}{R_3 + R'_{3m} + R'_{dm}}$  – статизм внешней характеристики выхода  $m$  при его нагрузке и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах;

$$\delta_{mn} = \frac{R_3}{R_3 + R'_{3n} + R'_{dn}}$$

статизм внешней характеристики выхода  $m$  при нагрузке выхода  $N$  и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах;

$$\delta_m = \delta_{m1} + \delta_{m2} + \dots + \delta_{mm} + \dots + \delta_{mN} - \text{статизм внешней характеристики выхода } m \text{ при нагрузке всех } N \text{ выходов источника, очевидно, } U_{\text{вых } m}^* = E(1 - \delta_m), \text{ где } m=1, 2, \dots, N.$$

статизм внешней характеристики выхода  $m$  при нагрузке всех  $N$  выходов источника, очевидно,  $U_{\text{вых } m}^* = E(1 - \delta_m)$ , где  $m=1, 2, \dots, N$ .

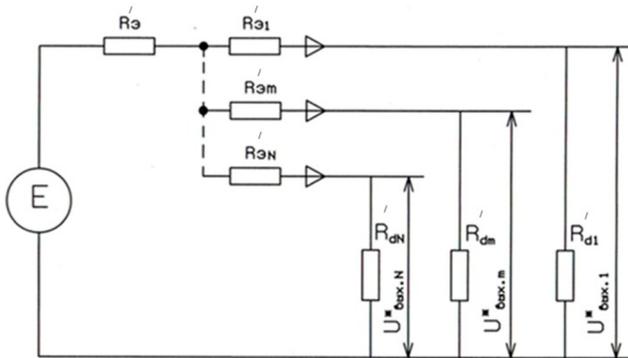


Рис. 2. Схема замещения многовыходного источника напряжений питания

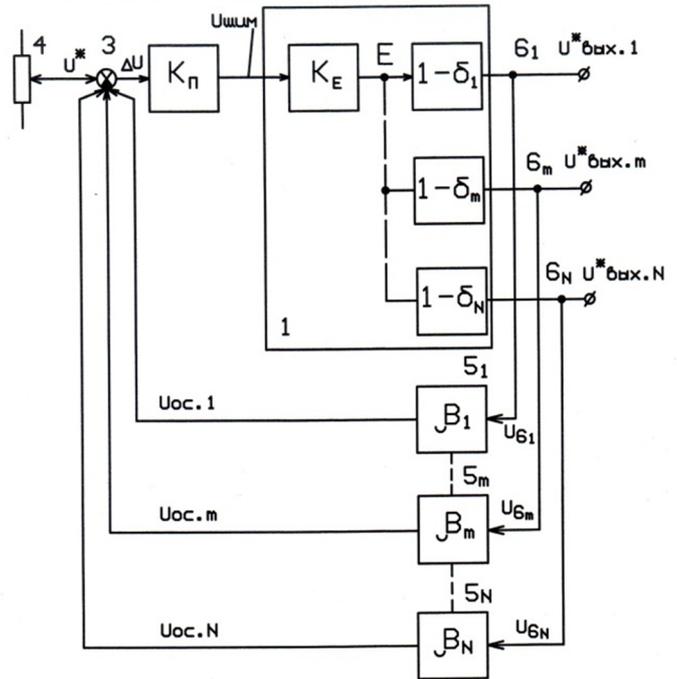


Рис. 3. Структурная схема многовыходного источника напряжений питания

На рис. 3 представлена структурная схема многовыходного источника напряжений питания, в которой усилитель  $\beta$  сигнала рассогласования и модулятор  $\delta$  объединены в одно устройство с коэффициентом передачи  $K_p$ , а источник представлен в виде многовыходного устройства с коэффициентами передач  $K_E(1 - \delta_m)$ , где  $m=1, 2, \dots, N$ , соответственно числу выходов.

Как следует из определения статизмов  $\delta_1 \dots \delta_N$  внешних характеристик выходов источника  $1 \dots N$ , изменения нагрузок на любом количестве выходов повлечёт изменения напряжений на всех  $N$  выходах источника. Эти изменения выходных напряжений фиксируются датчиками  $b_1 \dots b_N$  напряжений и с их выходов поступают на вход делителей напряжений  $\beta_1 \dots \beta_N$ . С выходов делителей напряжений эти изменения напряжений со своими весовыми коэффициентами  $\beta_1 \dots \beta_N$  поступают на входы узла сравнения 3 в виде сигналов обратной связи по напряжению  $U_{oc.1} \dots U_{oc.N}$ .

В результате изменяется величина интегрального сигнала рассогласования  $\Delta U$  и, следовательно, величина ЭДС  $E$  источника так, что это приводит к компенсации изменений выходных напряжений  $U_{\text{вых } 1}^* \dots U_{\text{вых } N}^*$ , вызванных изменением нагрузок и восстановлению их уровней с заданными погрешностями.

Если все датчики  $b_1 \dots b_N$  напряжений регулированием их коэффициентов передач настроить таким образом, чтобы при холостом ходе на всех  $N$  выходах источника выполнялось равенство

$$U_{b1(ном)} = \dots = U_{bN(ном)} = U^*$$

то в этом случае весовые коэффициенты передач делителей  $5_1 \dots 5_N$  напряжений будут равны весовым коэффициентам  $\beta_1 \dots \beta_N$  соответствующих сигналов обратных связей по напряжениям  $U_{oc.1} \dots U_{oc.N}$ .

Ниже приведена методика расчёта весовых коэффициентов  $\beta_1 \dots \beta_N$ , исходя из заданных пределов уровней стабилизации выходных напряжений и статизмов внешних характеристик выходов источника.

Схема на рис. 3 может быть описана следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= U^* - \sum_{m=1}^n U_{oc.m} \\ E_{ном} &= K_{\Pi} K_E \Delta U \\ U_{вых.m}^* &= E_{ном} (1 - \delta_{ml}) \\ \delta_m &= \sum_{l=1}^N \delta_{ml} \\ U_{oc.m} &= \beta_m U_{6m} \\ U_{6m} &= U_{вых.m}^* \\ \sum_1^N \beta_m &= 1 \end{aligned} \right\} m = 1 \dots N, \quad (1)$$

где  $E$  – ЭДС источника;  $\delta_m$  – статизм внешней характеристики выхода  $m$  ( $m=1, 2, \dots, N$ );  $U_{вых.m}^*$  ( $ном$ ),  $U_{вых.m}^*$  при  $m=1, 2, \dots, N$  – соответственно, номинальное и текущее значение выходных напряжений, приведённые к первичной стороне  $B$ ;  $U_{6m}$ ,  $U_{oc.m}^*$  при  $m=1, 2, \dots, N$  – текущие значения напряжений на выходе датчиков и напряжений обратных связей,  $B$ ;  $\Delta U$  – сигнал рассогласования,  $B$ ;  $U^*$  – сигнал заданного значения выходных напряжений,  $B$ ;  $\delta_{ml}$  – статизм внешней характеристики выхода  $m$  при нагрузке выхода  $l$  и холостом ходе на остальных ( $N-1$ ) выходах ( $l=1, 2, \dots, N$ ).

Приняв за базовые напряжения  $U^*$  для сигналов обратных связей и  $E_{ном}$  (номинальное значение ЭДС источника при холостом ходе на всех выходах и принятых за номинальное значение выходных

напряжений), перепишем уравнение (1) в относительных единицах (о. е.)

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= 1^* - \sum_{m=1}^n U_{oc.m} \\ \frac{1}{K} &= \Delta U \\ U_{вых.m}^* &= (1 - \delta_m) \\ \delta_m &= \sum_{l=1}^N \delta_{ml} \\ U_{oc.m} &= \beta_m U_{6m} \\ U_{6m} &= U_{вых.m}^* \\ \sum_1^N \beta_m &= 1 \end{aligned} \right\} m = 1 \dots N, \quad (2)$$

где  $K = K_{\Pi} K_E \frac{U^*}{E_{ном}}$ .

Обозначим  $\xi_m = \frac{U_{6m}}{U^*}$  – уровень стабилизации напряжения на выходе  $m$  при нагрузке на всех выходах ( $m=1, 2, \dots, N$ ), о. е.

После соответствующих преобразований из (2) получаем

$$\xi_m = \frac{1 - \delta_m}{\frac{K+1}{K} - \sum_{m=1}^N \beta_m \sum_{l=1}^N \delta_{ml}}, \quad (3)$$

где  $m=1, 2, \dots, N$ .

Перепишем уравнение (3) в несколько ином виде:

$$\frac{1 - \sum_{l=1}^N \delta_{ml}}{\xi_m} = \frac{K+1}{K} - \sum_{m=1}^N \beta_m \sum_{l=1}^N \delta_{ml}, \quad (4)$$

где  $\delta_{ml}$  – статизм внешней характеристики выхода  $m$  при нагрузке выхода  $l$  и холостом ходе на остальных ( $N-1$ ) выходах.

Из уравнения (4) следует, что задавшись уровнем стабилизации  $\xi_m$  напряжения по выходу  $m$ , можно детерминированно получить уровни стабилизации на остальных ( $N-1$ ) выходах при нагрузке любого количества выходов.

Значения весовых коэффициентов  $\beta_m$  ( $m=1, 2, \dots, N$ ) определяются, исходя из требуемых значений верхнего и нижнего пределов уровней стабилизации выходных напряжений  $\xi_{max}$  и  $\xi_{min}$  ( $m=1, 2, \dots, N$ ) и статизмов внешних характери-

стик выходов источника  $\delta_1 \dots \delta_N$  путём составления  $N$  уравнений, из которых  $(N-1)$  уравнений составляются по выражению (4), а  $N$ -м уравнением является уравнение

$$\sum_1^N \beta_m = 1 \quad (5)$$

При этом для выходов, имеющих меньшее значение статизма внешней характеристики  $\delta_m$  по выражению (4), составляются уравнения при условии холостого хода данного выхода и нагрузки на остальных  $(N-1)$  выходах.

В результате получаем:

$$1 - \frac{\sum_{l=1}^N \delta_{dl} + \delta_{dd}}{\beta_{d\max}} = \frac{K+1}{K} - \sum_{m=1}^N \beta_m \sum_{l=1}^N \delta_{ml} + \sum_{m=1}^N \beta_m \delta_{md}, \quad (6)$$

где  $d$  – порядковый номер выхода с меньшим статизмом;  $\delta_{dl}$  – статизм внешней характеристики выхода  $d$  при нагрузке выхода  $l$  и холостого хода на остальных  $(N-1)$  выходах;  $\delta_{dd}$  – статизм внешней характеристики выхода  $d$  при его нагрузке и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах;  $\delta_{md}$  – статизм внешней характеристики выхода  $m$  при нагрузке выхода  $d$  и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах;  $\delta_{ml}$  – статизм внешней характеристики выхода  $m$  при нагрузке выхода  $l$  и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах;  $\zeta_{d\max}$  – верхний предел уровня стабилизации напряжения на выходе  $d$ .

Для выходов, имеющих большее значение статизма внешней характеристики  $\delta_m$  по выражению (4), составляются уравнения при условии нагрузки на данном выходе и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах.

В результате получаем уравнение вида:

$$\frac{1 - \delta_{ii}}{\xi_{i\min}} = \frac{K+1}{K} - \sum_{m=1}^N \beta_m \delta_{mi}, \quad (7)$$

где  $i$  – порядковый номер выхода с большим статизмом;  $\delta_{ii}$  – статизм внешней характеристики выхода  $i$  при его нагрузке и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах;  $\delta_{mi}$  – статизм внешней характеристики выхода  $m$  при нагрузке выхода  $i$  и холостом ходе на остальных  $(N-1)$  выходах;  $\xi_{i\min}$  – нижний предел уровня стабилизации напряжения на выходе  $i$ .

Очевидно суммарное количество уравнений, составляемых по выражениям (6) и (7), должно быть равно  $(N-1)$ , а  $N$ -м уравнением является  $\sum_1^N \beta_m = 1$ .

Введение понятий «большее и меньшее значения статизмов внешних характеристик выходов» как критерия сравнительной оценки статизмов выходов источника означает, что в соответствии со значениями статизмов выходы могут быть выстроены в ряд либо в порядке возрастания статизмов, когда выход  $l$  имеет минимальное значение статизма внешней характеристики, а выход  $N$  максимальное значение, либо в порядке убывания статизмов, когда выход  $l$  имеет максимальное значение статизма внешней характеристики, а выход  $N$  минимальное значение. Если из этого ряда исключить выходы  $l$  и  $N$  с минимальным (максимальным) и максимальным (минимальным) значениями статизмов внешних характеристик, то из оставшихся  $(N-2)$  выходов выход  $2$  имеет наименьшее (наибольшее) значение статизма внешней характеристики, а выход  $(N-1)$  наибольшее (наименьшее) значение и т. д.

В соответствии с этим критерием определяется методика составления уравнений для расчёта весовых коэффициентов.

Поскольку любой конечный ряд имеет начало и конец, возможны два равноправных способа составления уравнений системы.

**Способ 1.** Первое уравнение составляется по выражению (6) для выхода с минимальным значением статизма внешней характеристики, а при одинаковых значениях статизмов внешних характеристик выходов для выхода с минимальными значениями заданных верхнего и нижнего пределов уровней стабилизации.

Второе уравнение составляется по выражению (7) для выхода с максимальным значением статизма внешней характеристики, а при одинаковых значениях статизмов внешних характеристик ходов для выхода с максимальными значениями заданных верхнего и нижнего пределов уровней стабилизации.

Третье уравнение составляется по выражению (6) для выхода с наименьшим значением статизма внешней характеристики из оставшихся  $(N-2)$  выходов, а при одинаковых значениях статизмов внешних характеристик для выхода с наименьшими значениями заданных верхнего и нижнего пределов уровней стабилизации.

Четвёртое уравнение составляется по выражению (7) для выхода с наибольшим значением

статизма внешней характеристики из оставшихся ( $N-2$ ) выходов, а при одинаковых значениях статизмов внешних характеристик для выхода с наибольшими значениями верхнего и нижнего пределов уровней стабилизации и далее указанным способом составляются остальные уравнения до ( $N-1$ )-го включительно.

**Способ 2.** Первое уравнение составляется по выражению (7) для выхода с максимальным значением статизма внешней характеристики, а при одинаковых значениях статизмов для выхода с максимальными значениями пределов уровней стабилизации.

Второе уравнение составляется по выражению (6) для выхода с минимальным значением статизма внешней характеристики, а при одинаковых значениях статизмов внешних характеристик для выхода с минимальными значениями пределов уровней стабилизации.

Третье уравнение составляется по выражению (7) для выхода с наибольшим значением статизма из оставшихся ( $N-2$ ) выходов, а при одинаковых значениях статизмов для выхода с наибольшими значениями пределов уровней стабилизации.

Четвёртое уравнение составляется по выражению (6) для выхода с наименьшим значением статизма из оставшихся ( $N-2$ ) выходов, а при одинаковых значениях статизмов для выхода с наименьшими значениями пределов уровней стабилизации и далее указанным способом составляются остальные уравнения до ( $N-1$ )-го включительно.

В качестве иллюстрации сказанного выше проводится расчёт весовых коэффициентов четырёх-выходного источника питания со следующими статизмами внешних характеристик:

$$\delta_{11}=0,1; \delta_{12}=0,04; \delta_{13}=0,07; \delta_{14}=0,09; \delta_1=0,30$$

$$\delta_{21}=0,02; \delta_{22}=0,15; \delta_{23}=0,06; \delta_{24}=0,08; \delta_2=0,31$$

$$\delta_{31}=0,03; \delta_{32}=0,04; \delta_{33}=0,20; \delta_{34}=0,07; \delta_3=0,34$$

$$\delta_{41}=0,04; \delta_{42}=0,05; \delta_{43}=0,04; \delta_{44}=0,25; \delta_4=0,38.$$

И следующими верхним и нижним пределами уровней стабилизации:

$$\xi_{1\max}=1,08 \quad \xi_{2\max}=1,1; \quad \xi_{3\max}=1,12; \quad \xi_{4\max}=1,15;$$

$$\xi_{1\min}=0,92; \quad \xi_{2\min}=0,90; \quad \xi_{3\min}=0,88; \quad \xi_{4\min}=0,85.$$

Составляются уравнения для расчёта весовых коэффициентов по **способу 1** при условии, что в выражениях (6) и (7)  $K \gg 1$ . Это условие соблюдается и во всех последующих расчётах. В результате получают систему уравнений.

$$\begin{aligned} \beta_1 + 1,45\beta_2 + 1,55\beta_3 + 1,7\beta_4 &= 1,296 \\ \beta_1 + 0,889\beta_2 + 0,778\beta_3 + 2,778\beta_4 &= 1,307 \\ \beta_1 + 0,615\beta_2 + 1,154\beta_3 + 1,27\beta_4 &= 0,909 \\ \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 &= 1. \end{aligned}$$

Из решения которой следует:

$$\beta_1=0,4479; \beta_2=0,3681; \beta_3=-0,0105; \beta_4=0,1944.$$

Рассмотрим различные случаи нагрузок на выходах 1, 2, 3, 4:

*a* – холостой ход выходов 1, 2, нагрузка выходов 3, 4.

По уравнению (4) получается для выхода 1:

$$\frac{1-0,16}{\xi_1} = 1 - 0,4479 \cdot 0,16 - 0,3681 \cdot 0,14 + 0,0105 \cdot 0,27 - 0,1944 \cdot 0,29 = 0,8233,$$

откуда следует  $\xi_1=1,02$ , для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1-0,14}{\xi_2} = 0,8233 \text{ и } \xi_2 = 1,045, \quad \frac{1-0,27}{\xi_3} = 0,8233 \text{ и } \\ \xi_3 = 0,887, \quad \frac{1-0,29}{\xi_4} = 0,8233 \text{ и } \xi_4 = 0,862, \end{aligned}$$

*b* – нагрузка выхода 1, холостой ход выходов 2, 3, 4.

По уравнению (4) получается для выхода 1:

$$\frac{1-0,1}{\xi_1} = 1 - 0,4479 \cdot 0,1 - 0,3681 \cdot 0,02 + 0,0105 \cdot 0,03 - 0,1944 \cdot 0,04 = 0,9404 \text{ и } \xi_1 = 0,957,$$

Для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1-0,02}{\xi_2} = 0,9404 \text{ и } \xi_2 = 1,042, \quad \frac{1-0,03}{\xi_3} = 0,9404 \text{ и } \\ \xi_3 = 1,031, \quad \frac{1-0,04}{\xi_4} = 0,9404 \text{ и } \xi_4 = 1,021, \end{aligned}$$

*в* – нагрузка выхода 4, холостой ход выходов 1, 2, 3.

По уравнению (4) получается для выхода 1:

$$\frac{1-0,09}{\xi_1} = 1 - 0,4479 \cdot 0,09 - 0,3681 \cdot 0,08 + 0,0105 \cdot 0,07 - 0,1944 \cdot 0,25 = 0,8824 \text{ и } \xi_1 = 1,031.$$

Для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\frac{1-0,08}{\xi_2}=0,8824 \text{ и } \xi_2=1,043, \frac{1-0,07}{\xi_3}=0,8824 \text{ и } \xi_3=1,054, \\ \frac{1-0,25}{\xi_4}=0,8824 \text{ и } \xi_4=0,85;$$

$\varepsilon$  – нагрузка выходов 1, 2, 3, 4.

По уравнению (4) для выхода 1 получаем:

$$\frac{1-0,03}{\xi_1}=1-0,4479 \cdot 0,3-0,3681 \cdot 0,31+0,0105 \cdot 0,34- \\ -0,1944 \cdot 0,38=0,7133 \text{ и } \xi_1=0,981.$$

Для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\frac{1-0,31}{\xi_2}=0,7133 \text{ и } \xi_2=0,967, \frac{1-0,34}{\xi_3}=0,7133 \text{ и } \xi_3=0,925, \\ \frac{1-0,38}{\xi_4}=0,7133 \text{ и } \xi_4=0,869.$$

Составим уравнения для расчёта весовых коэффициентов по способу 2.

В результате получается система уравнений:

$$\beta_1+0,889\beta_2+0,778\beta_3+2,778\beta_4=1,307 \\ \beta_1+1,45\beta_2+1,55\beta_3+1,7\beta_4=1,296 \\ \beta_1+0,857\beta_2+2,857\beta_3+0,571\beta_4=1,299 \\ \beta_1+\beta_2+\beta_3+\beta_4=1.$$

Из решения которой следует:

$$\beta_1=0,5018, \beta_2=0,0788, \beta_3=0,2144, \beta_4=0,2046.$$

Рассмотрим различные случаи нагрузок на выходах 1, 2, 3, 4:

$a$  – холостой ход выходов 1, 2 нагрузка выходов 3, 4.

По уравнению (4) для выхода 1 получаем:

$$\frac{1-0,16}{\xi_1}=1-0,5018 \cdot 0,16-0,0788 \cdot 0,14-0,2144 \cdot 0,27- \\ -0,2046 \cdot 0,29=0,7915 \text{ и } \xi_1=1,061.$$

Для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\frac{1-0,14}{\xi_2}=0,7915 \text{ и } \xi_2=1,087, \frac{1-0,27}{\xi_3}=0,7915 \text{ и } \\ \xi_3=0,922, \frac{1-0,29}{\xi_4}=0,7915 \text{ и } \xi_4=0,897;$$

$b$  – нагрузка выхода 1, холостой ход выходов 2, 3, 4.

По уравнению (4) для выхода 1 получаем:

$$\frac{1-0,1}{\xi_1}=1-0,5018 \cdot 0,1-0,0788 \cdot 0,02-0,2144 \cdot 0,03- \\ -0,2046 \cdot 0,04=0,9336 \text{ и } \xi_1=0,964.$$

Для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\frac{1-0,02}{\xi_2}=0,9336 \text{ и } \xi_2=1,05, \frac{1-0,03}{\xi_3}=0,9336 \text{ и } \\ \xi_3=1,039, \frac{1-0,04}{\xi_4}=0,9336 \text{ и } \xi_4=1,028;$$

4.  $\varepsilon$  – холостой ход выходов 1, 2, 3, нагрузка выхода

По уравнению (4) для выхода 1 получаем:

$$\frac{1-0,09}{\xi_1}=1-0,5018 \cdot 0,09-0,0788 \cdot 0,08-0,2144 \cdot 0,07- \\ -0,2046 \cdot 0,25=0,8824 \text{ и } \xi_1=1,031.$$

Для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\frac{1-0,08}{\xi_2}=0,8824 \text{ и } \xi_2=1,05, \frac{1-0,07}{\xi_3}=0,8824 \text{ и } \\ \xi_3=1,054, \frac{1-0,25}{\xi_4}=0,8824 \text{ и } \xi_4=0,85;$$

$\varepsilon$  – нагрузка выходов 1, 2, 3, 4.

По уравнению (4) получаем для выхода 1:

$$\frac{1-0,03}{\xi_1}=1-0,5018 \cdot 0,3-0,0788 \cdot 0,31-0,2144 \cdot 0,34- \\ -0,2046 \cdot 0,38=0,67744 \text{ и } \xi_1=1,038.$$

Для выходов 2, 3, 4 получаем:

$$\frac{1-0,31}{\xi_2}=0,67744 \text{ и } \xi_2=1,019, \frac{1-0,34}{\xi_3}=0,67744 \text{ и } \\ \xi_3=0,974, \frac{1-0,38}{\xi_4}=0,67744 \text{ и } \xi_4=0,915.$$

Таким образом, согласно проведённым расчётам, оба способа составления уравнений для расчёта весовых коэффициентов позволяют осуществить стабилизацию выходных напряжений источника с заданными пределами уровней стабилизации напряжений.

### Выводы

1. Предлагаемая структура многовыходного источника напряжений питания с одним регулирующим элементом позволяет стабилизировать напряжения на выходах источника с заданной погрешностью при нагрузке любого количества выходов без использования обратных связей по току нагрузок.
2. Предлагаемая методика расчёта весовых коэффициентов обратных связей по выходным напряжениям позволяет рассчитать весовые коэффициенты при любом количестве нагруженных выходов источника.
3. Результаты теоретических исследований, приведённые в статье, могут быть использованы при проектировании многовыходных источников напряжений питания с одним регулирующим элементом на основе электромашинных генераторов, мно-

гообмоточных трансформаторов, преобразователей напряжения.

### Литература

1. Источники питания с несколькими выходами. Заявка Японии. № 62 – 36462, Н 02 М3/28, 1987.

2. Браун М. Источники питания. Расчёт и проектирование. Раздел 3.9 «Проектирование цепи обратной связи по напряжению»: пер. с англ. – Киев : «МК-Пресс», 2005.

Поступила в редакцию 19.02.2014

*Владислав Васильевич Талов,  
АО «НИИЭМ», начальник лаборатории, к.т.н. ОЭМИП,  
т. (495)994-53-27, e-mail: oemip@niiem.ru.*

## ABOUT REGULATION of OUTPUT VOLTAGE in MULTIOUTPUT VOLTAGE POWER SOURCES

**V.V. Talov**

*In the article, method of output voltage regulation to desired output voltage tolerances independently of output loads of a multi-output voltage power source without current feedbacks having one regulation element (e.g. an exciting winding in a multi-output electric generator) is proved. The method involves installation into automatic voltage control system of a voltage feedback signal source for all outputs with their own weight factors. Weight factor indicates the part of voltage feedback signal of the given output in relation to general voltage feedback signal. Method for calculation of weight factors basing on required regulatory control level limits for output voltages and constant-error behavior of external characteristics of source outputs is presented for consideration. Calculation for weight factors of source output voltage feedback and for regulatory control levels of output voltages for a four-output source is given as an example.*

**Key words:** multi-output voltage power source, weight factor of voltage feedback signal, required limit of voltage regulatory control level, constant-error behavior of source output external characteristic, automatic voltage control system.

### List of References

1. Multi-output power supplies. Application from Japan. No. 62 – 36462, Н 02 М3/28, 1987.
2. Brown M. Power supplies. Calculations and design, Section 3.9 Design of voltage feedback circuit (translated from English). – Kiev: MK-Press Publ., 2005.

*Vladislav Vasilyevich Talov, Ph.D. in Engineering Science,  
Head of Laboratory 'NIIEM Corporation' JC,  
tel.: (495) 994 53 27, e-mail: oemip@niiem.ru.*