

ЭНЕРГЕТИКА

И. И. ШАРАБХАНИЯН

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА
 СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предлагается алгоритм расчета установившегося режима сложных электроэнергетических систем (ЭЭС), основанный на методе разделения сложной ЭЭС на несвязанные подсистемы (ПС). Предполагается, что ПС сложной ЭЭС являются энергосистемы (ЭС), входящие в энергообъединение (ЭО).

Постановка задачи. Задана схема замещения ЭО, активные (g) и реактивные (b) узловые проводимости, активные (P) и реактивные (Q) мощности в узлах, базисный узел с заданным напряжением (\dot{U}_0). ЭО расчленяется на несвязанные ЭС. Выводятся и решаются уравнения состояния для каждой ЭС. Составляется и решается система уравнений, где в качестве переменных рассматриваются токи в межсистемных связях (МС). Напряжения в узлах ЭС определяются как алгебраическая сумма напряжений от токов в узлах ЭС и МС.

Теория. После расщепления ЭО на ЭС и удаления МС, необходимо установить такие математические модели для каждой ЭС, чтобы напряжения и токи в любом узле и элементе ЭС были такими же, что и в ЭО.

Предположим, что выполнено расщепление ЭО (рис. 1) на две ЭС. Это достигается разрезанием МС *тк*.

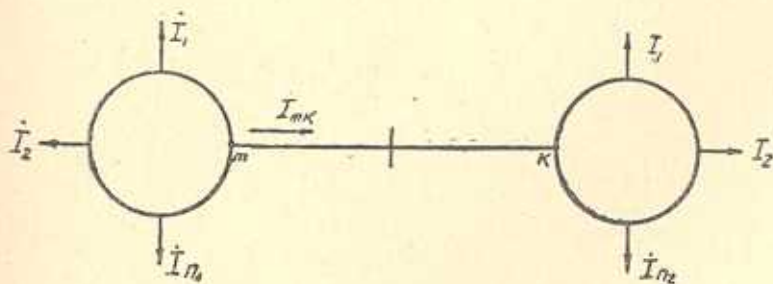


Рис. 1.

Математические модели строятся с учетом следующих положений.
 1. Разделение ЭО на ЭС расщеплением МС, соединяющей их, равносильно существованию двух отдельных ЭС. Удаление МС приводит к прекращению потока мощности между ЭС так, что в ЭС I наблюдается из-

лишек мощности $\hat{I}_{mk} \cdot \hat{U}_m$ (тока \hat{I}_{mk}), а в ЭС II — нехватка $\hat{I}_{mk} \cdot \hat{U}_k$ (тока \hat{I}_{mk}). Если в ЭС I и II компенсировать излишек и нехватку тока \hat{I}_{mk} и решать уравнения узловых напряжений (УУН) каждой ЭС, то получим такое решение, как если бы ЭО не расчленилось на ЭС, а решалось целиком.

2. Принимается, что в каждой ЭС один из узлов (опорный) временно замыкается на базисный узел ЭО.

3. Компенсируя соответствующие узловые токи в каждой изолированной ЭС, полагаем, что узловые напряжения ЭС равны алгебраической сумме:

а) \hat{U}_1, \hat{U}_2 — напряжений, обусловленных узловыми токами ЭС и токами в МС;

б) ΔU_p — падений напряжения между опорным узлом ЭС и базисным узлом ЭО.

Задача становится определенной, если будут известны перетоки по МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО. Дальнейшие преобразования сводятся к их определению. С этой целью для заданного ЭО строится искусственная цепь [1], состоящая из двух схем токов — узловых и контурных, которые составляются следующим образом.

А. Схема узловых токов.

1. Предполагается, что все токи в каждой ЭС сходятся в опорном узле.

2. Суммарные токи каждой ЭС из опорных узлов текут к базисному узлу ЭО по одной из МС ЭС. Таким образом, в искусственной цепи ЭО каждая ЭС представляется одним узлом, в котором приложен суммарный ток ЭС (кроме ЭС с базисным узлом).

Б. Схема контурных токов.

1. Предполагается, что между ЭС, имеющих более одной МС, существуют контуры, которые замыкаются между опорными узлами соответствующих ЭС.

2. Сами ЭС могут образовывать замкнутые контуры, количество которых определяется:

$$K = b - (N - 1),$$

где b — число ветвей искусственной цепи, по которым предполагается прохождение узловых токов; $N - 1$ — число независимых узлов искусственной цепи.

Таким образом составленная искусственная цепь будет иметь:

а) узлов столько, сколько имеется ЭС в ЭО;

б) ветвей столько, сколько имеется МС в ЭО.

Приняв такую схему токов, составляем матрицу соединений токов в искусственной цепи.

Составление матрицы соединений токов в искусственной цепи. Для наглядности рассмотрим пример ЭО, состоящего из 7 ЭС, связанных МС, как показано на рис. 2. Для него составим искусственную цепь (рис. 3).

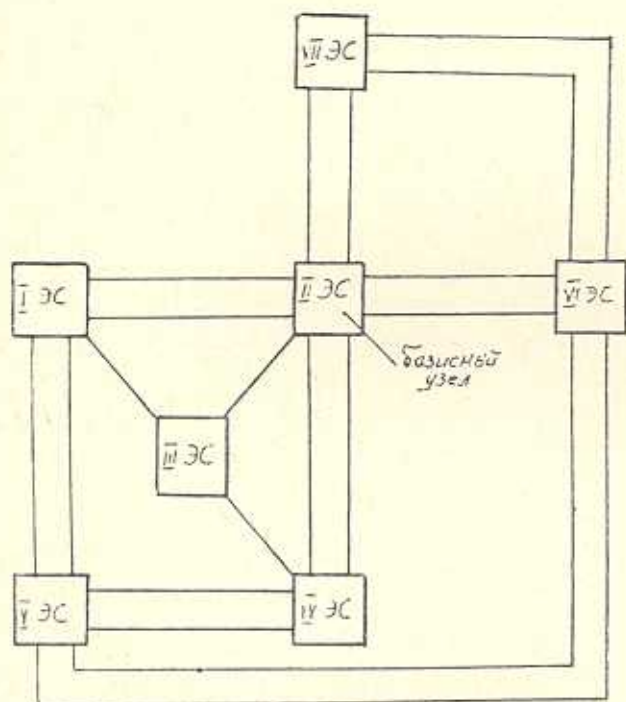


Рис. 2.

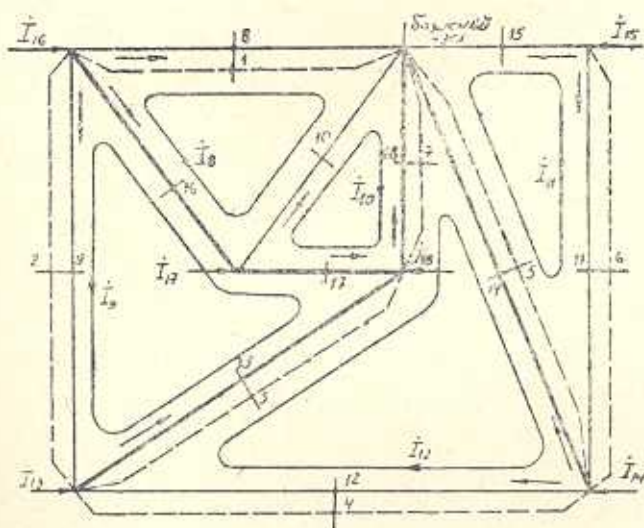


Рис. 3.

Определение матрицы сопротивлений узлов МС ЭО. Составляем матрицу узловых проводимостей для каждой ЭС относительно опорных узлов (Y). Определяем матрицу узловых сопротивлений ЭС ($Z_1 = Y^{-1}$). Из нее выделяем подматрицу сопротивлений относительно узлов связей (Z') и располагаем по диагонали в матрице:

$$Z = \begin{bmatrix} Z'_1 & & & \\ & Z'_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & Z'_N \end{bmatrix}.$$

Составляем матрицу соединений узлов связи ЭС с узлами разрывов МС ($C_{m\lambda}$). В этой матрице столбцами λ являются номера узлов разрывов МС, а строками m — номера узлов связей ЭС. Можно $C_{m\lambda}$ составлять по следующему принципу. За положительное направление тока в МС принять от ЭС с меньшим номером к ЭС с большим номером.

Определяем матрицу $Z_\lambda = C_{\lambda m} \cdot Z \cdot C_{m\lambda}$, $C_{\lambda m} = (C_{m\lambda})_t$.

Матрица сопротивлений узлов связей ЭС относительно их опорных узлов будет:

$$Z'_\lambda = Z_\lambda + Z_c,$$

где Z_c — диагональная матрица сопротивлений МС.

Матрица Z'_λ преобразуется в матрицу сопротивлений узлов связей ЭС относительно базисного узла ЭО [1]

$$Z'_\lambda = (C_\lambda)_t \cdot Z'_\lambda \cdot C_\lambda.$$

Разобьем Z'_λ на блоки в соответствии с разбиением C_λ на $C_{\lambda(c, k)}$ и $C_{\lambda p}$

$$Z'_\lambda = \begin{bmatrix} C_{(c, k)\lambda} \cdot Z'_\lambda \cdot C_{\lambda(c, k)} & C_{(c, k)p} \cdot Z'_\lambda \cdot C_{\lambda p} \\ C_{p\lambda} \cdot Z'_\lambda \cdot C_{\lambda(c, k)} & C_{p\lambda} \cdot Z'_\lambda \cdot C_{\lambda p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{(c, k)(c, k)} & Z_{(c, k)p} \\ Z_{p(c, k)} & Z_{pp} \end{bmatrix},$$

$$C_{(c, k)\lambda} = (C_{\lambda(c, k)})_t, \quad C_{p\lambda} = (C_{\lambda p})_t,$$

где $Z_{(c, k)(c, k)} = R_{(c, k)(c, k)} + jX_{(c, k)(c, k)}$ — подматрица сопротивлений контурной цепи; $Z_{(c, k)p} = R_{(c, k)p} + jX_{(c, k)p}$ и $Z_{p(c, k)} = R_{p(c, k)} + jX_{p(c, k)}$ — подматрицы взаимных сопротивлений контурной и узловой цепей; $Z_{pp} = R_{pp} + jX_{pp}$ — подматрица сопротивлений узловой цепи.

Для расчета установившегося режима ЭО необходимо определить матрицу соединений узловых (C_{mp}) и контурных ($C_{m(c, k)}$) токов с узлами ЭС [1]:

$$C_{mp} = C_{m\lambda} \cdot C_{\lambda p}, \quad C_{m(c, k)} = C_{m\lambda} \cdot C_{\lambda(c, k)},$$

где $C_{m\lambda}$ — матрица соединений узлов разрыва (λ) с узлами ЭС (m). Она составляется по тому же принципу, что и $C_{m\lambda}$. Вся необходимая

информация подготовлена для расчета установившегося режима ЭС, входящих в ЭО.

Алгоритм расчета

1. Узловые напряжения ЭС от их узловых токов:

$$\dot{U}_{1m} = Z_1 \dot{I}_m + \dot{U}_b.$$

2. Контурные напряжения и токи в искусственной цепи:

$$\dot{U}_{(c, k)} = (C_{m(c, k)})_l \cdot \dot{U}_{1m} - Z_{(c, k)p} \cdot \dot{I}_p;$$

$$\dot{I}_{(c, k)} = Y_{(c, k)(c, k)} \cdot \dot{U}_{(c, k)}; \quad Y_{(c, k)(c, k)} = Z_{(c, k)(c, k)}^{-1}.$$

3. Дополнительные токи и напряжения в узлах ЭС, вызванные токами, протекающими в МС:

$$\dot{I}_k = -(C_{mp} \cdot \dot{I}_p + C_{m(c, k)} \cdot \dot{I}_{(c, k)});$$

$$\dot{U}_{2m} = Z_1 \cdot \dot{I}_k.$$

6. Падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО:

$$\Delta \dot{U}_p = -(C_{mp})_l \cdot \dot{U}_{1m} + Z_{pp} \cdot \dot{I}_p + Z_{p(c, k)} \cdot \dot{I}_{(c, k)}.$$

7. Напряжения опорных узлов ЭС:

$$\dot{U}_p = \Delta \dot{U}_p + \dot{U}_b.$$

8. Результирующие напряжения в узлах ЭО:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} + \Delta \dot{U}_p.$$

Так как по постановке задачи в узлах ЭС заданными являются не токи, а мощности, то токи в узлах ЭС определяются: $\dot{I} = \frac{P - jQ}{\hat{U}}$ и для вычисления узловых напряжений можно пользоваться одним из итерационных методов. Для наглядности приведенного алгоритма рассмотрим пример электрической сети (рис. 4).

Заданы: токи в нагрузочных узлах—по 1А, в генераторном узле (4)—15А, сопротивления ветвей—по 1 Ом, базисный узел с напряжением $\dot{U}_b = 0$. Сопротивления МС—2 Ом.

Решение: Разделим всю сеть на 4 ПС. Составим матрицу $\hat{C}'_{m\lambda}$.

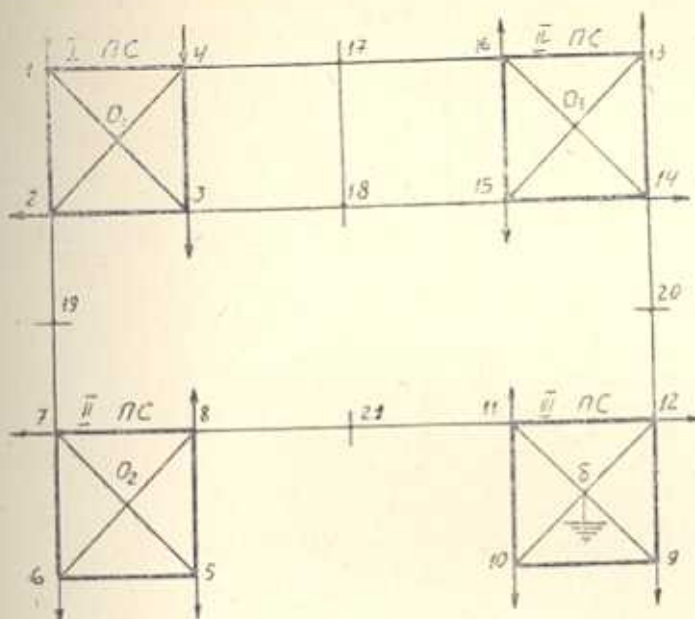


Рис. 4.

		17	18	19	20	21	
C_{mi} =	1						
	2	1					
	3	1					
	4	1					I ПС
	5						
	6						
	7	-1					
	8		1				II ПС
	9						
	10						
	11		-1				
	12		1				III ПС
	13						
	14		-1				
	15	-1					
	16	-1					IV ПС

$$Y^I = Y^{II} = Y^{III} = Y^{IV} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 3 \end{bmatrix}$$

$$Z_1^I = Z_1^{II} = Z_1^{III} = Z_1^{IV} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 7 & 3 & 2 & 3 \\ 3 & 7 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 7 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 7 \end{bmatrix}$$

Матрица сопротивлений узлов связи относительно опорных узлов:

$$Z'_k = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 \end{bmatrix}.$$

Матрицы соединений контурных и узловых токов искусственной цепи (рис. 5):

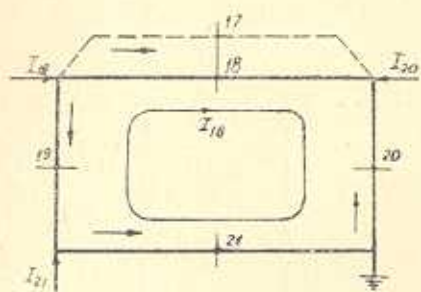


Рис. 5.

$$C_{\lambda(c, k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$C_{\lambda p} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица сопротивлений узлов связей, приведенная к базисному узлу:

$$Z_{pp} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 82 & 3 & 41 \\ 3 & 44 & 3 \\ 41 & 3 & 44 \end{bmatrix}; \quad Z_{p(c, k)} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -1 & -76 \\ 1 & 38 \\ 0 & -38 \end{bmatrix};$$

$$Z_{(c, k)p} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -76 & 38 & -38 \end{bmatrix}; \quad Z_{(c, k)(c, k)} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 76 & -36 \\ -36 & 152 \end{bmatrix}.$$

Матрицы соединений токов искусственной цепи с узлами системы:

$$C_{mp} = C_{m\lambda} \cdot C_{\lambda(p)} = \begin{array}{c} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{l} \text{I ПС} \\ \\ \text{II ПС} \\ \\ \text{III ПС} \\ \\ \text{IV ПС} \end{array};$$

$$C_{m(e, k)} = C_{m\lambda} \cdot C_{s(e, k)} = \begin{array}{cc|l} 0 & 0 & \\ 0 & -1 & \\ \hline -1 & 1 & \text{I ПС} \\ 1 & 0 & \\ \hline 0 & 0 & \\ 0 & 0 & \\ 0 & 1 & \\ 0 & -1 & \text{II ПС} \\ \hline 0 & 0 & \\ 0 & 0 & \\ 0 & 1 & \\ 0 & -1 & \text{III ПС} \\ \hline 0 & 0 & \\ 0 & 1 & \\ 1 & -1 & \\ -1 & 0 & \text{IV ПС} \end{array}.$$

Суммарные токи в ПС:

$$I_{\Sigma} = \begin{bmatrix} 12 \\ -4 \\ -4 \end{bmatrix}.$$

1. Узловые напряжения ПС от их узловых токов:

$$U_{1m}^I = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 33 \\ 17 \\ 33 \\ 97 \end{bmatrix}; \quad U_{1m}^{II} = U_{1m}^{III} = U_{1m}^{IV} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -15 \\ -15 \\ -15 \\ -15 \end{bmatrix}.$$

2. Контурные напряжения в искусственной цепи:

$$U_{(e, k)} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 80 \\ 928 \end{bmatrix}.$$

3. Узловая проводимость контурной цепи:

$$Y_{(e, k)(e, k)} = \frac{15}{10256} \begin{bmatrix} 152 & 36 \\ 36 & 76 \end{bmatrix}.$$

4. Контурные токи в искусственной цепи:

$$I_{(e, k)} = \frac{15}{10256} \begin{bmatrix} 45568 \\ 73408 \end{bmatrix}.$$

5. Дополнительные токи в узлах ПС, вызванные токами, протекающими в линиях связи:

$$I_m^I = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ -49664 \\ -27840 \\ -45568 \end{bmatrix}; \quad I_m^{II} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 49664 \\ -8640 \end{bmatrix};$$

$$I_m^{III} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 8640 \\ 32384 \end{bmatrix}; \quad I_m^{IV} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ -32384 \\ 27840 \\ 45568 \end{bmatrix}.$$

6. Дополнительные узловые напряжения ПС от токов в линиях связи:

$$U_{2m}^I = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} -341376 \\ -522304 \\ -480576 \\ -501824 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{II} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 73408 \\ 131712 \\ 321728 \\ 88512 \end{bmatrix};$$

$$U_{2m}^{III} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 114432 \\ 90688 \\ 157632 \\ 252608 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{IV} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 95232 \\ -52032 \\ 234432 \\ 337728 \end{bmatrix}.$$

7. Падения напряжений между опорными узлами ПС и базисным узлом системы:

$$\Delta U_p = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 2334080 \\ 328320 \\ 1276160 \end{bmatrix}.$$

8. Напряжения опорных узлов ПС:

$$U_p = \frac{1}{16 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 2334080 \\ 328320 \\ 1276160 \end{bmatrix}.$$

9. Результирующие напряжения в узлах системы:

$$U_m^I = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 2331152 \\ 1986128 \\ 2191952 \\ 2827088 \end{bmatrix}; \quad U_m^{II} = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 247888 \\ 306192 \\ 496208 \\ 262992 \end{bmatrix};$$

$$U_m^{III} = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} -39408 \\ -63152 \\ 3792 \\ 98768 \end{bmatrix}; \quad U_m^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 1217552 \\ 1070288 \\ 1356752 \\ 1460048 \end{bmatrix}.$$

Выводы

1. Предложенный способ формирования матрицы C_i по сравнению с [1] отличается простотой и обеспечивает сокращение вычислительных операций при определении матрицы Z_i^* .

2. По алгоритмам [4, 5] накладывается ограничение на деление системы на ПС, суть которого заключается в том, что система делится на ПС так, чтобы в каждую ПС ток поступал не более, чем с двух смежных ПС. В предложенном алгоритме нет такого ограничения.

АрмНИИЭ

Поступило 13.VII.1977.

Ի. Ի. ՇԱՐԻՔՅԱՆԻ

ԲԱՐՐԻ ԷԼԵՄԵՆՏԱՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՅՎԱՅՈՒ
ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ԱԿՈՐԻԹԻՄԸ

Ա մ ֆ ո ֆ ո ս մ

Առաջարկվում է բարդ էլեկտրաէներգետիկական համակարգի (էէՀ) կայունացված սեփմի հաշվման ալգորիթմը՝ հիմնված բարդ էէՀ-ը շկապակցված ենթահամակարգերի (ԵՀ) բաժանման մեթոդի վրա: Ենթադրվում է, որ բարդ էէՀ-ի ԵՀ-երը ներկայացնում են կներգահամակարգեր (էՀ), որոնք մտնում են կներգամիավորման (էՄ) մեջ:

Առաջարկվող ալգորիթմը հնարավորություն է տալիս լուծելու բարդ էէՀ-երի կայունացված սեփմները, որ հնարավոր չէ սովորական մեթոդներով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям-диакоптика. М., «Наука», 1972.
2. Хэпп Х. Диакоптика и электрические цепи. М., «Мир», 1974.
3. Хачатрян В. С. Метод и алгоритм расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 4.
4. Под ред. Веникова В. А. Применение вычислительных машин в энергетике. М., «Энергия», 1968.
5. Кузьмин Я. Ф., Махнатко А. Е. Расчет электрических сетей при заданных мощностях в узлах методом разбиения на подсхемы. «Электричество», 1972, № 5.