

ЭНЕРГЕТИКА

Р. А. АМИРИКЯН, И. И. ШАРАБХАНЫАН

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА  
УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМ,  
ВХОДЯЩИХ В ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЕ

В связи с развитием энергосистем (ЭС) и их объединением усложняются требования, предъявляемые к вычислительным машинам (ВМ) при расчете установившихся режимов энергообъединений (ЭО). Ограниченность оперативной памяти ВМ и большое время решения вынуждают инженеров использовать диакоптические методы при решении сложных систем [1—6].

В предлагаемой работе описан алгоритм расчета установившегося режима сложных электроэнергетических систем (ЭЭС), основанный на методе деления сложной ЭЭС на несвязанные подсистемы (ПС) [1]. Предполагается, что ПС сложной ЭЭС являются ЭС, входящие в ЭО.

*Постановка задачи.* Заданы схема замещения ЭО, активные ( $g$ ) и реактивные ( $b$ ) узловые проводимости, базисный узел с напряжением  $U_0$ .

ЭО расчленяется на несвязанные ЭС. Выводятся и решаются уравнения состояния для каждой ЭС. При этом в узлах ЭС, характеризующихся четырьмя режимными параметрами: активной и реактивной мощностью, модулем и аргументом комплексного напряжения, задаются два режимных параметра, два других определяются решением нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима.

Дополнительно составляется и решается система  $M + N - 1$  уравнений ( $M$ —число межсистемных связей (МС),  $N$ —число ЭС в ЭО, где в качестве переменных рассматриваются токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО).

Напряжения в узлах ЭС определяются как алгебраическая сумма напряжений от токов в узлах ЭС и токов в МС.

Алгоритм решения

1. Рассекаем ЭО по МС на несвязанные ЭС. Удаляем рассеченные МС. Задаем в каждой ЭС опорным узлом, который замыкаем на базисный узел ЭО.

2. Составляем матрицу  $Y$  узловых проводимостей ЭС относительно опорного узла.

## 3. Решаем уравнения

$$I_m - Y_{m0} \dot{U}_0 = Y \dot{U}_{1m} \quad (1)$$

и определяем напряжения в узлах ЭС от их узловых токов, где  $I_m$  — токи в узлах ЭС;  $Y_{m0}$  — взаимная проводимость между данным и опорным узлами ЭС;  $\dot{U}_{1m}$  — напряжения от узловых токов.

4. Составляем систему  $M + N - 1$  уравнений (алгоритм будет дан ниже), откуда определяем неизвестные токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

## 5. Решаем уравнения

$$I_m = Y \dot{U}_{2m} \quad (2)$$

и определяем напряжения в узлах ЭС от токов в МС, где  $I_m$  — дополнительные токи в узлах связи ЭС, вызванные токами в МС;  $\dot{U}_{2m}$  — напряжения в узлах ЭС от токов в МС.

## 6. Определяем опорные напряжения ЭС:

$$\dot{U}_p = \dot{U}_0 + \Delta \dot{U}_p, \quad (3)$$

где  $\Delta \dot{U}_p$  — падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

## 7. Результирующие напряжения в узлах ЭС:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} + \Delta \dot{U}_p. \quad (4)$$

## Алгоритм составления уравнений МС

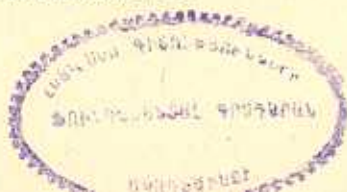
Разделение ЭО на ЭС удалением МС приводит к прекращению протекания токов между ЭС, поэтому в одних ЭС будет наблюдаться излишек тока, в других — нехватка. Если компенсировать излишек и нехватку токов в узлах связи ЭС и решать уравнения узловых напряжений каждой ЭС, то получим такое решение, как если бы ЭО не расчленилось на ЭС, а решалось целиком.

Таким образом, задача становится определенной, если будут известны токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

Допустим, что через МС  $mk, cd, ef, \dots$  протекают токи  $I_{mk}, I_{cd}, I_{ef}, \dots$ , где первые индексы принадлежат одним ЭС, а вторые — другим. Если  $\dot{U}_m, \Delta \dot{U}_k, \Delta \dot{U}_c, \dots$  — падения напряжений между опорными узлами ЭС (к которым принадлежат узлы МС  $m, k, c, \dots$ ) и базисным узлом ЭО, то уравнения МС с учетом пункта 7 алгоритма решения можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} + \Delta \dot{U}_m - \dot{U}_{1k} - \dot{U}_{2k} - \Delta \dot{U}_k &= Z_{mk} I_{mk}; \\ \dot{U}_{1c} + \dot{U}_{2c} + \Delta \dot{U}_c - \dot{U}_{1d} - \dot{U}_{2d} - \Delta \dot{U}_d &= Z_{cd} I_{cd}; \\ \dot{U}_{1f} + \dot{U}_{2f} + \Delta \dot{U}_f - \dot{U}_{1e} - \dot{U}_{2e} - \Delta \dot{U}_e &= Z_{fe} I_{fe}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $Z_{mk}, Z_{cd}, Z_{fe}, \dots$  — сопротивления МС.



В этой системе  $M$  уравнений напряжения в узлах ЭС:  $\dot{U}_{1m}, \dot{U}_{1c}, \dot{U}_{1d}, \dot{U}_{1f}, \dot{U}_{1k}, \dot{U}_{1e}, \dots$  от узловых токов определяются из (1). А напряжения:  $\dot{U}_{2m}, \dot{U}_{2c}, \dot{U}_{2d}, \dot{U}_{2f}, \dot{U}_{2k}, \dot{U}_{2e}, \dots$  от токов МС определяются из (2) через токи МС. Подставив их значения в (5), получим  $M$  уравнений с  $M$  неизвестными токами ( $\dot{I}_k$ ) в МС и  $N-1$  неизвестными падениями напряжений ( $\Delta \dot{U}_p$ ) между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО. Дополнительные  $N-1$  уравнений для определения неизвестных  $\dot{I}_k$  и  $\Delta \dot{U}_p$ , составляемые по балансу токов в ЭС, будут:

$$\sum \dot{I}_k = -\dot{i}_p, \quad (6)$$

где  $\sum \dot{I}_k$  — сумма токов МС, примыкающих к данной ЭС;  $\dot{i}_p$  — суммарные токи ЭС, которые определяются следующим образом. Задаваясь начальными приближениями напряжений в узлах для каждой ЭС, кроме ЭС с базисным узлом, определяют суммарные токи

$$\dot{i}_p = \sum_{m=1}^n \left( \frac{\hat{S}_m}{\hat{U}_m} + y_{m0} \dot{U}_m \right),$$

где  $n$  — число узлов данной ЭС;  $\hat{S}_m$  — комплексно-сопряженная мощность узла  $m$ ;  $\hat{U}_m$  — комплексно-сопряженное напряжение узла  $m$ ;  $y_{m0}$  — поперечная проводимость узла  $m$ .

По мере уточнения напряжений узлов уточняются также токи  $\dot{i}_p$ .

Объединив системы уравнений (5) и (6) в матричное уравнение, неизвестные  $\dot{I}_k$  и  $\Delta \dot{U}_p$  определим:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_k \\ \Delta \dot{U}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_k & K_k \\ (K_k)_t & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_k \\ -\dot{i}_p \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Здесь  $\Delta \dot{U}_k$  — падения напряжений в МС от узловых токов;  $Z_k$  — подматрица коэффициентов неизвестных  $\dot{I}_k$ , которая является подматрицей сопротивлений узлов МС относительно опорных узлов ЭС, составление которой описано в [1];  $K_k$  — подматрица соединений токов МС с ЭС. Столбцы ее соответствуют номерам ЭС, а строки — номерам узлов в сечениях МС. На пересечении соответствующих строки и столбца ставится  $+1$ , если ток входит в ЭС и  $-1$ , если ток выходит из ЭС. Строки этой подматрицы показывают, какие две ЭС связывает МС, по которой проходит ток предварительного заданного нами направления;

$(K_k)_t$  — подматрица, полученная транспонированием  $K_k$ ;  $\begin{bmatrix} Z_k & K_k \\ (K_k)_t & 0 \end{bmatrix} = K$  — квадратная, неособенная, симметричная матрица порядка  $M+N-1$ . Первые  $M$  строк ( $k$ ) ее соответствуют неизвестным токам МС (номерам узлов в сечениях), остальные  $N-1$  ( $p$ )-неизвестным

падениям напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО (номерам ЭС):

$$\dot{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \dot{K}_{\lambda\lambda} & \dot{K}_{\lambda\rho} \\ \dot{K}_{\rho\lambda} & \dot{K}_{\rho\rho} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

### Последовательность расчета

1. Напряжения в узлах ЭС от их узловых токов:

$$\dot{U}_{1m} = Z\dot{I}_m + \dot{U}_0,$$

где  $Z$  — матрица узловых сопротивлений ЭС относительно опорного узла,  $Z = Y^{-1}$ .

2. Падения напряжений в МС от узловых токов ЭС:

$$\dot{U}_\lambda = \sum_1^p C_{\lambda m} \dot{U}_{1m},$$

$C_{\lambda m}$  — матрица соединений токов МС с узлами ЭС [1].

3. Токи в МС:

$$\dot{I}_\lambda = \dot{K}_{\lambda\lambda} \Delta \dot{U}_\lambda - \dot{K}_{\lambda\rho} \dot{I}_\rho,$$

4. Дополнительные токи в узлах связи ЭС, вызванные токами, протекающими в МС:

$$\dot{I}_m = C_{m\lambda} \dot{I}_\lambda; \quad C_{m\lambda} = (C_{\lambda m})_t,$$

5. Дополнительные напряжения в узлах ЭС от токов в МС:

$$\dot{U}_{2m} = Z\dot{I}_m,$$

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

$$\Delta \dot{U}_\rho = \dot{K}_{\rho\lambda} \Delta \dot{U}_\lambda - \dot{K}_{\rho\rho} \dot{I}_\rho,$$

7. Напряжения опорных узлов:

$$\dot{U}_\rho = \Delta \dot{U}_\rho + \dot{U}_0.$$

8. Результирующие узловые напряжения:

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

Так как по постановке задачи в узлах ЭС заданы не токи, а мощности, то определив токи в узлах ЭС  $\dot{I} = \frac{P - jQ}{\hat{U}}$ , узловые напряжения вычисляем по одному из итерационных методов.

*Пример расчета.* Для сети, представленной на рис. 1, заданы токи в нагрузочных узлах — по 1 А, в генераторном узле (4) — 15 А, сопротивление ветвей — по 1 Ом, линий связи — 2 Ом, базисный узел (6) с напряжением  $U_6 = 0$ . Необходимо определить напряжения во всех узлах сети.

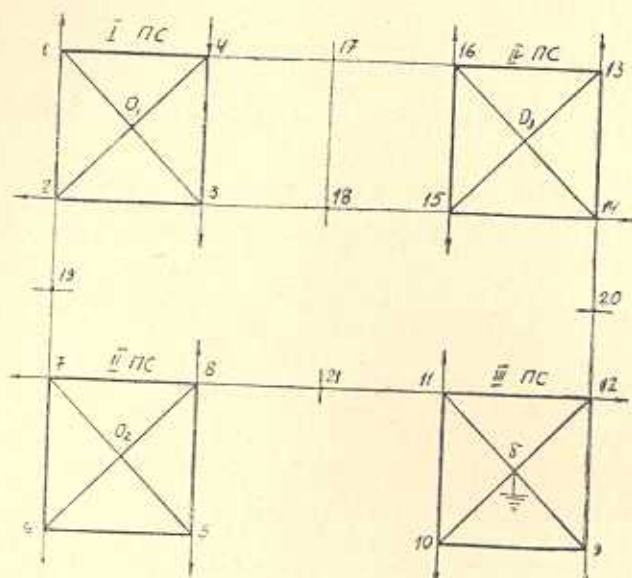


Рис. 1

*Решение.* Систему рассекаем на четыре ПС. Задаемся направлениями токов в линиях связи, например, от ПС с меньшим номером к ПС с большим номером. После удаления рассеченных ветвей, задаемся опорными узлами в каждой ПС ( $O_1, O_2, O_3$ , опорным узлом III ПС является базисный узел — 6), которые замкнув на базисный узел, определяем матрицу узловых проводимостей и узловых сопротивлений для каждой ПС:

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

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

2. Узловые напряжения ПС от их узловых токов:

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

3. Матрица сопротивлений узлов связей ПС относительно их опорных узлов:

$$Z_{\lambda} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 \\ 2 & 3 & 0 & 44 & -3 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 \end{bmatrix}.$$

4. Составляем подматрицу соединений токов в линиях связи с ПС:

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

5. Определяем подматрицу:

$$(K_{\lambda})_r = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

6. Падения напряжений в линиях связи ПС от их узловых токов:

$$\Delta U_{\lambda} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 112 \\ 48 \\ 32 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

7. Суммарные токи ПС:

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

8. Объединив все полученные подматрицы, вычислим токи в линиях связи и падения напряжений между опорными узлами ПС и базисным узлом:

$$\begin{bmatrix} I_{17} \\ I_{18} \\ I_{19} \\ I_{20} \\ I_{21} \\ \Delta U^I \\ \Delta U^{II} \\ \Delta U^{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 & -15 & 0 & 15 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 & -15 & 0 & 15 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 & -15 & 15 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 44 & -3 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 & 0 & -15 & 0 \\ -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & 0 & -15 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 15 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 112 \\ 48 \\ 32 \\ 0 \\ 0 \\ -180 \\ 60 \\ 60 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} I_{17} \\ I_{18} \\ I_{19} \\ I_{20} \\ I_{21} \end{bmatrix} = \frac{1}{641} \begin{bmatrix} 2848 \\ 1740 \\ 3104 \\ -2024 \\ 540 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U^I \\ \Delta U^{II} \\ \Delta U^{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145880 \\ 20520 \\ 79760 \end{bmatrix}.$$

9. Напряжения в узлах ПС от токов в линиях связи:

$$U_{2m}^I = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} -21336 \\ -32644 \\ -30036 \\ 31364 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{II} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 4588 \\ 8232 \\ 20108 \\ 5532 \end{bmatrix};$$

$$U_{2m}^{III} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 7152 \\ 5668 \\ 9852 \\ 15788 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 5952 \\ -3252 \\ 14652 \\ 21108 \end{bmatrix}.$$

10. Опорные напряжения ПС:

$$\begin{bmatrix} U_{o_1} \\ U_{o_2} \\ U_{o_3} \end{bmatrix} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145880 \\ 20520 \\ 79760 \end{bmatrix}.$$

11. Результирующие узловые напряжения ПС:

$$U_m^I = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145697 \\ 124133 \\ 136997 \\ 176693 \end{bmatrix}; \quad U_m^{II} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 15493 \\ 19137 \\ 31013 \\ 16437 \end{bmatrix};$$

$$U_m^{III} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} -2463 \\ -3947 \\ 237 \\ 6173 \end{bmatrix}; \quad U_m^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 76097 \\ 66893 \\ 84794 \\ 91253 \end{bmatrix}.$$

### Выводы

1. Предложен алгоритм расчета установившегося режима ЭО методом деления его на изолированные ЭС.

2. Предложенный алгоритм в отличие от [1] не требует построения искусственной цепи, матрицы соединения токов в ней и вычислений, связанных с этой матрицей.

3. Для определения токов в МС по [1] требуется обращение матрицы на  $2(N-1)$  меньшего порядка, чем порядок матрицы  $K$ . Однако, для реальных ЭО число ЭС и МС ( $M+N-1$ ), определяющих порядок матрицы  $K$ , не могут быть такими большими, что вызвало бы затруднение с обращением этой матрицы. Кроме того, в процессе итерационного расчёта установившегося режима эта матрица обращается один раз.

АрмНИИЭ

Поступило 10.VII.1978

Բ. Ա. ԱՄԻՐԻԿՅԱՆ, Ի. Ի. ՇԱՐԱԲԽԱՆՅԱՆ

### ԷՆԵՐԳԱՄԻԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄԵԶ ՄՏՆՈՂ ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՌԵՅԻՄԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ՄԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ՄԱՍԻՆ

#### Ա մ փ ո փ ու մ

Առաջարկվում է էներգամիավորումների մեջ (էՄ) մտնող էներգահամակարգերի (էՀ) հաստատված ուժիմի հաշվարկի ալգորիթմ՝ հիմնված էՄ-ները շփապակցված էՀ-երի տրոհման մեթոդի վրա:

Հաշվարկը կատարվում է երկու փուլով: Սկզբում հայտնի մեթոդներով որոշվում են առանձին էՀ-երի ուժիմները՝ առանց հաշվի առնելու հոսքերը միջհամակարգային կաղերում (ՄԿ): Այնուհետև ըստ նրանց արդյունքների որոշվում են հոսքերը ՄԿ-երում, որոնց ազդեցությամբ էՀ-երում ՄԿ-երի հանգուցյաներում որոշվում են հաշվարկելի պարամետրների լրացուցիչ բաղադրիչներ և վերջնականապես ճշտվում էՀ-երի ուժիմները:

Ալգորիթմը կարելի է կիրառել բարդ համակարգերի օպտիմալացման, դեկավարման և կայունության պրոբլեմների լուծման խնդիրներում:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям-диооптика. М., «Наука», 1972.
2. Хэп Х. Диооптика и электрические цепи. М., «Мир», 1974.
3. Хачатрян В. С. Метод и алгоритм расчёта установившегося режима 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 А. Ф., Махнитко А. Е. Расчёт электрических сетей при заданных мощностях в узлах методом разбиения на подсхемы. «Электричество», 1972, № 5.
6. Амирикян Р. А., Шарабханян И. И. Алгоритм расчёта установившегося режима энергосистем, входящих в энергообъединение, с учетом ограничений на перетоки межсистемных связей. Тез. докл. науч.-техн. совещ. «Научно-технические проблемы развития и совершенствования автоматизации управления в энергосистемах», Минск, 1977.