

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Издается с 1947 г.
Журнал выходит 6 раз в год на русском языке

Կ Մ Ր Ա Դ Ր Ա Կ Ա Ս Կ Ո Ւ Ե Դ Ի Ա

Կասյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Ալոնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Ալեքսեևսկի Վ. Վ., Անանյան Ա. Կ., Զադյան Մ. Ա., Հակոբյան Ռ. Ն.,
Խարզյան Յու. Վ., Ստեփանյան Մ. Գ., Տեր-Ազարե Ի. Ա.,
Փինգուջանի Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Գաղափարապետ քարտուղար Ստեփանյան Զ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор), Алонци Г. Т. (зам. ответ. редактора),
Алексеевский В. В., Анания А. К., Акопян Р. Е., Задоян М. А.,
Пинаджян В. В. (зам. ответ. редактора), Саркисян К. А.,
Стикян М. Г., Тер-Азарьев И. А.
Ответственный секретарь Степанян З. К.

Խմբագրությունը գտնվում է Երևան-19, Բարեկամության փող. 24
Адрес редакции: Ереван-19, ул. Барекамутян, 24.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. В. КАСЬЯН, Г. Б. БАГДАСАРЯН, С. С. МЕСРОПЯН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПО НЕПРЕРЫВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ ИНСТРУМЕНТА

Одним из главных факторов, влияющих на качество обработанной поверхности и точность деталей, является износ режущего инструмента, который наряду с другими критериями оптимизации процесса резания широко применяется в машиностроении.

Однако, до сих пор исследователями не использованы методы оптимизации параметров резания по непрерывному износу, за исключением работы [1].

Сложность методики, предложенной в [1], заключается в установлении взаимосвязи между величинами износа и многочисленными параметрами условий резания, осуществление которой нецелесообразно с экономической точки зрения.

На основе работы [1] методика исследования нами несколько изменена и предложена новая методика, суть которой заключается в следующем:

а) величина непрерывного износа $h_{н.и.}$ рассматривается как сумма двух слагаемых $h_{т.у.}$ и h_z :

$$h_{н.и.} = h_{т.у.} + h_z, \quad (1)$$

где $h_{т.у.}$ — износ, зависящий от соотношения телесных углов $\alpha = \arccos \frac{P_z}{P_{од}}$ и $\gamma_0 = \arccos \frac{P_z}{P_{од}}$; h_z — износ, характеризующийся изменением силы резания в течение определенного времени обработки t ;

б) величина непрерывного износа рассматривается в зависимости от параметров резания V , S и t :

$$h_{н.и.} = f(V, S, t); \quad (2)$$

в) проводятся опыты по статистическому методу планирования в широком диапазоне режимов резания V , S , t и по уравнению (1) определяются значения непрерывного износа $h_{н.и.}$.

Полученные расчетные значения $h_{\text{из.}}$ по регрессионному анализу связываются с параметрами резания V , S , t и с учетом ограничений параметров, оптимизируется процесс резания методом линейного программирования [2].

Данная методика основана на том, что с течением времени t существенно изменяются составляющие силы резания P_z , P_y и P_x , вследствие износа инструмента по задней грани. Принимая значения составляющих силы резания до износа за R_1 , а после определенного времени $t - R_2$, по уравнению [3] получаем следующую зависимость:

$$R_2 - R_1 = q'_N \mu f_1, \quad (2)$$

где q'_N — нормальное давление, которое определяется по [3] (табл.); μ — коэффициент трения между стружкой и передней гранью резца (табл.); f_1 — площадь износа по задней грани:

$$f_1 = h_{\text{из.}} \left(\frac{t}{\sin \varphi} + r \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + S \right). \quad (4)$$

При $\varphi = 90^\circ$ и $r = 0$:

$$f_1 = h_{\text{из.}} (t + S). \quad (5)$$

Из выражений (3) и (5) получаем:

$$R_2 - R_1 = q'_N \mu h_{\text{из.}} (t + S). \quad (6)$$

Обозначив $R_2 - R_1 = R$ и $q'_N \mu = c$, получаем:

$$h_{\text{из.}} = \frac{R}{c(t + S)}. \quad (7)$$

Второе слагаемое $h_{\text{из.}}$ предлагается определять значениями телесных углов α'_0 и φ'_0 [1]. Исследования показывают существование зависимости между статистическими средними значениями телесных углов и износом инструмента. Установлено, что при резании инструментом с определенной геометрией режущей части, значения телесных углов пропорциональны износу инструмента по задней грани. Найдено, что в первом приближении: $h_{\text{из.}} = k h_1$, где k_1 — соотношение двух телесных углов α'_0 и φ'_0 .

Исходя из вышеизложенного, можно написать:

$$h_{\text{из.}} = \frac{\arccos \frac{P_z}{P_{\alpha 0}}}{\arccos \frac{P_y}{P_{\varphi 0}}} \cdot h_1. \quad (8)$$

Объединяя значения износа $h_{т.у.}$ и h_z в (1), получаем:

$$h_{н.н.} = \frac{R}{c(t+S)} \left(1 + \frac{\arccos \frac{P_z}{P_{об}}}{\arccos \frac{P_y}{P_{об}}} \right) \quad (9)$$

Данная методика позволяет без снятия инструмента, для измерения износа по задней грани, установить его величину расчетным путем. Для этой методики разработан способ оптимизации по заранее составленному плану исследования [4] при использовании метода факторного планирования. По данному плану изучается непрерывный износ инструмента в широком диапазоне изменения параметров резания, т. е. устанавливается взаимосвязь между $h_{н.н.}$ и V , S , t по (2).

Таблица

Время S мин	Значения μ и q_N									
	Сталь 10		Сталь 18ХНВ		Сталь У8А		Сталь 45		Сталь 40Х	
	μ	q_N	μ	q_N	μ	q_N	μ	q_N	μ	q_N
0.1	0.8	30	0.65	120	0.77	80	0.7	40	0.58	55
0.15	0.79	28	0.63	115	0.75	78	0.68	37	0.55	52
0.21	0.78	25	0.62	110	0.73	72	0.67	35	0.52	50
0.3	0.75	23	0.58	105	0.7	68	0.64	33	0.5	46
0.4	0.7	22	0.53	100	0.65	64	0.59	31	0.5	43
0.5	0.65	21	0.48	95	0.6	60	0.54	29	0.48	40
0.7	0.62	18	0.45	80	0.55	55	0.5	27	0.45	35
1.0	0.6	16	0.42	65	0.53	50	0.48	25	0.43	30

Известно, что составляющие силы резания в зависимости от режимов резания резко меняются. Для каждого опыта, определяя величины $h_{н.н.}$ по уравнению (9), можно установить его связь с режимами резания, математическая модель которого представляется в виде:

$$h_{н.н.} = C_{н.н.} V^{\alpha} S^{\beta} t^{\gamma} \quad (10)$$

Записывая уравнение (10) в регрессионном виде:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (11)$$

определяя неизвестные коэффициенты регрессии по матрице планирования, можно представить уравнение (10) в окончательном виде.

В дальнейшем, учитывая ограничения параметров резания и возможности станков, составляется уравнение линейного программирования [3] и решая на ЭВМ, получаются оптимальные параметры усло-

ний резания. Такая оптимизация, схема которой приведена на рис. 1, называется внешней.

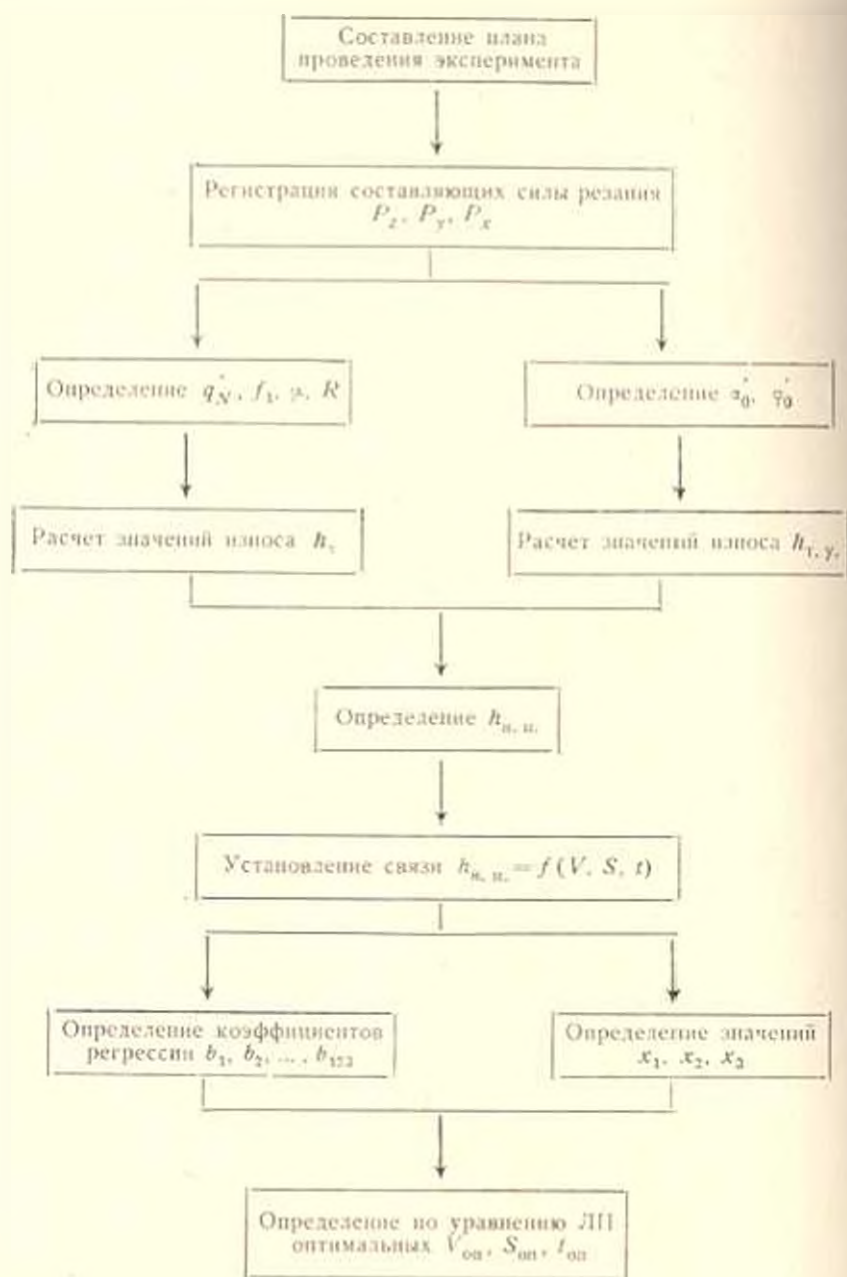


Рис. 1. Схема внешней оптимизации.

Нами разработан и другой критерий оптимизации, который зависит первый и определяется по экономии или стоимости обработки.

За целевые функции при оптимизации процесса обработки по работе [1] принимаем следующие функции.

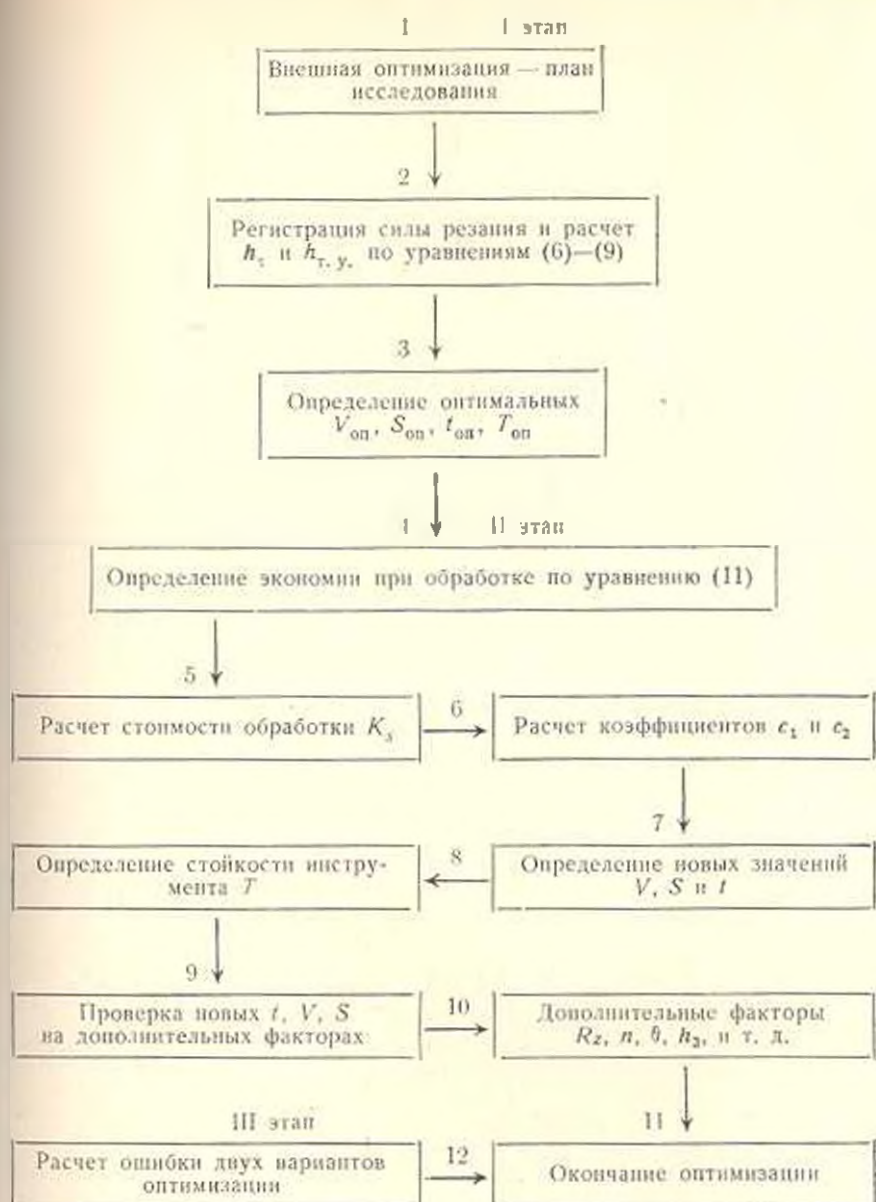


Рис. 2. Схема оптимизации.

1. Экономия при обработке:

$$E = \frac{E_0 K_s}{t_{\text{шт}}}, \quad (12)$$

где E_0 — общая экономия в коп; K_s — стоимость обработки в коп, которая определяется по формуле:

$$K_2 = \frac{c_1}{V \cdot S} + \frac{c_2}{V \cdot S \cdot T}; \quad (13)$$

c_1, c_2 — постоянные целевой функции, соответствующие обработке одной детали и учитывающие стоимость металлорежущего станка, инструмента и зарплату; T — стойкость инструмента в мин:

$$T = C_7 V^2 S^2 t^2; \quad (14)$$

$t_{шт}$ — штучное время или время обработки в мин:

$$t_{шт} = \frac{A}{S \cdot V} + t_1 + \frac{A}{V \cdot S \cdot T} + t_2; \quad (15)$$

A — постоянная целевой функции, «время обработки»; t_1 — машинное время; t_2 — вспомогательное время.

2. Дополнительные факторы: мощность металлорежущего станка; прогиб детали; диапазон чисел оборотов; подача; глубина резания; стойкость инструмента и т. д.

Предлагаемая программа оптимизации обеспечивает корректировку оптимальных значений V, S, t и получение новых значений режимов резания, которые являются окончательными.

Схема оптимизации по второму критерию, с учетом внешней оптимизации, приводится на рис. 2.

Выводы

1. Процесс резания можно оптимизировать по непрерывному износу инструмента.

2. Без каких-либо метрологических измерений инструмента можно определить непрерывный износ расчетным путем.

ВНИИРИ

Поступило 7.II.1980.

И. Ф. ГИЗЯНЦ, З. В. РАЧКАВСКАЯ, И. В. ШЕРШОВА

ԿՏՐԻՄԸ ՊՐՈՑԵՍԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՕՊՏԻՄԻԶԱՑԻԱՆ ՄԵ ՄԵԴԻԻ
ՄԱՍԻՆ ԸՍՏ ԴՈՐՈՒՔԻ ԱՆՇՆՈՂԱՆ ՄԱՇԻՆԱՆ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Աշխատանքում առաջարկված է նոր մեթոդ, քստ որի Շ մոմանակի ընթացքում կորման ամերի փոփոխությունը հետեանք է դառնում կորիչի ետեվի նիստով անընդհատ մաշմանը: Տվյալ մեթոդը հնարավորություն է ապահատանք կորիչի կորիչարների հանելու, ետերի նիստի վրա շարիել մաշման մեծությունը և հետագայում սրուել այդ մեծության շարի հաշվարկման միոնդ:

Օգտագործելով պլանավորման գործոնային մոթեմատիկական եղանակը, «պլանացվում է կտրման գործող պարամետրերը, ընդունելով որպես ղեկավարման միջոց անընդհատ մաշման շափր: Լեռնաբարկվում է օպտիմիզացման խնդիր, որը ապահովվում է կարգավորելու ստացված կտրման ռեժիմները «պլանային ղեկավարման հիմունքները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Оптимизация процесса резания на основании непрерывного износа инструмента. «Режущие инструменты». Экспресс-информация, № 37, 1976.
2. Касьян М. В., Багдасарян Г. Б., Арзуманян А. М. Объемная деформация стружки, как показатель определения обрабатываемости. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXX, № 5, 1977.
3. Ворев Н. Н. Расчет проекций силы резания. М. Машгиз. 1958.
4. Багдасарян Г. Б., Геворкян А. О. Методика применения факторного планирования при резании металлов. «Сб. мат. X конф. Лен. фил. ЕрПИИ (техн. науки)», ч. 3, Ленинград, 1976.

ЭНЕРГЕТИКА

И. И. ШАРАБХАНИЯН

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА
ЭНЕРГОСИСТЕМ, ВХОДЯЩИХ В ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЕ,
С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА МОЩНОСТИ
МЕЖСИСТЕМНЫХ ПЕРЕТОКОВ

По мере развития электрических систем и их объединений межсистемные связи (МС) приобретают новую важную роль в электроснабжении. Это выражается, в частности, в обеспечении бесперебойного электроснабжения потребителей энергосистем (ЭС), входящих в энергообъединение (ЭО) как в нормальных, так и в аварийных режимах. В связи с этим, в расчете установившегося режима ЭС необходимо учесть ряд ограничений, налагаемых на режимные параметры МС.

В предлагаемой работе излагается алгоритм расчета установившегося режима ЭС, входящих в ЭО, методом разделения [1—4] последнего на несвязанные ЭС, в основу которого лежит регулирование потоков мощностей по МС в пределах заданных ограничений. Предполагается, что в ЭО имеются узлы, регулированием мощностей которых обеспечиваются необходимые перетоки мощностей по МС: в каждой ЭС имеется ЦВМ, которая может решать задачу установившегося режима ЭС с определенными подробностями. Дополнительные вычисления, учитывающие влияние на общее решение взаимных соединений ЭС, могут быть выполнены одной из ЦВМ ЭС или специальной ЦВМ, предназначенной для этой цели.

Постановка задачи. Заданы активные g и реактивные b проводимости ветвей схемы замещения ЭО, активные P и реактивные Q мощности в нерегулируемых узлах, регулируемые узлы, производящие регулирование по активным и реактивным или по активным или реактивным мощностям, базисный узел с напряжением U_0 .

Расчет установившегося режима ЭС сводится к определению одного из возможных допустимых режимов, удовлетворяющих условиям:

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}; \quad Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max}; \quad P_{ij \min} \leq P_{ij} \leq P_{ij \max};$$

$$Q_{0 \min} \leq Q_0 \leq Q_{0 \max}; \quad P_{m \min} \leq P_m \leq P_{m \max}; \quad Q_{m \min} \leq Q_m \leq Q_{m \max}; \quad (1)$$

где P_i , Q_i и P_0 , Q_0 — активная и реактивная мощности, соответственно, регулируемого и балансирующего узла; P_{mk} и Q_{mk} — потоки активной и реактивной мощностей по МС.

Алгоритм решения. 1. ЭО расчленяется по МС на несвязанные ЭС. В каждой ЭС выделяется опорный узел.

2. Составляется матрица Y узловых проводимостей и определяется матрица Z узловых сопротивлений ЭС относительно опорного узла.

3. Задавшись приближенными значениями напряжений в узлах $\dot{U}_n$, решаются уравнения

$$\dot{U}_{m(n)} = Z_n \frac{\dot{S}_n}{\dot{U}_n} \quad (2)$$

и определяются напряжения в узлах ЭС $\dot{U}_{m(n)}$ от токов нерегулируемых узлов $\dot{S}_n/\dot{U}_n$, при $\dot{U}_p = \dot{U}_0 = 0$ ($\dot{U}_p$ — напряжение опорного узла). Z_n получается из матрицы Z ЭС, если оставить в ней столбцы, относящиеся к нерегулируемым узлам.

4. Падения напряжений в МС от токов нерегулируемых узлов:

$$\Delta \dot{U}_p = - \sum_i C_{pc} \cdot \dot{U}_{c(n)}, \quad (3)$$

где p — номера ЭС; C_{pc} — матрица соединений токов МС с узлами связей ЭС; $\dot{U}_{c(n)}$ — напряжения в узлах МС от токов нерегулируемых узлов ЭС.

5. Рассечение МС приводит к прекращению потокообмена между ЭС, так, что в одних узлах МС будет излишек мощности, в других — нехватка. Если компенсировать соответствующие мощности в узлах МС и решать уравнения узловых напряжений изолированных ЭС, то получим такое решение, как если бы ЭО не расчленялось на ЭС, а рассматривалось в целом. С целью определения перетоков по МС составляется $2(M+N-1)$ уравнений с $2(M+N+r-1)$ неизвестными (M , N , r — числа МС, ЭС и регулирующих узлов в ЭО).

6. Задавшись значениями мощностей в регулируемых узлах в пределах соответствующих ограничений по (1), из системы $2(M+N-1)$ уравнений с $2(M+N+r-1)$ неизвестными, после исключения мощностей регулируемых узлов и получения системы $2(M+N-1)$ уравнений с $2(M+N-1)$ неизвестными, определяются перетоки мощностей по МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО $\Delta \dot{U}_p$.

7. Проверяется условие (1) для мощностей межсистемных перетоков. При нарушении условия (1) для какого-нибудь перетока мощности по МС он фиксируется на соответствующем пределе и один из узлов выбирается для регулирования этого перетока. Остальные регулируемые узлы считаются нерегулируемыми по этому перетоку, мощ-

ности их фиксируются в соответствии с (1). Эти изменения вводятся в систему $2(M+N+r-1)$ уравнений с $2(M+N+r-1)$ неизвестными, после чего полученная система уравнений решается относительно неизвестных. Этот цикл расчета повторяется до обеспечения (1). При этом, если мощности регулируемых и балансирующего узлов не удовлетворяют (1), то они фиксируются на соответствующих пределах и в дальнейших расчетах не могут быть регулируемы и балансирующим узлами, а для регулирования перетока мощностей по МС и балансирования режима выбираются новые регулируемые и балансирующий узлы.

8. Дополнительные точки в узлах МС I_c , вызванных токами в МС I_m :

$$I_c = C_{cm} \cdot \frac{\dot{S}_m}{\dot{U}_c};$$

$$C_{cm} = (C_{mz})_I.$$
(4)

9. Решаются уравнения

$$\dot{U}_{m(m)} = Z_c I_c$$
(5)

и определяются узловые напряжения ЭС $\dot{U}_{m(m)}$ от токов в МС при $\dot{U}_p = \dot{U}_b = 0$.

Z_c получается из матрицы Z ЭС, если оставить в ней столбцы, относящиеся к узлам МС.

10. Узловые напряжения от токов регулируемых узлов $\dot{U}_{m(r)}$ (зафиксированных и подсчитанных в пункте 7), при $\dot{U}_p = \dot{U}_b = 0$:

$$\dot{U}_{m(r)} = Z_r \frac{\dot{S}_r}{\dot{U}_r}.$$
(6)

Z_r получается из матрицы Z , если оставить в ней столбцы, относящиеся к регулируемым узлам.

11. Результирующие узловые напряжения ЭС:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{m(n)} + \dot{U}_{m(m)} + \dot{U}_{m(r)} + \Delta \dot{U}_p + \dot{U}_b.$$
(7)

Описанный цикл расчетов повторяется до достижения желаемой точности.

Уравнения МС. Допустим, что через МС: $mk, cd, ef, \dots$ протекают токи I_{mk}, I_{cd}, I_{ef} , где первые индексы принадлежат одним ЭС, а вторые — другим. Если $\Delta \dot{U}_m, \Delta \dot{U}_k, \Delta \dot{U}_c, \dots$ — падения напряжений между опорными узлами ЭС, к которым принадлежат узлы МС: $m, k, c, \dots$ и базисным узлом ЭО, то уравнения МС с учетом п. 11 алгоритма решения можно записать

$$\dot{U}_{i(m)} + \dot{U}_{i(k)} + \dot{U}_{i(c)} + \Delta \dot{U}_i - \dot{U}_{j(n)} - \dot{U}_{j(m)} - \dot{U}_{j(r)} - \Delta \dot{U}_j = Z_{ij} I_{ij},$$
(8)

где $i = m, c, e, \dots$; $j = k, d, f, \dots$; $ij = mk, cd, ef, \dots$; Z_{ij} — сопротивления МС.

В (8) напряжения в узлах МС: $\dot{U}_{i(m)}$, $\dot{U}_{j(m)}$ определяются из (2); $\dot{U}_{i(m)}$, $\dot{U}_{j(m)}$ — из (5) через токи МС; $\dot{U}_{i(r)}$, $\dot{U}_{j(r)}$ — из (6) через токи регулируемых узлов.

Подставив их значения в (8), получим систему уравнений с неизвестными: токами в МС I_x ; падениями напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО $\Delta \dot{U}_p$ и токами регулируемых узлов (I_r). Составим еще уравнения баланса токов в ЭС:

$$\sum I_m + \sum I_r = -I_p. \quad (9)$$

Объединив (8) и (9) в одну систему, запишем ее в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} Z_m & Z_r & K_{mp} \\ K_{pm} & K_{pr} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x \\ I_r \\ \Delta \dot{U}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_m \\ -I_p \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где Z_m — матрица сопротивлений узлов МС относительно опорных узлов ЭС [1]; $Z_r = C_{ms} \cdot Z_{cr}$ — матрица взаимных узловых сопротивлений между узлами МС и регулируемыми узлами.

Элементы Z_{cr} получаются из матриц узловых сопротивлений ЭС пересечением строки s , соответствующей номеру узла МС, со столбцом r , соответствующем номеру регулируемого узла.

K_{pm} — матрица соединений токов в МС с ЭС; $K_{mp} = (K_{pm})_t$; K_{pr} — матрица соединений токов регулируемых узлов в ЭС; I_p — суммарные токи нерегулируемых узлов ЭС, кроме ЭС с базисным узлом;

$$I_p = \sum_{n=1}^n \left(\frac{\dot{S}_n}{\dot{U}_n} + Y_{no} \dot{U}_n \right);$$

n — номера нерегулируемых узлов ЭС; Y_{no} — поперечная проводимость ветви, примыкающая к узлу n .

Так как по постановке задачи ограничения накладываются не на токи, а на активные и реактивные мощности, то с учетом того, что:

$$Z = r + jx; \quad \dot{I} = I' + jI''; \quad \dot{U} = U' + jU''; \quad \Delta \dot{U} = \Delta U' + j\Delta U'';$$

$$P = \frac{PU' + QU''}{U'^2 + U''^2}; \quad Q = \frac{PU'' - QU'}{U'^2 + U''^2},$$

после соответствующих преобразований (10) получим:

$$\begin{bmatrix}
 \frac{Z_M U_M' - X_M U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & \frac{Z_M U_M' + X_M U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & \frac{r_r U_r' - X_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & \frac{r_r U_r' + X_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & K_{up} & 0 \\
 \frac{X_M U_M' + r_M U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & \frac{X_M U_M' - r_M U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & \frac{X_r U_r' + r_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & \frac{X_r U_r' - r_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & 0 & K_{up} \\
 \frac{K_{pM} U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & \frac{K_{pM} U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & \frac{K_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & \frac{K_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & 0 & 0 \\
 \frac{K_{pM} U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & -\frac{K_{pM} U_M'}{U_M'^2 + U_M'^2} & \frac{K_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & -\frac{K_r U_r'}{U_r'^2 + U_r'^2} & 0 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_M \\ Q_M \\ P_r \\ Q_r \\ \Delta U_p' \\ \Delta U_p' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_M \\ \Delta U_M \\ -I_p' \\ -I_p' \end{bmatrix} \quad (11)$$

Здесь U' и U'' являются диагональными матрицами.

Решается (11) и определяются соответствующие неизвестные. При этом целесообразно учитывать наличие нулевой подматрицы в (11).

Заметим, что определение неизвестных из (11) методом обращения имеет недостаток, т. к. приходится в каждом шаге итерации обращать подматрицу в левой части преобразованной системы уравнений (11). Чтобы избежать этого, предлагается следующее решение. Задав P_r и Q_r по (1), а следовательно, и I_r и I_r' , из (11) определяют неизвестные I_M и I_M' , затем проверяют условия:

$$P_{M \max} > (I_M U_M' + I_M' U_M) \geq P_{M \min}; \quad Q_{M \max} \geq (I_M U' - I_M' U_M) > Q_{M \min}.$$

Если нарушены условия по активной и реактивной мощностям, то они фиксируются на соответствующих пределах и, решая систему двух уравнений с двумя неизвестными, определяют предельные составляющие токов (I' и I''), которые, подставляя в (10), решают систему. Если же нарушено условие по одной из мощностей (по P или Q), то эта мощность фиксируется на этом пределе. Мощность P или Q , которая не вышла за пределы ограничений, задается величиной в пределах ограничений.

Очевидно, что такое решение не адекватно решению по (11).

Пример. Пусть задана система, представленная на рис. 1. Сопротивления всех ветвей равны 1 Ом, величин токов A нерегулируемых узлов указаны на рис., напряжение базисного узла— $U_0 = 0$. Регулируе-

мыми являются узлы 3, 4, 5, 8, базисным — 6. На токи регулируемых и базисного узлов наложены ограничения:

$$0 \leq I_3 \leq 2; \quad 0 \leq I_4 \leq 1; \quad 0 \leq I_5 \leq 5; \quad 0 \leq I_8 \leq 4; \quad 0 \leq I_6 \leq 5.$$

На перетоки по линиям связи подсистем (ПС) наложены ограничения:

$$0,5 \leq I_{13} \leq 1; \quad 0,5 \leq I_{23} \leq 2; \quad 1 \leq I_{25} \leq 1,5; \quad 0 \leq I_{45} \leq 0,5.$$

1. Система разделяется по линиям связи на три ПС. Опорными пусть являются узлы: 5 в I ПС; 8 во II ПС и 6 в III ПС.

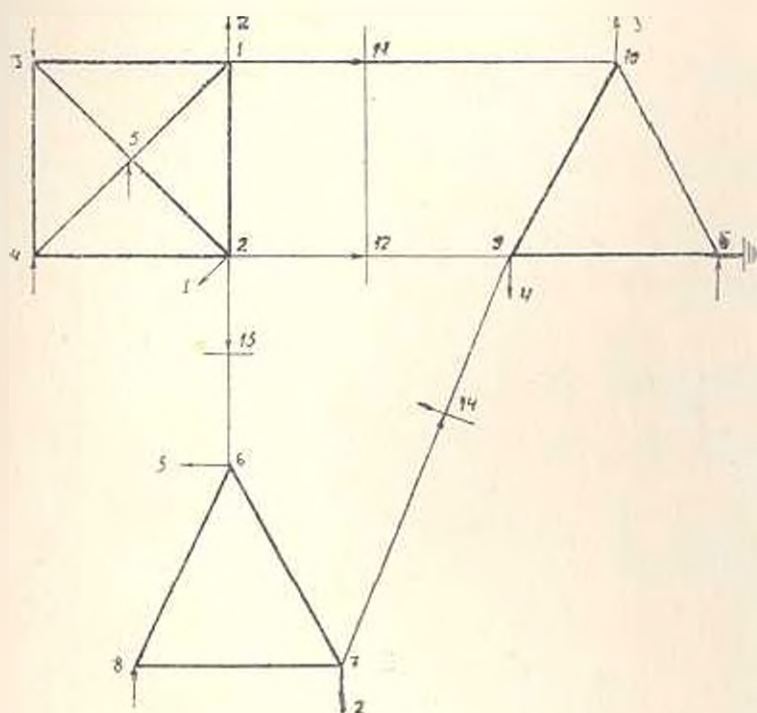


Рис. 1.

2. Составляются матрицы Y узловых проводимостей и определяются матрицы Z узловых сопротивлений ПС:

$$Y_I = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix}; \quad Y_{II} = Y_{III} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix};$$

$$Z_I = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 7 & 3 & 3 & 2 \\ 3 & 7 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 7 & 3 \\ 2 & 3 & 3 & 7 \end{bmatrix}; \quad Z_{II} = Z_{III} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}.$$

3. Узловые напряжения от токов нерегулируемых узлов:

$$U_{m(i)}^I = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -17 \\ -13 \\ -8 \\ -7 \end{bmatrix}; \quad U_{m(ii)}^{II} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -8 \\ -7 \end{bmatrix}; \quad U_{m(iii)}^{III} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -11 \\ -10 \end{bmatrix}.$$

4. Падения напряжений в линиях связи ПС от токов нерегулируемых узлов:

$$\Delta U_M = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 33 \\ 42 \\ 27 \\ 20 \end{bmatrix}; \quad C_{MC}^I = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_M^{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad C_{MC}^{III} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

5. Составляются подматрицы уравнений (10):

$$Z_M = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 32 & 8 & 3 & 5 \\ 8 & 32 & 7 & 10 \\ 3 & 7 & 32 & -5 \\ 5 & 10 & -5 & 32 \end{bmatrix}; \quad Z_r = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 0 & -3 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & -3 & 0 \\ 0 & -2 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$K_{sp} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad K_{pm} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix};$$

$$K_{pe} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad I_p = \begin{bmatrix} -3 \\ -5 \end{bmatrix}.$$

Вычисленные и составленные подматрицы объединяются в матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} 32 & 8 & 3 & 5 & 0 & -3 & -2 & 0 & -15 & 0 \\ 8 & 32 & 7 & 10 & 0 & -2 & -3 & 0 & -15 & 0 \\ 3 & 7 & 32 & -5 & 0 & -2 & -3 & 0 & -15 & 15 \\ 5 & 10 & -5 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ -15 & -15 & -15 & 0 & 15 & 15 & 15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & 15 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{110} \\ I_{29} \\ I_{28} \\ I_{79} \\ I_5 \\ I_2 \\ I_4 \\ I_8 \\ \Delta U_I \\ \Delta U_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33 \\ 42 \\ 27 \\ 20 \\ 45 \\ 75 \end{bmatrix}.$$

6. Задавшись токами в регулируемых узлах в пределах заданных ограничений $I_2 = 2$, $I_3 = 1$, $I_4 = 5$, $I_5 = 4$, получим:

$$\begin{bmatrix} 32 & 8 & 3 & 5 & -15 & 0 \\ 8 & 32 & 7 & 10 & -15 & 0 \\ 3 & 7 & 32 & -5 & -15 & 15 \\ 5 & 10 & -5 & 35 & 0 & -15 \\ -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & -15 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{110} \\ I_{29} \\ I_{28} \\ I_{19} \\ \Delta U_I \\ \Delta U_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 41 \\ 49 \\ 34 \\ 20 \\ 165 \\ 135 \end{bmatrix}.$$

откуда определяются:

$$\begin{bmatrix} I_{10} \\ \Delta U_I \end{bmatrix} = [I_{110} I_{29} I_{28} I_{19} \Delta U_I \Delta U_{II}] = \frac{1}{1449} [2621 \ 2697 \ 1917 \ 468 \ 3630 \ 1198].$$

7. Как видно, только $I_{10} = \frac{2631}{1449} > 1$ не удовлетворяет заданному ограничению. Фиксируем $I_{10} = 1$ и выделяем узел 5 в качестве регулируемого для обеспечения этого перетока. Узлы 3, 4 и 8 считаем перерегулируемыми, токи их фиксируем: $I_2 = 2$; $I_3 = 1$; $I_4 = 4$. Введя эти изменения в матричное уравнение, определяем:

$$[I_{29} \ I_{28} \ I_{19} \ I_2 \ I_3 \ \Delta U_I \ \Delta U_{II}] = \frac{1}{657} [753 \ 693 \ 36 \ 2103 \ 158 \ -302].$$

8. Дополнительные токи в узлах линий связей ПС, вызванных токами, протекающими в этих линиях:

$$I_k^I = \frac{1}{657} \begin{bmatrix} -657 \\ -1446 \end{bmatrix}; \quad I_k^{II} = \frac{1}{657} \begin{bmatrix} 693 \\ -36 \end{bmatrix}; \quad I_k^{III} = \frac{1}{657} \begin{bmatrix} 657 \\ 789 \end{bmatrix}.$$

9. Узловые напряжения от токов в линиях связи ПС:

$$U_{m(I)}^I = \frac{1}{15 \cdot 219} [-2479 \ 4031 \ -1631 \ -1834]_r;$$

$$U_{m(I)}^{II} = \frac{1}{73} \begin{bmatrix} 50 \\ 23 \end{bmatrix}; \quad U_{m(I)}^{III} = \frac{1}{657} \begin{bmatrix} 745 \\ 701 \end{bmatrix}.$$

10. Узловые напряжения от токов регулируемых узлов:

$$U_{m(r)}^I = \frac{1}{15} [8 \ 7 \ 17 \ 13]_r.$$

11. Результирующие узловые напряжения ПС:

$$U_m^I = \frac{1}{657} [-832 \ -911 \ 228 \ 44]_r; \quad U_m^{II} = \frac{1}{657} \begin{bmatrix} -1604 \\ -1628 \end{bmatrix};$$

$$U_m^{III} = \frac{1}{657} \begin{bmatrix} -1664 \\ -1489 \end{bmatrix}.$$

Во всех вышеприведенных выражениях I — транспонирование матрицы.

Выводы

1. Алгоритм расчета установившегося режима ЭС, входящих в ЭО, основан на методе деления схемы ЭО на изолированные ЭС с возможностью регулирования потоков мощностей по МС.

2. Если поток мощности по МС выходит за допустимые пределы, то он фиксируется на соответствующем предельном значении и мощность узла, регулирующего этот переток, определяется непосредственно, в отличие от применяемых на практике управления режимами ЭС метода перебора мощностей регулирующих станций.

3. Запись уравнений баланса токов (9), которая рекомендуется по [4] вместо баланса мощностей, не освобождает от нежелательной процедуры многократного обращения матрицы при наступлении ограничений на активную или реактивную мощность перетока по МС.

АрмНИИЭ

Поступило 8.VII.1979

Լ. Բ. ՇԱՐԱԽԻԱՆՅԱՆ

ԷՆԵՐԳԱՄԻԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵՋ ՄՏՆՈՂ ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ԱԷԳՈՐԻԹՄԸ՝ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆՆԵՐՈՎ ՄԵՋ-
ՀԱՄԱԿԱՐԳՎԱԶՆ ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀՈՍՔՆԵՐԻ ՎՐԱ ԳՐՎԱԾ
ՍԱՀՄԱՆԱՓԱԿՈՒՄՆԵՐԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Առաջարկվում է էներգամիալորման (էՄ) հաստատված ռեժիմի (ՀՌ) հաշվարկի ալգորիթմը՝ էՄ չկապակցված էներգահամակարգերի (էՀ) տրոհման մեթոդով միջհամակարգային կապերով (ՄԿ) հղորության հոսքերի կարգավորման նստավորությամբ: Կազմվում են ՄԿ-երի և էՀ-երի հավասարումները, որոնք արտահայտում են կապը առանձին էՀ-երի հանդուցային պարամետրների միջև: Ընդունելով կարգավորելի հանդուցների հղորությունները սահմանափակումների արված սահմաններում և լուծելով այս հավասարումները՝ որոշում են հոսքերը ՄԿ-երում, որոնք անհրաժեշտության դեպքում կարգավորվում են:

էՀ-երի ՀՌ-ները որոշվում են նրա կարգավորվող, չկարգավորվող հանդուցների և ՄԿ-երի ռեժիմների փերադրումով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кром Г. Исследование сложных систем по частот-линеоптика. М., «Наука», 1972.
2. Адонц Г. Т. Алгоритм расчета установившихся режимов электрической системы, разделенной на многополюсники. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1971, № 1.
3. Амирян Р. А., Шарабханян Н. Н. Об одном алгоритме установившегося режима энергосистем, входящих в энергообъединение. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXXII, № 1, 1979.
4. Кузьмин Я. Ф., Махитко А. Е. Расчет электрических сетей при заданных мощностях в узлах методом разбиения на подсистемы. «Электричество», 1972, № 5.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. С. САФАРЯН

КОРРЕКЦИЯ Z-МАТРИЦЫ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ
 ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОМПЛЕКСНЫХ
 КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ

Введение. С развитием сетей 220—500 кВ все больший интерес представляют методы расчета установившихся режимов с учетом продольно-поперечного регулирования коэффициентов трансформации трансформаторов, связывающих сети с различными номинальными напряжениями.

При последовательном включении в контур сети трансформаторов с различными группами соединений коэффициент трансформации выражается комплексным числом. Комплексным может быть также результирующий коэффициент трансформации при включении выгоднодействующего трансформатора или при наличии, так называемых, поперечных регулирующих трансформаторов.

При наличии в сети трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации матрица узловых проводимостей и Z-матрица обобщенных параметров получают несимметричными.

При многократных расчетах установившихся режимов, проводимых для оптимизации режимов по коэффициентам трансформации, с изменением любого из коэффициентов трансформации трансформаторов требуется пересчет Z-матрицы обобщенных параметров электрической системы.

Целью данной работы является разработка методов коррекции Z-матрицы обобщенных параметров при изменении комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.

Решение задачи. Комплексные коэффициенты трансформаций учитываются с помощью схемы замещения трансформатора, состоящей из сопротивления рассеяния и идеального автотрансформатора (без потерь) [1—3]. Сопротивление рассеяния трансформатора приводится к ступени напряжения узла, к которому оно отнесено. Обычно сопротивление рассеяния приводится к высокой ступени напряжения (рис. 1).

В схеме замещения трансформатора с комплексным коэффициентом трансформации (рис. 1) для узлов p и q , соответственно, имеем:

$$\begin{cases} \dot{I}_p = \sum \dot{I}_p + \dot{Y}_{\text{тр}} \cdot \frac{\dot{U}_p - K \dot{U}_q}{|K|^2}; \\ \dot{I}_q = \sum \dot{I}_q - \dot{Y}_{\text{тр}} \cdot \frac{\dot{U}_p - K \dot{U}_q}{K}. \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{I}_p, \dot{I}_q$ — задающие токи, соответственно, узлов p и q ; $\sum \dot{I}_p, \sum \dot{I}_q$ — сумма токов ветвей, примыкающих к узлам p и q ; $\dot{Y}_{\text{тр}}$ — проводимость трансформатора; $K = \frac{\dot{U}_p}{\dot{U}_q}$ — коэффициент трансформации.

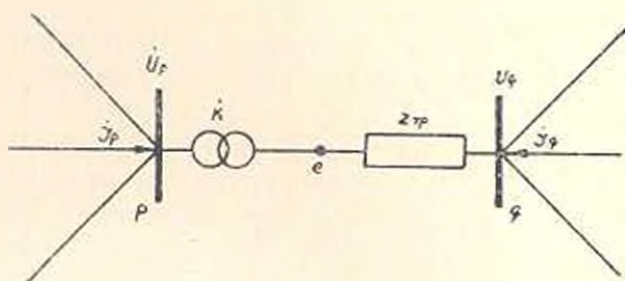


Рис. 1. Схема замещения трансформатора.

Исходя из (1), для соответствующих элементов матрицы узловых проводимостей имеем:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{pp} = \sum_k \dot{Y}_{pk} + \frac{\dot{Y}_{\text{тр}}}{|K|^2}; \\ \dot{Y}_{pq} = -\frac{\dot{Y}_{\text{тр}}}{K}; \\ \dot{Y}_{qp} = -\frac{\dot{Y}_{\text{тр}}}{\bar{K}}; \\ \dot{Y}_{qq} = \sum_k \dot{Y}_{qk} + \dot{Y}_{\text{тр}}. \end{cases} \quad (2)$$

где $\sum_k \dot{Y}_{pk}, \sum_k \dot{Y}_{qk}$ — сумма проводимостей ветвей, примыкающих к узлам p и q .

Для коррекции Z-матрицы обобщенных параметров электрических систем при изменении комплексных коэффициентов трансформации сначала скорректируем матрицу узловых проводимостей [4]:

$$Y' = Y - \Delta Y, \quad (3)$$

где Y, Y' — исходная и скорректированная матрицы узловых проводимостей; ΔY — матрица, учитывающая изменение в схеме.

Далее, простыми преобразованиями получаем:

$$(Y - \Delta Y) \cdot Z' = E; \quad (E - Z \cdot \Delta Y) \cdot Z' = Z; \quad Z' = (E - Z \cdot \Delta Y)^{-1} \cdot Z$$

или

$$Z' = A \cdot Z, \quad (4)$$

где

$$A = (E - Z \cdot \Delta Y)^{-1}; \quad (5)$$

E — единичная матрица.

При раскрытии последнего матричного выражения выяснилось, что матрицу A можно формировать автоматически. При этом необходимо учесть следующие два случая.

а) Вершины p и q , между которыми расположен трансформатор с комплексным коэффициентом трансформации, не являются базисными узлами.

Матрица A получается следующей структуры:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{1p} & 0 & a_{1q} & 0 \\ 0 & a_{2p} & 0 & a_{2q} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{pp} & 1 & a_{pq} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{qp} & 0 & a_{qq} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & a_{np} & 0 & a_{nq} & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

В матрице A отличны от нуля только элементы столбцов p и q и главной диагонали:

$$\begin{cases} a_{ii} = 1; \quad i \neq p, q; \\ a_{pp} = (1 + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq})/D; \\ a_{qq} = (1 + \Delta Y_{qp} \cdot Z_{pq} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{pp})/D; \\ a_{ip} = [(\Delta Y_{pq} \cdot Z_{ip} - \Delta Y_{ii} \cdot Z_{iq}) \cdot (\Delta Y_{qp} \cdot Z_{qq} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{qp}) - \\ - (\Delta Y_{qp} \cdot Z_{iq} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{ip}) \cdot (1 + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq})]/D; \\ a_{iq} = [(\Delta Y_{qp} \cdot Z_{iq} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{ip}) \cdot (\Delta Y_{pq} \cdot Z_{pp} - \Delta Y_{qp} \cdot Z_{pq}) - \\ - (\Delta Y_{pq} \cdot Z_{ip} - \Delta Y_{iq} \cdot Z_{iq}) \cdot (1 + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{pp})]/D; \\ D = 1 - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq} + \Delta Y_{pq} \cdot Z_{pq} + \Delta Y_{qp} \cdot Z_{qp} - \Delta Y_{pp} \cdot Z_{pp} + \\ + (\Delta Y_{pq} \cdot \Delta Y_{qp} - \Delta Y_{pp} \cdot \Delta Y_{qq}) \cdot (Z_{pq} \cdot Z_{qp} - Z_{pp} \cdot Z_{qq}). \end{cases} \quad (7)$$

где ΔY_{pp} , ΔY_{pq} , ΔY_{qp} , ΔY_{qq} — изменение соответствующих элементов матрицы узловых проводимостей.

Если в ветви с вершинами p , q трансформатор отключается, то для коррекции Z -матрицы необходимо в формулах (7) вместо ΔY_{pp} ,

ΔY_{pq} , ΔY_{pp} и ΔY_{qq} поставить соответствующие элементы матрицы узловых проводимостей.

б) Одна из вершин, примыкающих к трансформатору, является базисным узлом (трансформатор находится между узлами БУ— q):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{1q} & 0 & 0 \\ 0 & a_{qq} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & a_{nq} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

В матрице A отличны от нуля только элементы столбца q и главной диагонали:

$$\begin{cases} a_{ii} = 1; & i \neq q; \\ a_{qq} = 1/D; \\ a_{iq} = \Delta Y_{qq} \cdot Z_{iq}/D; & i \neq q; \\ D = 1 - \Delta Y_{qq} \cdot Z_{qq}. \end{cases} \quad (9)$$

где ΔY_{qq} — изменение соответствующего диагонального элемента матрицы узловых проводимостей.

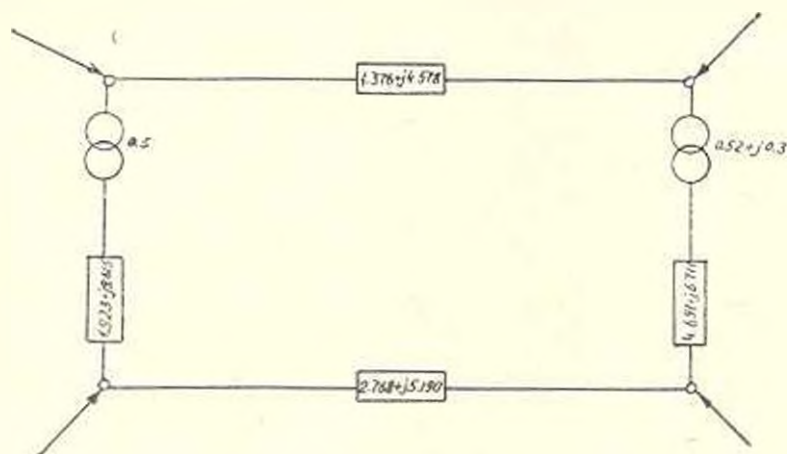


Рис. 2. Расчетная схема электрической сети.

Практическая реализация метода. Рассмотрим расчетную схему электрической сети (рис. 2), состоящей из 4 узлов. Пассивные параметры ветвей (сопротивления и коэффициенты трансформаций) известны. Известна также Z -матрица обобщенных параметров (10) (в качестве базисного выбран узел 1).

$$Z = \begin{array}{c|cc} & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{c} 2 \\ 3 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{c} 0,436 + j1,898 \\ 0,344 + j0,944 \\ 0,502 + j0,473 \end{array} & \begin{array}{c} 0,344 + j0,944 \\ 1,186 + j2,719 \\ 1,546 + j1,317 \end{array} & \begin{array}{c} -0,165 + j0,664 \\ -0,368 + j2,027 \\ 2,089 + j4,304 \end{array} \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \quad (10)$$

В ветвь с вершинами 1—4 включен трансформатор с действительным коэффициентом трансформаций, а в ветвь с вершинами 2—3 с комплексным коэффициентом трансформаций. Предполагается, что комплексный коэффициент трансформатора изменяется и становится равным $K' = 0,34 + j0,2$.

Для коррекции Z-матрицы обобщенных параметров необходимо сначала сформировать матрицу A (11). Для упрощения расчетов можно пренебречь изменением проводимости ветви с вершинами 2—3, возникающими при изменении комплексного коэффициента

$$A = \begin{array}{c|cc} & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{c} 2 \\ 3 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} -0,262 - j0,036 \\ 0,652 + j0,037 \\ -0,228 + j0,016 \end{array} & \begin{array}{c} 0,142 + j0,095 \\ 0,107 + j0,030 \\ 1,161 + j0,067 \end{array} \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \quad (11)$$

Далее, согласно (4), скорректируем Z-матрицу обобщенных параметров (12):

$$Z' = \begin{array}{c|cc} & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{c} 2 \\ 3 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{c} 0,458 + j1,778 \\ 0,248 + j0,537 \\ 0,473 + j0,374 \end{array} & \begin{array}{c} 0,248 + j0,537 \\ 0,830 + j1,938 \\ 1,456 + j1,042 \end{array} & \begin{array}{c} -0,095 + j0,992 \\ -0,175 + j1,812 \\ 2,288 + j4,704 \end{array} \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \quad (12)$$

ԱրմՀՈՒՅ

Поступило 12.11.1979

Վ. Ս. ՍԱՀԱՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈԶԱՄԱԿԱՍԻՐԳԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ
Z-ԴԱՏՐԻՑԱՅԻ ՈՒՂՂՈՒՄԸ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ԿՈՄՊԼԵՔՍ
ԳՈՐԱԿՈՑՆԵՐԻ ՓՈՓՈԽՄԱՆ ԳԵՊԸՆԻՄ

Ս. Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Էլեկտրահամակարգերի ընդհանրացված պարամետրերի Z-մատրիցայի ուղղման համար, երբ փոփոխվում են տրանսֆորմացիայի կոմպլեքս գործա-

կիցները, առաջարկվում է մի մեթոդ, ըստ որի կառուցվում է լրացուցիչ Λ մատրիցա, որը ձախից բազմապատկելով Z -մատրիցայի Z մատրիցայով, ստացվում է ուղղված Z -մատրիցա: Ընդհանրացված պարամետրերի Z -մատրիցայի կորրեկցիայի առաջարկված մեթոդը կարելի է կիրառել էլեկտրահամակարգերում ցանկացած փոփոխության դեպքում (ենթադրվում է, որ փոփոխման ընթացքում համակարգի հանգույցների թիվը չի փոխվում):

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Филизов Х. Ф., Насыров Т. Х., Брискин И. Л. К расчету установившихся режимов энергосистем с учетом комплексных коэффициентов трансформации. «Электричество», 1972, № 12, с. 7—9.
2. Филизов Х. Ф., Брискин И. Л. Расчет установившегося режима электрических систем с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. «Труды ТашНЭ», вып. 75, Ташкент, 1971.
3. Додушинская Л. А. Алгоритм расчета установившегося режима сложных энергосистем при учете комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. «Проблемы технической электродинамики», вып. 25, Киев, «Наукова думка», 1970, с. 61—66.
4. Медьников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. М., «Энергия», 1972, 231 с.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

К. О. СОГНЯН

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ТРЕХФАЗНОГО
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ
НЕСИММЕТРИЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТОРМОЗА

Продолжительность испытаний на нагрев трехфазных асинхронных двигателей (АД) мощностью от 0,6 до 100 кВт, которые обычно осуществляются путем непосредственной механической нагрузки на валу, может быть значительно сокращена, если применить режим несимметричного электромагнитного тормоза (НЭТ) двигателя [1]. В этом режиме, после запуска АД на холостом ходу, одна фаза (С) статора отключается от сети и замыкается на добавочное сопротивление $Z_{доб} = R_{доб} + jX_{доб}$, предварительно соединенное с нулевой точкой обмотки статора, а две другие фазы (А и В) остаются включенными в сеть [2, 3]. При производстве или ремонте АД испытание на нагрев в режиме НЭТ, помимо существенного уменьшения стоимости испытаний, позволяет выявить скрытые дефекты АД в межвитковой изоляции обмотки, заливке стержней беличьей клетки ротора, обеспечении заданной величины воздушного зазора и др.

Ниже приводится метод приближенного определения электромагнитных моментов, развиваемых АД при несимметричной схеме включения фаз статора, позволяющий значительно упростить эту задачу по сравнению с классическим методом симметричных составляющих.

В [1] показано, что схема замещения трехфазного АД в режиме НЭТ может быть представлена схемой замещения двух однофазных асинхронных машин — «двигателя АВ» и «двигателя С», имеющих общий ротор и общий магнитопровод статора (рис. 1а). Обмотка W_{AB} «двигателя АВ» состоит из фаз А и В, а обмотка W_C «двигателя С» — из фаз С статора исходного трехфазного АД.

К выводам обмотки W_{AB} приложено напряжение $\dot{U}_{AB}$ от сети. Напряжение на выводах обмотки W_C является вторичным, оно индуцировано током ротора аналогично напряжению в управляющей обмотке асинхронного тахогенератора [4]. Поэтому электромагнитный момент M_{AB} «двигателя АВ» противоположен электромагнитному моменту M_C «двигателя С».

Непосредственное измерение моментов $M_{длв}$ и $M_{л}$ экспериментальным путем не представляется возможным. Однако наличие указанных моментов в режиме НЭТ АД подтверждается на основании следующих физических представлений и экспериментальных данных. При $U_{длв} = \text{const}$ и постоянных параметрах АД с уменьшением добавочного сопротивления $Z_{доб}$ увеличиваются скольжение s , ток в фазах АВ и С статора, в роторе и потребляемая из сети активная мощность $P_{длв}$.

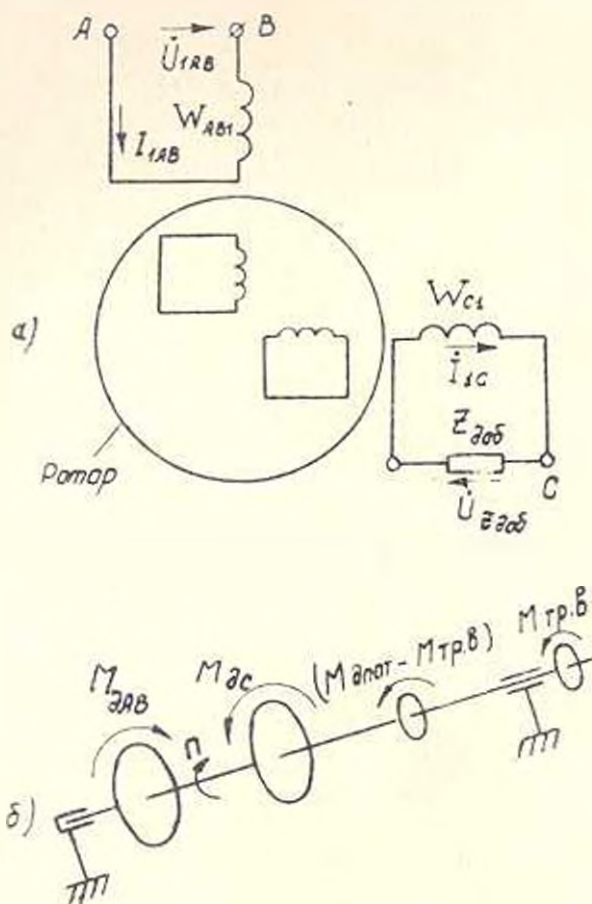


Рис. 1. Схема замещения трехфазного асинхронного двигателя в режиме несимметричного электромагнитного тормоза: а) принципиальная схема; б) схема моментов.

Поскольку в режиме НЭТ механический (внешний) момент на валу АД равен нулю, то увеличение s , $P_{длв}$ и токов статора и ротора обусловлено наличием в режиме НЭТ тормозных моментов $M_{ас}$ «двигателя С» и $M_{апот}$ от трения, вентиляции, магнитных и электрических потерь и момента $M_{длв}$, уравнивающего $M_{ас}$ и $M_{апот}$. С уменьшением $Z_{доб}$ увеличиваются моменты $M_{ас}$, $M_{апот}$, скольжение s , а следовательно, и момент $M_{длв}$.

Уравнение моментов АД в режиме НЭТ:

$$M_{1AB} - M_{1C} - M_{1\text{пот}} = 0; \quad M_{1AB} = M_{1C} + M_{1\text{пот}} \quad (1)$$

или

$$M_{1AB} - M_{1C} - (M_{1\text{тр}} - M_{1\text{тр. в}}) = M_{1\text{тр. в}} \quad (1a)$$

где $M_{1\text{тр. в}}$ — момент трения и вентиляции АД.

Уравнение (1a) показывает, что результирующий момент АД в режиме НЭТ равен моменту трения и вентиляции. На рис. 16 схематически показаны моменты, действующие на валу АД в режиме НЭТ.

В режиме НЭТ скольжение $s = (0,3 \div 0,6) s_n$, где s_n — номинальное скольжение [5]. В этом диапазоне скольжений, как известно, вращающие моменты от обратного поля и высших гармоник оказывают незначительное влияние на результирующий момент однофазного режима трехфазного АД. Задачу определения моментов M_{1AB} и M_{1C} можно значительно упростить, если эти моменты определить приближенно, на основании экспериментальных данных измерений в режиме НЭТ токов и мощностей.

Величины, входящие в (1), можно представить в виде:

$$M_{1AB} = \frac{P_{1AB}}{\omega_1} = \frac{P_{1AB} - P_{\text{м1AB}} - P_{\text{ст1AB}}}{\omega_1}; \quad (2)$$

$$M_{1C} = \frac{P_{2C}}{\omega_1} = \frac{P_2 - P_{\text{м2C}} - P_{\text{ст2C}}}{\omega_1} = \frac{P_{Z_{\text{доб}}} + P_{\text{м1C}} - P_{\text{ст1C}}}{\omega_1}; \quad (3)$$

$$M_{1\text{пот}} = \frac{P_{1\text{пот}}}{\omega_2}, \quad (4)$$

где

$$P_{1AB} = U_{1AB} \cdot I_{1AB} \cdot \cos \varphi_{AB}; \quad P_{\text{м1AB}} = 2r_1 I_{1AB}^2; \quad P_{\text{ст1C}} = r_1 I_{1C}^2; \\ P_{Z_{\text{доб}}} = I_{1C} U_{Z_{\text{доб}}} \cdot \cos \varphi_C = I_{1C}^2 (Re[Z_{\text{доб}}]); \quad (5)$$

$$U_{Z_{\text{доб}}} = I_{1C} Z_{\text{доб}}; \quad (6)$$

P_{1AB} , P_{2C} — электромагнитная мощность «двигателя АВ» и «двигателя С»; $P_{\text{м1AB}}$, $P_{\text{ст1AB}}$, $\cos \varphi_{AB}$ — потери в меди и стали статора и коэффициент мощности «двигателя АВ»; P_2 — потребляемая мощность «двигателя С»; $P_{\text{м2C}}$, $P_{\text{ст2C}}$ и $P_{\text{м1C}}$, $P_{\text{ст1C}}$ — потери в меди стали ротора (первичной цепи) и статора (вторичной цепи) «двигателя С»; $\cos \varphi_C$ — коэффициент мощности вторичной цепи «двигателя С»; $P_{1\text{тр. в}}$ — потери на трение и вентиляцию; $P_{Z_{\text{доб}}}$, $U_{Z_{\text{доб}}}$ — потери мощности и падение напряжения на добавочном сопротивлении $Z_{\text{доб}}$; ω_1 , ω_2 — угловая скорость вращения магнитного поля и ротора; r_1 — активное сопротивление одной фазы статора исходного трехфазного АД; I_{1AB} , I_{1C} — ток в фазах АВ и С статора АД в режиме НЭТ.

Электромагнитный момент «двигателя АВ» в долях электромагнитного момента двух фаз трехфазного номинального режима АД равен

$$k_{\text{МAB}} = \frac{M_{2\text{AB}}}{\frac{2}{3} M_{\text{н}}} = \frac{\frac{P_{1\text{AB}}}{\omega_1}}{\frac{2}{3} \frac{P_{12\text{н}}}{\omega_1}} =$$

$$= \frac{P_{1\text{AB}} - P_{\text{М1AB}} - P_{\text{ст1AB}}}{\frac{2}{3} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - P_{\text{М1н}} - P_{\text{ст1н}} \right)} \approx \frac{P_{1\text{AB}} - P_{\text{М1AB}}}{\frac{2}{3} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - P_{\text{М1н}} \right)} \quad (7)$$

а электромагнитный момент «двигателя С» в долях электромагнитного момента одной фазы трехфазного номинального режима АД:

$$k_{\text{МС}} = \frac{M_{2\text{C}}}{\frac{1}{3} M_{\text{н}}} = \frac{\frac{P_{2\text{C}}}{\omega_1}}{\frac{1}{3} \frac{P_{12\text{н}}}{\omega_1}} =$$

$$= \frac{P_{\text{ЗЗ06}} + P_{\text{М1С}} + P_{\text{ст1С}}}{\frac{1}{3} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - P_{\text{М1н}} - P_{\text{ст1н}} \right)} \approx \frac{P_{\text{ЗЗ06}} + P_{\text{М1С}}}{\frac{1}{3} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - P_{\text{М1н}} \right)} \quad (8)$$

где $P_{12\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - P_{\text{М1н}} - P_{\text{ст1н}}$ — электромагнитная мощность АД в трехфазном номинальном режиме; $M_{\text{н}}$, $P_{\text{н}}$, $\eta_{\text{н}}$, $P_{\text{М1н}}$, $P_{\text{ст1н}}$ — момент, мощность, к. п. д., потери в меди и стали статора АД в трехфазном номинальном режиме.

Потери $P_{\text{ст1AB}}$ и $\frac{2}{3} P_{\text{ст1н}}$ примерно одинаковы и по сравнению с $(P_{1\text{AB}} - P_{\text{М1AB}})$ и $\frac{2}{3} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - P_{\text{М1н}} \right)$ составляют незначительную величину (порядка $1-2\%$). Кроме того, $P_{\text{ст1AB}}$ находится в числителе, а $\frac{2}{3} P_{\text{ст1н}}$ — в знаменателе выражения (7). Поэтому для упрощения расчетов в (7) принимается $P_{\text{ст1AB}} \approx \frac{2}{3} P_{\text{ст1н}} \approx 0$. Аналогично, в (8) принимается $P_{\text{ст1С}} \approx \frac{1}{3} P_{\text{ст1н}} \approx 0$.

В таблице приводятся значения кратностей электромагнитных моментов «двигателя АВ» $k_{\text{МAB}}$ и «двигателя С» $k_{\text{МС}}$ для ряда АД в диапазоне мощности от 2,2 до 10 кВт, с числом полюсов $2p = 2 \div 8$. Величины $k_{\text{МAB}}$ и $k_{\text{МС}}$ рассчитаны по формулам:

Таблица

Зависимость электромагнитных моментов асинхронных двигателей
в режиме несимметричного электромагнитного тормоза

Двигатель	Добавочное сопротивление, Ом		Кратность тока статора	Потребляемая мощность, Вт	Кратность момента двигателя АД-	Кратность момента двигателя С-	Отношение моментов
	$R_{доб}$	$X_{доб}$	k_{II}	P_{IAD}	k_{MAB}	k_{MC}	$\frac{k_{MAB}}{k_{MC}}$
МТО12-6	3	—	1,73	4040	1,317	1,201	1,097
2,2 кВт,	4,58	—	1,58	3410	1,241	1,251	0,992
7,5 А	—	3,4	1,71	2180	1,1	0,413	2,663
	—	4,7	1,58	2690	0,944	0,378	2,497
МТИ11-6	3,76	—	1,595	4480	1,172	1,114	1,052
3,5 кВт,	6	—	1,381	3800	1,021	1,01	1,01
10,5 А	—	3,04	1,56	3360	0,887	0,373	2,377
	—	5,5	1,376	2850	0,712	0,316	2,253
АО-32-6	6,9	—	1,616	2020	0,970	0,906	1,07
2,2 кВт,	9,2	—	1,432	1780	0,879	0,879	1
5,4 А	—	4,2	1,8	1710	0,81	0,363	2,235
	—	5,7	1,607	1480	0,68	0,328	2,085
АО2-41-6	6,45	—	1,754	3250	1,192	1,186	1,005
3 кВт,	11,7	—	1,44	2620	0,934	1,062	0,88
7,2 А	—	3	1,979	2625	0,86	0,337	2,55
	—	5,25	1,72	2100	0,674	0,279	2,265
4А112М4-У3	7,04	—	1,402	4350	0,953	1,199	0,794
5,5 кВт,	8,55	—	1,233	3780	0,839	1,089	0,77
12 А	—	6,26	1,44	2550	0,487	0,224	2,179
	—	8,27	1,27	2070	0,395	0,185	2,134
АО2-51-1	7,4	—	1,29	4700	0,847	0,972	0,87
7,5 кВт,	8,25	—	1,175	4350	0,76	0,906	0,841
15 А	—	5,4	1,466	2700	0,354	0,142	2,485
	—	8,25	1,113	1925	0,298	0,127	2,34
АО2-52-4	4,3	—	1,36	6930	0,864	1,087	0,813
10 кВт,	6,1	—	1,15	5400	0,721	0,891	0,81
20 А	—	3,87	1,3	3000	0,367	0,149	2,463
	—	4,55	1,22	2775	0,329	0,141	2,33
АО2-32-2	14	—	1,237	2840	0,935	1,105	0,845
4 кВт,	15,7	—	1,15	2460	0,817	0,98	0,833
8 А	—	13,9	1,225	1200	0,344	0,177	0,944
	—	16	1,12	960	0,272	0,141	1,93
4А80В2-У3	11,5	—	1,808	2280	1,169	1,342	0,871
2,2 кВт,	14,9	—	1,537	1920	0,984	1,22	0,806
4,7 А	—	11,9	1,808	1480	0,676	0,34	1,988
	—	18,3	1,468	1040	0,478	0,25	1,911

$$k_{\Delta AB} \approx \frac{P_{1AB} - P_{\Delta AB}}{\frac{2}{3} \left(\frac{P_n}{\gamma_n} - P_{\Delta n} \right)}, \quad k_{MC} \approx \frac{P_{Z_{\Delta 06}} + P_{MC}}{\frac{1}{3} \left(\frac{P_n}{\gamma_n} - P_{\Delta n} \right)},$$

на основании экспериментальных данных измерений мощностей, токов и напряжений в режиме НЭТ. При испытании в режиме НЭТ кратности тока статора $k_1 = \frac{I_{\Delta AB} + I_C}{2I_n}$, $I_{\Delta AB} \approx I_C$, где I_n — номинальный ток статора.

Экспериментальные данные получены при номинальном напряжении 380 В на фазах АВ статора. Потери $P_{Z_{\Delta 06}}$ в добавочном сопротивлении $Z_{\Delta 06}$ определены ваттметром, т. е. в расчетах учтены потери активной мощности в сопротивлении катушек индуктивности. Температура обмоток 25—30°C.

Электромагнитный момент $M_{\Delta AB}$ («двигатель АВ») аналогичен электромагнитному моменту обычного однофазного режима трехфазного АД с механической нагрузкой на валу, когда к двум (А, В) фазам статора от сети приложено напряжение $U_{\Delta AB}$. Асинхронная машина «двигатель С» работает в режиме электромагнитного тормоза, так как направление электромагнитного момента M_{MC} противоположно направлению вращения ротора АД в режиме НЭТ.

Так как в режиме НЭТ одновременно действуют моменты $M_{\Delta AB}$ и M_{MC} , а ротор вращается со скольжением s , то зубцовая зона и обмотка статора подвергаются воздействию тангенциальных сил неизменного направления, в то время как зубцовая зона и обмотка ротора подвергаются воздействию знакопеременных тангенциальных сил.

В режиме НЭТ появляются пульсирующие моменты (среднее значение которых равно нулю), обусловленные влиянием обратного поля и высших гармоник, как и в обычном однофазном режиме трехфазного АД, причем, пульсирующие моменты увеличиваются с увеличением кратности тока k_1 в статоре и зависят от конструктивных особенностей АД.

Наличие пульсирующих моментов и знакопеременных сил в режиме НЭТ вызывает дополнительную вибрацию зубцов, что оказывает дополнительное механическое действие на проводники и изоляцию обмоток. Поэтому в режиме НЭТ условия испытания на нагрев АД более жесткие по сравнению с испытанием на нагрев механической нагрузкой, что способствует выявлению скрытых дефектов в обмотках АД.

В ы в о д ы

1. Трехфазный АД в режиме несимметричного электромагнитного тормоза, при вращающемся роторе без механической нагрузки на валу, развивает противоположные по знаку средние электромагнитные моменты $M_{\Delta AB}$ и M_{MC} .

2. В этом режиме можно, выбрав соответствующее добавочное активное сопротивление $R_{доб}$ в цепи фазы статора, получить режим испытания, при котором среднее значение электромагнитного момента, развиваемого каждой обмоткой фазы в несимметричном режиме, по абсолютной величине близко к электромагнитному моменту, развиваемому обмоткой фазы при трехфазном номинальном режиме.

3. С точки зрения электромагнитного момента, форсированное испытание на нагрев АД в режиме несимметричного электромагнитного тормоза целесообразно производить при $R_{доб}$ током статора, превышающим номинальный в $1,2 \div 1,5$ раза. При этом выдержка времени испытания (порядка 2—10 мин) определяется по методике, приведенной в [2, 3].

ПО «Арм.электромаш»

Поступило 17.X.1979

4. ՀԱՅՐԱԿԱՆ

ՆՌԱՅԱՋ ԱՍԻՄԵՏՐԻԿ ՇԱՐՔԻՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՄՈՐԵՆՆՏԸ ԱՆՀԱՄԱՋԱՓ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱՐԴԵԼԱԿՐԱՆ ՌԵՅԻՄՈՒՄ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Ցույց է տրված, որ եռափազ ասինխրոն շարժիչի փորձարկումը անհամաչափ էլեկտրամագնիսական արգելական ռեժիմում, երբ շարժիչը պարալլելացրում թողարկելուց հետո ստատորի մի ֆազը անջատվում է ցանցից և փակվում յրաջուցիչ դիմադրությամբ, որի մի ծայրը նախապես միացված է ստատորի դրոշական կետում, առանց լիսեռի միաանիկական բեռնավորման, հնարավորություն է տալիս նմանեցնել միաանիկական բեռնավորումով փորձարկմանը՝ ֆազերի միջոցով զարգացվող էլեկտրամագնիսական մոմենտի բացարձակ մեծությամբ: Հայտնաբերվել են փորձարկման մի քանի առանձնահատկություններ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Социкян К. О. Сравнительный анализ испытания на нагрев трехфазного асинхронного двигателя непосредственной нагрузкой и в режиме несимметричного электромагнитного тормоза. «Изв. вузов. Электромеханика», 1977, № 3, с. 271—274.
2. Социкян К. О., Оганян Р. В. Способ испытания на нагрев асинхронных двигателей. Автор. св. СССР. Бюлл. № 629605, 1978, № 39, с. 175.
3. Оганян Р. В., Социкян К. О. Метод ускоренного определения перегрева обмоток трехфазных асинхронных двигателей. «Изв. вузов. Электромеханика», 1975, № 1, с. 31—36.
4. Оганян Р. В., Социкян К. О. Увеличение токов статора и ротора трехфазного асинхронного двигателя в режиме несимметричного электромагнитного тормоза. «Изв. вузов. Электромеханика», 1974, № 7, с. 743—746.
5. Оганян Р. В., Социкян К. О. Мелония равенства токов и фазов статора трехфазного асинхронного двигателя в режиме несимметричного электромагнитного тормоза. «Изв. вузов. Электромеханика», 1974, № 9, с. 977—983.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

К. А. ГАМБУРЯН, Г. О. МКРТЧЯՆ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ
НА КОРОНУ

Большой опыт эксплуатации длинных линий электропередач (ЛЭП) переменного тока напряжением 500 кВ дает предпосылки строительства ЛЭП напряжением 750 и 1150 кВ. Эффективность увеличения номинального напряжения ЛЭП общеизвестна. Известно также, что с увеличением напряжения ЛЭП увеличиваются потери на корону. Поэтому при исследованиях режимов энергосистем, содержащих ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения, необходимо учитывать потери мощности на корону.

Потери на корону являются функцией многих параметров: диаметра r_0 и количества проводов n в расщепленной фазе, шага расщепления a , состояния поверхности проводов m , расстояния между фазами D , высоты подвеса проводов ЛЭП H (эти параметры условно будем называть конструктивными), рабочего напряжения U и метеорологических условий на трассе линии. Таким образом, при заданных конструктивных параметрах линии потери мощности на корону принимаются зависящими от приложенного напряжения и метеорологических условий на трассе.

Для определения потерь мощности на корону в [1] приведены обобщенные характеристики для 4-х погодных условий: 1 — хорошая погода; 2 — сухой снег; 3 — дождь; 4 — изморозь.

Обобщенные характеристики построены в зависимости от отношения напряженности электрического поля поверхности проводов E_0 и начальной напряженности короны E_* . Отношение E_0/E_* является основным из параметров, определяющих потери на корону. При заданных конструктивных параметрах напряженность электрического поля E_0 пропорциональна напряжению U линии. Начальная напряженность E_* , в основном, зависит от относительной плотности воздуха δ .

Непосредственное использование обобщенных характеристик в программе расчета установившегося режима представляется нецелесообразным из-за необходимости пересчета по ним значений потерь на корону в зависимости от полученных в данном шаге итерации значения напряжения в узле. В отличие от такого подхода предлагается забла-

современное определение зависимости потерь мощности на корону от напряжения $P_{\text{кор}}(U)$ и представление ее в виде стандартной статической характеристики нагрузки, используемой в программе установившегося режима. При этом никаких изменений в последней вводить не приходится.

В АрмНИИЭ разработана программа расчета потерь мощности на корону на языке «Фортран-4» по предлагаемому методу.

В основу этой программы заложено применение обобщенных характеристик $\Theta(\Theta)$, аппроксимируемых многочленами. Расчеты показали, что для получения необходимой точности в зависимости от погодных условий указанные многочлены должны быть различной степени: второй или третьей. Например, для «хорошей» погоды — второй степени, для погоды «изморозь» — третьей. Поэтому с целью унификации многочлена $\Theta(\Theta)$ он принят третьего порядка и имеет вид:

$$\Theta(\Theta) = \sum_{k=0}^3 \beta_k \cdot \Theta^k. \quad (1)$$

Коэффициенты многочлена β_k определены методом наименьших квадратов [2] и приведены в табл. 1 для 4-х погодных условий. Определение Θ по указанной выше формуле удовлетворяет требуемой точности при изменении Θ в пределах от 0,6 до 1.

Таблица 1

<i>i</i>	Погода	β_{0i}	β_{1i}	β_{2i}	β_{3i}
1	Хорошая погода	- 5,197	25,059	-40,092	21,514
2	Сухой снег	11,76	58,252	-96,084	53,425
3	Дождь	5,184	-18,225	12,948	6,7
4	Изморозь	6,292	-22,281	10,109	22,416

В виде формулы представлены также коэффициенты функции $\chi(\bar{I})$, учитывающие среднегодовую интенсивность дождя $\bar{I}$, поскольку обобщенные характеристики для этой погоды построены с учетом интенсивности дождя, равной $\bar{I} = 1$ мм/ч. Формула функции $\chi(\bar{I})$ имеет следующий вид:

$$\chi(\bar{I}) = 0,483 + 0,363 \cdot \bar{I} - 0,244 \cdot \bar{I}^2 + 0,93 \bar{I}^3. \quad (2)$$

Зависимости потерь мощности на корону от напряжения в программе реализуются в следующей последовательности путем использования ряда формул, приведенных в [1]. При заданных конструктивных параметрах вычисляются:

- а) радиус расщепления проводов r_p ;
- б) эквивалентный радиус провода r_e ;
- в) емкости средней c_e и крайней c_k фаз;

г) начальная напряженность электрического поля $E_{\alpha}(\delta_i)$ в общем случае для 4-х значений относительной плотности воздуха δ_i , соответствующая каждому из 4-х погодных условий ($i = 1, 2, 3, 4$);

д) эквивалентная напряженность поля на поверхностях крайних $E_{\Sigma 1}$ и среднего $E_{\Sigma 2}$ проводов при заданных значениях напряжения U , т. е. $E_{\Sigma 1}(U)$ и $E_{\Sigma 2}(U)$;

е) $\Theta_{ij} = \sum_{k=0}^3 \xi_{ki} \cdot \mathcal{E}_{ji}^*$ при известном отношении $\mathcal{E}_{ji}$, $i = 1, 2$; $j = 1, 2, 3, 4$;

ж) потери мощности на корону

$$P_i = n \cdot r_0^2 \cdot (2 \cdot \Theta_{i1} + \Theta_{i2}) \cdot \gamma(I_i) \text{ квт/км},$$

причем, для погодных условий $i = 1, 2, 4$ среднегодовая интенсивность $\bar{I}_i$ принимается равной единице ($x(\bar{I}_{i-1}) = 1$), а для дождливой погоды ($i=3$) значение $x(\bar{I}_3)$ вычисляется по формуле (2) при заданной интенсивности $\bar{I}_3$.

В указанной последовательности определяются потери мощности на корону при заданном значении напряжения. Задавая несколько различных значений для напряжения и выполняя расчеты по пунктам д) ÷ ж), определяется зависимость P_i от U . Зависимость $P_i = (U)$ представляется формулой — многочленом второго порядка

$$P_i(U) = a_{0i} + a_{1i} \cdot U + a_{2i} \cdot U^2. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов многочлена a_{0i} , a_{1i} , a_{2i} при различных погодных условиях применен метод наименьших квадратов.

Целесообразно коэффициенты многочлена (3) представить в относительных единицах, имея в виду возможность учета в расчете режимов энергосистем нагрузки по их статическим характеристикам, в виде

$$P_i(U) = P_{ном, i} \cdot \left[a_{0i} + a_{1i} \frac{U}{U_{ном, i}} + a_{2i} \left(\frac{U}{U_{ном, i}} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

При этом коэффициенты a_{0i} , a_{1i} и a_{2i} определяются с помощью a_{0i} , a_{1i} и a_{2i} по формулам:

$$a_{0i} = a_{0i} / P_{ном, i}; \quad a_{1i} = a_{1i} \cdot U_{ном, i} / P_{ном, i} \quad \text{и} \quad a_{2i} = a_{2i} \cdot U_{ном, i}^2 / P_{ном, i},$$

где $P_{ном, i}$ — значение потерь активной мощности на корону при напряжении, равном номинальному $U_{ном}$ для i -ого погодного условия.

Пример. Определить характеристики потерь мощности на корону $P_i(U)$ при различных погодных условиях для ЛЭП с проводами 8ХАСО—300, с номинальным напряжением 1150 кВ. Ориентировочный район работы ЛЭП—Средняя Сибирь. При этом заданными являются: $r_0 = 1.175$ см; $n = 8$; $a = 40$ см; $\bar{D} = 27$ м; $H = 20$ м. Принимается $m = 0.82$; напряжение линии меняется в пределах 1000 ÷ 1300 кВ с интервалом 25 кВ.

При выборе значения относительной плотности воздуха предполагалось, что зимой могут быть следующие погодные условия: изморозь, сухой снег и хорошая погода; а летом — дождь и хорошая погода. В расчетах режимов энергосистем, с учетом потерь на корону, принято минимальное значение δ_r для каждого из погодных условий. Для рассматриваемого района принято, что зимой $\delta_{\min} = 0,98$, а летом — 0,92 [3].

Таблица 2

1	П о г о д а	$\delta_{\min}$	$P_{\text{к.в}}$ [кВт, к.в]	$\gamma_{\text{д}}$	$\gamma_{\text{л}}$	$\gamma_{\text{д}}$
1	Хорошая	0,92	17,6	18,3	-42,9	25,6
2	Сухой снег	0,96	34,6	18,9	-44,2	26,3
3	Дождь	0,92	122	2,54	-7,79	6,25
4	Изморози	0,98	267	2,44	-7,32	5,86

В табл. 2 приведены характеристики, полученные по формуле (4), которые использованы при исследовании установившегося и предельных режимов электрической системы, содержащей ЛЭП 1150 кВ, длиной 1200 км. При этом линии электропередачи замещены рядом эквивалентных цепочек по П-образной схеме замещения, на концах которых подключаются потери мощности на корону в виде эквивалентных нагрузок.

АрмНИИЭ

Поступило 14.11.1979

Կ. Հ. ՊԱՐՄԻՐՅԱՆ, Վ. Հ. ՍԿՏՅՅԱՆ

ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՊԱՌԱՄԱՆՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՐԵԿՏՈՒՄՆԵՐԻ ԲԵՌԻՔԱԿՐՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ու ղ լ ի ո լ ի ո ղ

Բարձր ու գերբարձր լարման էլեկտրահաղորդման գծեր ունեցող էներգահամակարգերում ուժիմների հաշվարկների կատարելիս անհրաժեշտ է հաշվի առնել հոսանքի պահպանման կորուստները: Վերջիններս տրված են բեղմանաչափով բնութագրելով՝ չորս պայմանական հղանակների համար, որոնց անմիջապես օգտագործելը համակարգերի ուժիմների հաշվարկներում կապված է որոշ զգալիությունների հետ: Հոդվածում առաջարկվում է նախապես որոշել հոսանքի պահպանման կորուստները, կախված էլեկտրահաղորդման գծի լարումից ու այդ ներկայացնել վերլուծական տեսքով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330—750 кВ и постоянного тока 800—1500 кВ. М., СЦНТИ, 1975.
2. Демидович Б. П., Марон Н. А., Шувалова Э. Э. Численные методы анализа. М., «Наука», 1967.
3. Тискава Ю. И., Мельзак Н. Я. О статистико-вероятностной оценке атмосферного давления и относительной плотности воздуха, «Электричество», 1972, № 10, с. 16—20.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Л. А. ГРИГОРЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫПУСКАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

Основным критерием, указывающим на степень соответствия параметров выпускаемого изделия данному уровню технологии его производства, является процент выхода годной продукции β , который можно представить выражением

$$\beta = f(\bar{X}; \bar{Y}) + \delta, \quad (1)$$

где $\bar{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ — контролируемые технологические факторы; $\bar{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}$ — контролируемые параметры выпускаемого изделия, определяющие его качество; δ — остаточная случайная компонента, учитывающая влияние неконтролирующих технологических факторов.

Важность задачи повышения β очевидна, т. к. это приводит к уменьшению трудоемкости, снижению себестоимости и повышению объема выпускаемой продукции.

При заданных параметрах $\bar{Y}$, путем вариации $\bar{X}$ факторов или улучшения отдельных технологических процессов весь технологический процесс оптимизируется таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение β . После решения указанной задачи представляет интерес выявить предельные возможности данного производства и путем вариации параметров $\bar{Y}$ обеспечить дальнейшее повышение β .

Важным фактором является также стабильная и устойчивая работа производства, когда в течение длительного периода из-за флуктуации в технологии отклонение β остается ниже допустимого предела, без резких скачков и колебаний.

В настоящей статье предлагается методика поиска оптимальных параметров изделий $\bar{Y}$ с точки зрения обеспечения максимального процента выхода годной продукции β и методика оценки степени стабильной работы данного производства.

Для решения поставленной задачи, предлагается параметры Y разбить на три группы.

1. К группе $\bar{Y}_A$ относятся p параметры, незначительно влияющие на β .

2. К группе $\bar{Y}_B$ относятся l параметры, у которых функции

$$\beta = f(Y_{Bj}) \quad (2)$$

($\bar{X} = \text{const}$, $\bar{Y}_A = \text{const}$, $\bar{Y}_B = \text{const}$, $j = 1, 2, \dots, l$) имеют экстремальный характер.

3. К группе $\bar{Y}_H$ относятся q параметры, у которых функции

$$\beta = f(y_{Hj}) \quad (3)$$

($\bar{X} = \text{const}$, $\bar{Y}_A = \text{const}$, $\bar{Y}_B = \text{const}$, $j = 1, 2, \dots, q$) не имеют экстремума и изменение носит односторонний характер (рис. 1).

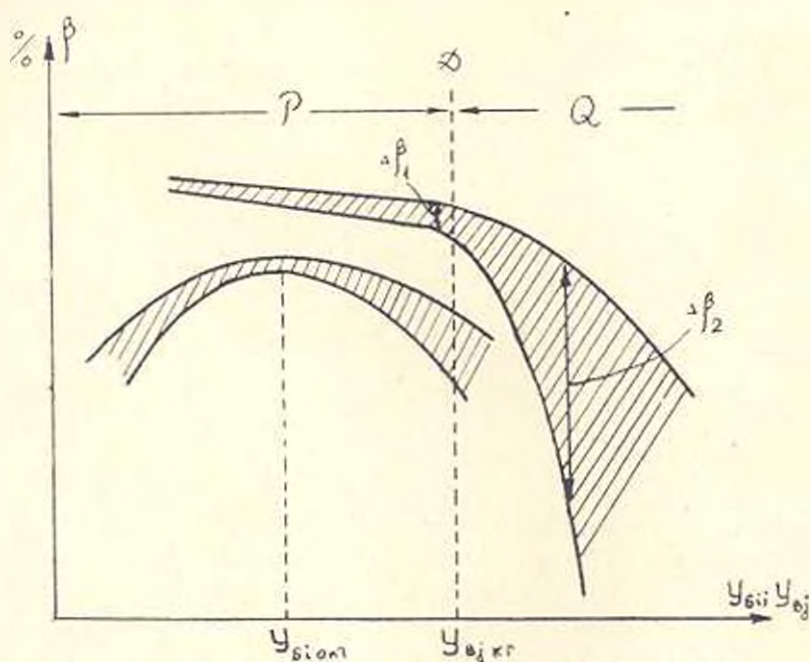


Рис. 1.

Пользуясь методикой, изложенной в [1], можно производить выбор экстремальных значений параметров Y_{Bj} , обеспечивающих максимальное значение β и удовлетворяющих техническим требованиям к данному изделию.

В качестве примера можно привести поиск экстремальных значений номинальных токов управления ($I_{pн}$, $I_{rн}$) для запоминающего элемента на цилиндрических магнитных пленках, исходя из обеспечения максимального процента выхода годной продукции [3].

Как показали исследования в области радиоэлектронной промышленности, функция (3) имеет явно выраженный нелинейный характер с двумя основными участками: начальным P и насыщенным Q . Функцию (3) можно представить определенной зоной, ограниченной двумя кривыми (рис. 1).

Очевидно, что при работе в области P с заданными параметрами $Y_{вн}$ технологические флуктуации приводят к небольшим $\Delta\beta$, а в области Q к резким колебаниям процента выхода годной продукции $\Delta\beta$, т. е. можно констатировать, что область P является зоной устойчивой, Q — неустойчивой работы производства.

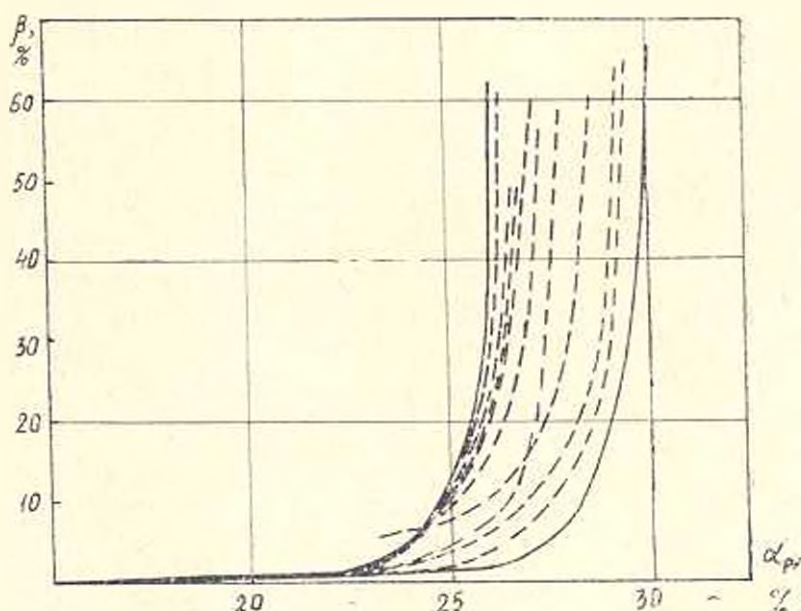


Рис. 2.

В качестве примера на рис. 2 приведены характеристики для группы запоминающих матриц на цилиндрических магнитных пленках;

$$\gamma = f(\alpha_p),$$

где $\gamma = (1 - \beta)$ — процент бракованных разрядов; $I_p = \frac{I_p - I_{pн}}{I_{pн}} \cdot 100$ —

отклонение разрядного тока I_p от номинального значения $I_{pн}$ в неблагоприятных направлениях [4].

Очевидно, что для обеспечения стабильной работы производства необходимо, чтобы конец вектора номинальных параметров изделий $\bar{Y}_{вн}$ был расположен в области P и чем дальше конец вектора от D -границы, тем больше будет запас стабильной работы производства.

Для оценки запаса стабильной работы производства вводится коэффициент

$$\eta = \frac{Y_{BK}}{Y_{BH}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_{Bki}^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_{BHi}^2}}, \quad (4)$$

где Y_{BH} , Y_{BK} — модули вектора номинальных параметров изделий и вектора, который по фазе совпадает с Y_{BH} , а его конец расположен на D -границе.

Уравнение D -границы можно определить с помощью уравнений регрессии (3) для участков P и Q , полученных методом планирования эксперимента [1]

$$\hat{\beta}_P = f(y_i), \quad (5)$$

$$\hat{\beta}_Q = f(y_i). \quad (6)$$

Пересечение гиперповерхностей (5) и (6) при условии $\hat{\beta}_P = \hat{\beta}_Q$ даст уравнение D -границы

$$f_D(y_i) = 0. \quad (7)$$

В качестве примера рассмотрим случай линейной аппроксимации (5) и (6) вида

$$\hat{\beta}_P = -b_0 + b_1 y_{H1} + \dots + b_q y_{Hq}, \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_Q = -b_0 + b_1 y_{H1} + \dots + b_q y_{Hq}. \quad (9)$$

Решая совместно (8) и (9), получим:

$$b_1 y_{H1} + \dots + b_q y_{Hq} = b_0. \quad (10)$$

С другой стороны, уравнение прямой линии, совпадающей с вектором $\bar{Y}_{BH}$, имеет вид:

$$y_{H(i+1)} = x_{i(i+1)} y_{Hi}, \quad (11)$$

где $x_{i(i+1)} = \frac{y_{H(i+1)}}{y_{Hi}}$, $i = 1, 2, \dots, (q-1)$.

Решая совместно (10) и (11), получим значение координат точки их пересечения:

$$y_{Bki} = \frac{b_0}{\sum_{j=1}^q x_{ij} b_j}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (4), получим:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^q \left(\frac{b_i}{\sum_{j=1}^q x_{ij} b_j} \right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q y_{\text{нн}}^2}} \quad (13)$$

Если $\gamma \leq 1$, то это является признаком неустойчивой работы производства с большими разбросами процента годной продукции β . Для обеспечения стабильной работы производства необходимо, чтобы ориентировочно $\gamma = (1,2 \div 1,5)$. Чрезмерно большие запасы по стабильности производства нежелательны, т. к. со временем технология производства будет адаптироваться к этим условиям, и γ снова приблизится к единице.

Для повышения степени точности определения коэффициента γ можно воспользоваться нелинейными уравнениями регрессии функции (3) [1].

По предлагаемой методике можно определить оптимальные значения параметров изделий, обеспечивающих стабильную работу производства с максимально возможным процентом выхода годной продукции. Методика позволяет также оценить коэффициент запаса стабильной работы производства.

В качестве примера, для матрицы на цилиндрических магнитных пленках типа МН-3, по предлагаемой методике получено следующее уравнение D -границы:

$$19,3U_{\text{сн}} + 10,4x_p + 8,85x_r = 606,8, \quad (14)$$

где $U_{\text{сн}}$ — номинальное значение считанного сигнала; x_p, x_r — отклонения токов управления $I_{\text{рн}}, I_{\text{гн}}$ в наиболее неблагоприятный момент [4].

Подставляя значение коэффициентов уравнения (14) и параметров $U_{\text{сн}} = 7 \text{ мВ}$, $x_p = 26\%$ и $x_r = 15\%$ в (11) и (13) получим $\gamma = 1,14$.

ЕрПМ им. К. Маркса

Поступило 15.1.1980

Լ. Ա. ԿՐԻՎՈՐԱՆ

ՏՆԽԵՆՈՎՈՒԹՅԱՆ ՊՐՈԳՆՈՒ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՄԱՆՅԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ
ԵՎ ԽՈՂԱՐԿՎՈՂ ԱՐՏԱԿՐԱՆՔԻ ՈՐՏՈՐԱԿ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու ռ

Արտագրվող սարքի Y պարամետրերի համապատասխանման առտիճանք տվյալ տեխնոլոգիական պրոցեսի մակարդակին բերողվում է պիտանի արտադրանքի β տոկոսով: Առաջարկվում է արտագրվող սարքի օպտիմալ պարամետրերի և նրա տեխնոլոգիական պրոցեսի կայունության առտիճանի որոշման մեթոդիկա, ստացործելով $\alpha = f(Y)$ ֆունկցիայի ռեգրեսիայի հավասարումը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Наишнов В. П., Чернова Н. А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
2. *Гладкий О. Н., Обычкин Ю. Г., Блохин В. Г.* Статистические методы в технологии производства радиоэлектронной аппаратуры. М., «Энергия», 1977.
3. *Григорян Л. А., Степанян М. З., Нагапетян А. А.* Методика выбора оптимального режима запоминающего элемента на цилиндрических пленках и условия их отбраковки. «Вопросы радиоэлектроники», сер. ЭВТ, вып. IX, 1972.
4. *Григорян Л. А.* Запоминающие устройства на цилиндрических магнитных пленках. М., «Энергия», 1975.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

С. С. ЗАХАРЬЯН

МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Из всего многообразия методов исследования сложных систем можно выделить следующие:

- а) методы агрегирования и факторизации [1, 2];
- б) методы декомпозиции [3];
- в) методы нерархических систем [4, 5].

Несмотря на различие в подходах к постановке задач, методах и получаемых результатах, общим для вышеуказанных трех групп является следующее: над исходной сложной системой осуществляется некоторое преобразование, которое приводит исходную систему к новому виду — новым переменным, либо новой структуре, следовательно, и двух- или трехуровневой нерархической структуре решения сложной проблемы. Задачи анализа, синтеза и оптимизации значительно упрощаются для каждого уровня, хотя к ним добавляется вычислительная процедура взаимосвязи между уровнями или межуровневой координации.

Именно эти признаки и положены в основу предлагаемого в настоящей работе подхода, названного методом уплотнения переменных.

Назовем процессом P преобразование переменных X^{i-1} в переменные X^i , причем, они представлены в виде векторов-столбцов размерности $n \times 1$.

Если каждому $X^{i-1} \in R^{i-1}$ соответствует единственное значение $X^i \in R^i$, то процесс P представляет собой точечное отображение множества R^{i-1} в R^i и может быть обозначен в виде:

$$P: R^{i-1} \rightarrow R^i. \quad (1)$$

Процессы могут быть обратимыми и необратимыми. Для обратимых процессов наряду с прямым отображением (1) существует обратное отображение X^i в X^{i-1} , которое можно записать в виде:

$$P^{-1}: R^i \rightarrow R^{i-1}. \quad (2)$$

Два или несколько процессов можно объединить в систему. Предположим имеем 2 процесса:

$$P_1: R_1^{i-1} \rightarrow R_1^i; \quad P_2: R_2^{i-1} \rightarrow R_2^i. \quad (3)$$

Объединением этих процессов или системой будет некоторый новый процесс P , вход и выход которого представляет декартово произведение множеств R_1 и R_2 . Новая система запишется в виде:

$$P: R^{i-1} \rightarrow R^i, \quad (4)$$

причем,

$$R^{i-1} = R_1^{i-1} \times R_2^{i-1}, \quad R^i = R_1^i \times R_2^i. \quad (5)$$

Можно вывести зависимости различных типов объединений — последовательных, параллельных и иерархических. Нас интересует объединение, при котором вход и выход системы являются скалярными произведениями соответственных входов и выходов процессов:

$$y^{i-1} = (\bar{X}_1^{i-1})^T \cdot \bar{X}_2^{i-1}, \quad y^i = (\bar{X}_1^i)^T \cdot \bar{X}_2^i, \quad (6)$$

где T — значок транспонирования;

$$y^{i-1} \in Y^{i-1}; \quad (\bar{X}_1^{i-1})^T \in R_1^{i-1}; \quad y^i \in Y^i; \quad (\bar{X}_2^i)^T \in R_2^{i-1}. \quad (7)$$

Система, полученная путем такого объединения, запишется в виде:

$$(P_1 \cdot P_2): Y^{i-1} \rightarrow Y^i. \quad (8)$$

Теперь обратимся вновь к процессу (1) и введем в рассмотрение совместно с ним некоторый обратимый процесс P_w , осуществляющий преобразование некоторого входного вектора $\bar{W}^{i-1}$ в выходной $\bar{W}^i$. Переменные этого процесса независимы от основных переменных $\bar{X}^{i-1}$ и $\bar{X}^i$ представлены в виде векторов-строк размерности $1 \times n$. Процесс P_w назовем уплотняющим и запишем в виде:

$$P_w: \bar{W}^{i-1} \rightarrow \bar{W}^i. \quad (9)$$

Направление протекания процесса (1) примем в качестве основного, тогда направление протекания уплотняющего процесса будет противоположным (обратным), как показано на рис. 1.

1. *Теорема.* Если объединить основной и уплотняющий процессы в систему вида (8) и в качестве уплотняющего процесса использовать основной процесс, т. е.

$$P_w = P, \quad (10)$$

то переменные y^{i-1} и y^i будут равны между собой для любых значений входных переменных системы $\bar{X}^{i-1}$ и $\bar{X}^i$:

$$y^{i-1} = y^i, \quad (11)$$

где

$$y^i = \bar{W}^i \cdot \bar{X}^i; \quad y^{i-1} = \bar{W}^{i-1} \cdot \bar{X}^{i-1}, \quad (12)$$

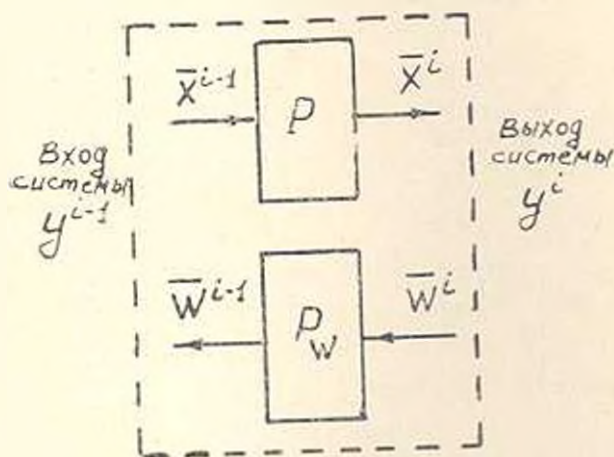


Рис. 1. Уплотнение основного процесса.

Таким образом, на входе и выходе системы имеет место баланс уплотненных переменных y^{i-1} и y^i . Векторы $\bar{W}^i$ и $\bar{W}^{i-1}$ названы уплотняющими.

Если основной процесс (1) является линейным

$$\bar{X}^{i-1} = A \bar{X}^{i-1}, \quad (13)$$

где A — неособенная матрица размерности $n \times n$ с элементами a_{jk} ($\det A \neq 0$), то согласно (9) уплотняющий процесс имеет вид:

$$\bar{W}^{i-1} = \bar{W}^i \cdot A. \quad (14)$$

Применение теоремы уплотнения позволяет существенно сократить размерность ряда задач исследования сложных систем.

Рассмотрим определение уплотняющих функций на примере многосвязной системы автоматического регулирования (МСАР), состоящей из последовательного соединения N звеньев, каждое из которых описывается зависимостью

$$\bar{X}^i(p) = A^i(p) \bar{X}^{i-1}(p), \quad (15)$$

где p — оператор Лапласа.

Уравнение такой системы, показанной на рис. 2, имеет вид:

$$\bar{X}^N(p) = A(p) \bar{X}^0(p), \quad (16)$$

где

$$A(p) = A^{(N)}(p) \cdot A^{(N-1)}(p) \dots A^1(p). \quad (17)$$

Выражение (14) в этом случае представляет собой систему рекуррентных формул

$$W_k^{i-1}(p) = \sum_{j=1}^n a'_{jk}(p) W_j^i(p), \quad (18)$$

по которым, задаваясь произвольно n значениями величин $W_j^i(p)$ для последнего $i=N$ звена, не все из которых могут равняться нулю, можно однозначно вычислить все остальные nN значения уплотняющих функций.

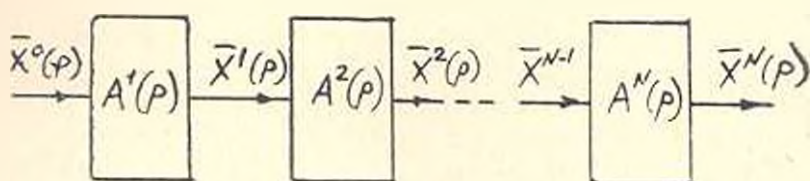


Рис. 2. Блок-схема МАСР.

Выбор уплотняющих функций для последнего N -го звена в каждом конкретном случае может быть обусловлен требованиями задачи. В частности, при анализе МАСР технологических процессов бывают известны передаточные матрицы звеньев $A^{(i)}(p)$, но требуется вычислить не полную матрицу (17), а лишь одну ее строку, соответствующую зависимости одного из выходов системы $x_k^N(p)$ от всех входов x_s ($k = \overline{1, n}$). В этом случае удобно зазвать для последнего N -го звена значения:

$$W_k^N = 1 \quad \text{при } k = s \quad \text{и} \quad W_k^N = 0 \quad \text{при } k \neq s \quad (19)$$

и далее вычислить уплотняющие функции по (18) для всех звеньев. Уплотняющие функции $W_k^0(p)$ и будут искомыми передаточными функциями для данного выхода x_k^N :

$$x_k^N(p) = \sum_{s=1}^n W_k^0(p) x_s^0(p). \quad (20)$$

Если через v обозначить отношение требуемого объема вычислений при перемножении матриц к объему вычислительной процедуры метода уплотнения, то, как видно из графика рис. 3, метод уплотнения эффективен для $n > 2$ и выигрыш от сокращения вычислений увеличивается при больших n и N .

Применение уплотнения к системе, показанной на рис. 2, приводит к структурной схеме рис. 4, где звено, осуществляющее операцию скалярного умножения, обозначено значком χ . Исследование этой схемы показывает, что если ко входу уплотняющей системы приложить сигнал

$\bar{W}^N$ со значениями (19), то последующие сигналы $\bar{W}^{N-1}$, $\bar{W}^{N-2}$, $\bar{W}^0$ будут равны, соответственно, s -ой строке матриц и их произведений $A^{(N)}$, $A^{(N)}$, $A^{(N-1)}$, ..., $A^{(N)}$, $A^{(N-1)}$, ..., $A^{(0)}$. Если же принять, что совместно с этим сигналом ко входу основного процесса приложен сигнал $Z^0 = X^0$, проекции которого равны

$$Z^0_k = 1 \text{ при } k = j \text{ и } Z^0_k = 0 \text{ при } k \neq j, \quad (21)$$

то остальные сигналы

$$\bar{Z}^i = A^{(i)} \bar{Z}^{i-1} \quad (i = \overline{1, N}) \quad (22)$$

представляют собой столбцы матриц и произведений матриц $A^{(1)}$, $A^{(1)}$, $A^{(2)}$, ..., $A^{(1)}$, $A^{(2)}$, ..., $A^{(N)}$. Нетрудно показать, что в этом случае уплотненные сигналы (скаляры) y^0 , y^1 , ..., y^N равны элементам j -й соответствующих произведений матриц. Следовательно, метод уплотнения согласно схеме рис. 4 позволяет вывести правила для вычисления отдельной строки, столбца или отдельного элемента произведений матриц.

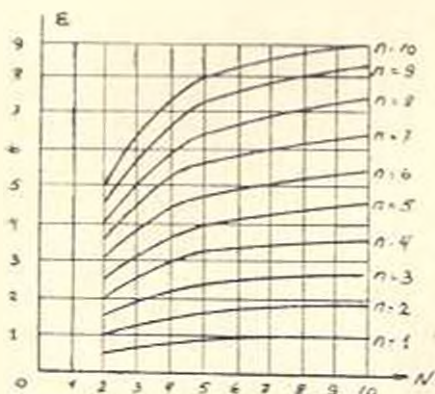


Рис. 3. Степень сокращения вычислений в зависимости от размерности задачи.

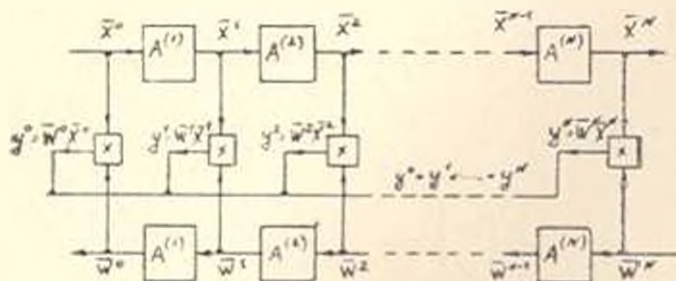


Рис. 4. Структурная схема уплотненной системы.

Вернемся к рассмотрению системы, описываемой выражениями (15) — (17).

Приведем каждое звено к уплотненному виду с помощью (18). Тогда, согласно (11) и (12), можно записать:

$$y^i(p) = \sum_{k=1}^n W_k^i(p) x_k^i(p); \quad (23)$$

$$y^i(p) = \sum_{k=1}^n W_k^{i-1}(p) x_k^{i-1}(p). \quad (24)$$

Условимся в качестве $W_k^i(p)$ задавать передаточные функции, соответствующие устойчивому звену.

2. *Теорема.* Если исходная система (15) устойчива, то уплотняющая система, описываемая (24), будет также устойчивой и наоборот.

Таким образом, для анализа устойчивости МСАР вместо исходной системы (15) можно исследовать устойчивость системы (24), полученную путем уплотнения.

Пример. Пусть $n=2$, $N=4$ и передаточные матрицы звеньев имеют вид:

$$\begin{aligned} A^{(1)}(p) &= \begin{vmatrix} \frac{1-T_2 p}{1+T_1 p} & \frac{1-T_2 p}{1+T_4 p} \\ \frac{T_3 p(1-T_2 p)}{1+T_1 p} & \frac{2T_3 p(1-T_2 p)}{1+T_4 p} \end{vmatrix}; \\ A^{(2)}(p) &= \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{(1+T_3 p)(1+T_2 p)}{1-T_2 p} & \frac{1}{T_3 p-1} \end{vmatrix}; \\ A^{(3)}(p) &= \begin{vmatrix} 1+T_4 p & 1+T_4 p \\ \frac{1+T_3 p}{1-T_2 p} & 1 \end{vmatrix}; \\ A^{(4)}(p) &= \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{1+T_4 p} & \frac{1}{1+T_3 p} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (25)$$

Задаем $W^{(n)}(p) = [1; 1]$. По (20) вычисляем остальные уплотняющие функции

$$\bar{W}^{(3)}(p) = \begin{bmatrix} \frac{2+T_4 p}{1+T_4 p}; & \frac{2+T_3 p}{1+T_2 p} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\bar{W}^{(2)}(p) = \begin{bmatrix} \frac{4+(T_3+T_4-2T_2)p-T_3T_4p^2}{1-T_2p}; & \frac{4+(3T_3+T_4)p+T_3T_4p^2}{1+T_3p} \end{bmatrix} \quad (27)$$

и т. д., вплоть до $i=1$,

$$W_1^{(0)}(p) = \frac{K_1(p)}{1 + (T_1 + T_2)p + T_1 T_2 p^2} \quad (28)$$

$$W_2^{(0)}(p) = \frac{K_2(p)}{1 + (T_3 + T_4)p + T_3 T_4 p^2}$$

Согласно (24), уравнение уплотненной системы имеет вид:

$$y^0 = y^1 = W_1^{(0)}(p) x_1^0(p) + W_2^{(0)}(p) x_2^0(p). \quad (29)$$

Из (28) и (29) следует, что эта система имеет корни в левой полуплоскости:

$$p_1 = -\frac{1}{T_1}; \quad p_2 = p_3 = -\frac{1}{T_2}; \quad p_4 = -\frac{1}{T_1} \quad (30)$$

и, следовательно, устойчива. Значит, по вышеприведенной теореме, будет устойчивая и исходная система (16). Тот же результат можно получить, используя обычный метод исследования устойчивости, т. е. перемножить матрицы (25) и решить полученное характеристическое уравнение системы.

Сравнение обоих способов исследования устойчивости показывает, что применение метода уплотнения примерно в n раз сокращает вычислительную процедуру. Для систем большой размерности это приводит к значительному выигрышу в вычислительной процедуре и сокращению требований к объему памяти ЦВМ. Кроме того, применение метода уплотнения и двухуровневой процедуры позволяет провести распараллеливание алгоритмов, что также в несколько раз снижает время вычислений при использовании децентрализованного или распределенного вычислительного комплекса.

Приложение метода уплотнения для исследования системы управления промышленным реактором приведено в [6].

ЕрIIIH HМ. К. Маркса

Поступило 20.VII.1979

II. II. ՀԱՅԱՐԱՆ

ՉԱՓՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԿՐՃԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴ ԱՆՏՈՄԱՏ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ
ԲԱԶՄԱԿԱՊ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Ա. Մ. Վ. և Վ. Ն. Վ.

Բերվում է բարդ համակարգի փոփոխականների խտացման մեթոդ, որը
թույլ է տալիս համակարգի հետապոտումը ներկայացնել հրկմակարդականի
պրոցեսի տեսքով: Ընդ որում կրճատվում է յուրաքանչյուր մակարդակի վրա
յուեվող խնդիրների չափողականությունը, ուստի և ընդհանուր խնդրի հաշվ-
ման ծախսը ու ժամանակը:

Մեթոդը կիրառվում է երկու դեպքերում՝ համակարգերի փոխանցման ֆունկցիաների որոշման և նրանց կայունության հետադոսման համար: Ցույց է տրված, որ խտացման մեթոդը զգալիորեն փոքրացնում է հաշվողական աշխատանքների ծավալը այնքան շատ, որքան մեծ է խնդրի շահողականությունը:

Հաշվողական բնագծի ցուցադրման և մեթոդի էֆեկտիվության գնահատման համար բերված է գծային համակարգերի ուսումնասիրության օրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Донуи Д., Макисели А. Факторный анализ как статистический метод. М., «Мир», 1967.
2. Павловский Ю. Н. К вопросу об агрегировании и построения иерархических управляющих структур для одного класса сложных систем. «Журн. выч. матем. и мат. физ.», т. 11, № 6, 1971, с. 1510—1520.
3. Верина Л. Ф., Танаев В. С. Декомпозиционные подходы к решению задач мат. программирования (обзор). «Экономика и матем. методы», ч. XI, вып. 6, 1975, с. 1161—1172.
4. Javdan M. R. A unified theory of optimal multilevel control. Vol. 22, № 4, 1975, p. 517—524.
5. Финдайзен В. Системы с многими уровнями управления. «Автоматика и телемеханика», 1970, № 9, с. 86—95.
6. Захарьян С. С. Исследование СХТС методом уплотнения (на примере процесса разложения ДМД). «Докл. I Всесоюзной конференции по мат. модел. СХТС», Ереван, 1975, с. 395—402.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Э. Н. МАНУКЯН

ОСНОВЫ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНО-ФИЗИЧЕСКОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

Техническое состояние сложного оборудования определяется состоянием его отдельных блоков, узлов и элементов, параметры которых не всегда возможно непосредственно контролировать из-за их недоступности, сложности необходимого контрольно-измерительного оборудования. Оценку этих параметров можно производить, обработав специальными методами результаты контроля входных и выходных переменных состояния объекта, несущих в себе информацию о текущем состоянии внутренних узлов и элементов. Рассмотрим одну из задач такого косвенного контроля со следующей постановкой.

Пусть исследуемый объект представлен векторами: $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ контролируемых выходных переменных; $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ контролируемых входных переменных; $B = (b_1, b_2, \dots, b_k)^T$ неконтролируемых параметров внутренних элементов, характеризующих техническое состояние объекта. Заданы результаты измерения входных X , и выходных Y , переменных, а также априори известны функции распределений случайных ошибок измерения. Известна структура, природа и характер физических процессов, протекающих в объекте. Требуется оценить значения параметров $b_1, b_2, \dots, b_k$.

В теории идентификации статистических решений при аналогичных случаях эффективным методом решения задачи считается метод максимального правдоподобия (ММП), при котором наилучшими оценками считаются значения $\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_k$, максимизирующие функцию правдоподобия $P_{Y/B}(Y_2/\bar{B})$.

Полученная таким образом математическая модель правдоподобия, адекватна с объектом лишь по внешним признакам: по входным и выходным сигналам. В теории идентификации, где после оценивания параметров мы оперируем только с входными и выходными переменными полученной модели, такого рода адекватность является вполне приемлемой и не противоречит требованиям постановки задачи. При косвенном же контроле, когда модель предназначена для анализа внутреннего состояния объекта, такого «внешнего» подобия модели с обь-

ектом недостаточна. Здесь необходимо потребовать, чтобы модель полнее отражала качественную и количественную картину реальных физических процессов, протекающих в объекте, его техническое состояние. Исходя из этих требований, в данной работе предлагается изболее близкими к своим истинным значениям считать те значения внутренних параметров $b_1, b_2, \dots, b_n$, при которых в вышеописанной стохастической модели с наибольшей вероятностью обеспечиваются фундаментальные законы физики, описывающие реальные процессы, протекающие в объекте. Полученные значения $\bar{B}$ будем называть оценками максимально-физического правдоподобия (МФП). Необходимым условием применения метода максимально-физического правдоподобия (ММФП) является составление детерминированной математической модели исследуемого объекта, отвечающей следующим требованиям.

1. Каждый элемент, оператор, строка-уравнение, модуль в выражениях математической модели должны иметь определенный физический смысл, является прямой формой записи конкретного фундаментального закона физики, описывающего реальный процесс в соответствующем элементе, узле или блоке анализируемого объекта.

2. Не разрешается преобразование исходных форм записи математических выражений с целью их сокращения или удобства записи.

3. Форма записи математических моделей должна обеспечить вывод условий соблюдения законов физики, представляемых с помощью знаков отношений $=, >, \leq, \dots$ и т. д.

Известная априорная информация о структуре и физической природе объекта создает реальные предпосылки для формирования моделей, отвечающих этим требованиям. Например, если объект можно представить электрической схемой замещения, модель, отвечающая вышеперечисленным требованиям, будет представлять собой систему уравнений, где каждая строка является записью только первого, второго законов Кирхгофа или закона Ома для соответствующего узла, контура, элемента схемы замещения.

На следующем этапе реализации ММФП необходимо составить функцию правдоподобия, представляющую взаимосвязи между вероятностями соблюдения физических законов и стохастической модели и значениями искомых параметров. Составим эту функцию для безынерционных объектов. Пусть модель представляет собой систему конечных уравнений

$$\Phi(X, Y, B, U) = 0, \quad (1)$$

где $\Phi(X, Y, B, U)$ — вектор нелинейных функций; $U = (u_1, u_2, \dots, u_r)^T$ — вектор неконтролируемых переменных состояния.

Предположим, что обеспечение равенства в каждой из строк системы (1) соответствует соблюдению некоторого закона физики. Известны результаты измерений входных и выходных величин X_0 и Y_0 ,

$$X_0 = X + E^x; \quad Y_0 = Y + E^y, \quad (2)$$

где E' и E'' — векторы случайных ошибок измерений соответствующих величин с известными функциями распределений. Подставим из (2) значения X и Y в (1). Получим стохастическую модель объекта для текущего состояния:

$$\Phi(X, -E'; Y - E''; \bar{B}; \bar{U}) = 0. \quad (3)$$

Отметим, что достижение абсолютного равенства в каждой строке (3) является уже случайным событием. Введя обозначение $Z = \Phi(X, -E'; Y, -E'', \bar{B}; \bar{U})$ и рассматривая Z как функцию от случайных аргументов E' и E'' при фиксированных $\bar{B}$ и $\bar{U}$, определим плотность вероятности появления Z . Тогда вероятность соблюдения использованных в модели законов физики будет определяться как:

$$dP = P_{Z|\bar{B}, \bar{U}}(Z = 0|\bar{B}, \bar{U}). \quad (4)$$

Рассмотрев в (4) $\bar{B}$ и $\bar{U}$ в качестве неизвестных, априорную плотность вероятностей в (4) при измеренных значениях X и Y , обозначим через некоторую функцию L :

$$L(X, Y; \bar{B}; \bar{U}) = P_{Z|\bar{B}, \bar{U}}(Z = 0|\bar{B}; \bar{U}), \quad (5)$$

которую будем называть функцией физического правдоподобия (ФФП).

На следующем этапе реализации ММФП, согласно предложенному принципу максимально-физического правдоподобия, определяются значения $\bar{B}$ и $\bar{U}$, максимизирующие ФФП.

С целью определения точности оценок ММФП рассмотрим ковариации этих оценок. Предположим, что с помощью линейных преобразований (3) можно представить в виде:

$$E = \varphi(X, Y; \bar{B}; \bar{U}), \quad (6)$$

где E — $n + m$ -мерный вектор, состоящий из компонентов векторов E' и E'' ; $\varphi(X, Y; \bar{B}; \bar{U})$ — $n + m$ -мерный вектор нелинейных функций.

Для определения приближенного значения функций $\varphi(X, Y; \bar{B}; \bar{U})$ можно воспользоваться уравнением (11). Тогда на основании (6) можно написать:

$$\begin{aligned} P_{Z|\bar{B}, \bar{U}}(Z = 0|\bar{B}; \bar{U}) &= P_{E|\bar{B}, \bar{U}}(\varphi(X, Y; \bar{B}; \bar{U})|\bar{B}; \bar{U}) = \\ &= L(X, Y; \bar{B}; \bar{U}). \end{aligned} \quad (7)$$

Определим зависимость между (10) и функцией правдоподобия $L_{\text{мп}}$, используемой в классическом методе максимального правдоподобия [2]. Предположим, что в ММП используется модель (1). Если Y и (3) рассмотреть как функцию от E' и E , то выражение (6) можно представить как обратную функцию этой зависимости. В таком случае

по правилу преобразования плотности распределения системы случайных величин имеем:

$$P_{Y_3|\bar{B}, \bar{U}}(Y_3; \bar{B}; \bar{U}) = P_{Y_3, \bar{B}, \bar{U}}(z(X_3; Y_3; \bar{B}; \bar{U}) | \bar{B}; \bar{U}) \cdot \det \left[-\frac{\partial z(X_3; Y_3; \bar{B}; \bar{U})}{\partial Y_3} \right] \quad (8)$$

Из (7) и (8) получим:

$$L_{\text{ан}} = L(X_3; Y_3; \bar{B}; \bar{U}) \cdot \det \left[\frac{\partial z(X_3; Y_3; \bar{B}; \bar{U})}{\partial Y_3} \right] \quad (9)$$

Последнее можно трактовать следующим образом: оценки ММФП эквивалентны оценкам ММП для тех моделей объекта, функция правдоподобия при которых представлена в виде (9). В то же время для ММП справедливо неравенство Крамера-Рао [1, 2], поэтому для оценок ММФП получим:

$$\text{COV}(\bar{B}) \geq J^{-1},$$

где

$$J = M \left[\left(\frac{\partial \ln L_{\text{ан}}}{\partial B} \right) \cdot \left(\frac{\partial \ln L_{\text{ан}}}{\partial B} \right)^T \right] = M \left[\frac{\sigma^2 \left| \ln L(X_3; Y_3; \bar{B}; \bar{U}) \right| \cdot \det \frac{\partial z}{\partial Y_3}}{\partial B \cdot \partial B^T} \right].$$

Пример. Пусть имеется объект, схема замещения которого представлена на рис. Контролируемой входной переменной является э.д.с. источника напряжения U , выходной переменной — ток I . Заданы результаты измерений этих величин $U_s = 1b$ и $I_s = 1a$. Ошибка измерения тока Δ имеет нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma^2 = 0,01a^2$. Ошибкой измерения э.д.с. можно пренебречь. Требуется по результатам измерений оценить значение активного сопротивления R .

Определим оценку ММФП искомого параметра, используя вышеизложенную схему.

Этап 1. Составим знаковую модель объекта. В данном случае для описания процессов, протекающих в объекте, необходимо использовать закон Ома. Возможны следующие три формы записи математической модели:

$$\frac{U}{R} - I = 0; \quad U - IR = 0; \quad \frac{U}{I} - R = 0.$$

Этап 2. Составим ФФП для всех трех моделей. Подставим в уравнение моделей $U = U_s$ и $I = I_s + \Delta$. Получим:

$$\frac{U_s}{R} - (I_s + \Delta) = 0; \quad U_s - (I_s + \Delta)R = 0; \quad \frac{U_s}{I_s + \Delta} - R = 0.$$

Введем функции:

$$Z_1 = \frac{U_s}{R} - (I_s + \Delta); \quad Z_2 = U_s - (I_s + \Delta)R; \quad Z_3 = \frac{U_s}{I_s + \Delta} - R.$$

Определим плотность распределений этих величин:

$$f_1(Z_1) = f_2(Z_2) = (\sigma \sqrt{2\pi})^{-1} \exp \left[-(\sigma \sqrt{2})^{-2} \left(Z + I_s - \frac{U_s}{R} \right)^2 \right];$$

$$f_3(Z_3) = U_s \cdot [(R + Z) \cdot \sigma \sqrt{2\pi}]^{-1} \exp \left[-(\sigma \sqrt{2})^{-2} \left(\frac{U_s}{R + Z} - I_s \right)^2 \right].$$

Составим ФФП для всех трех случаев:

$$L_1 = L_2 = (\sigma \sqrt{2\pi})^{-1} \cdot \exp \left[-(\sigma \sqrt{2})^{-2} \left(I_s - \frac{U_s}{R} \right)^2 \right];$$

$$L_3 = U_s \cdot (\sigma \cdot R^2 \sqrt{2\pi})^{-1} \cdot \exp \left[-(\sigma \sqrt{2})^{-2} \left(\frac{U_s}{R} - I_s \right)^2 \right].$$

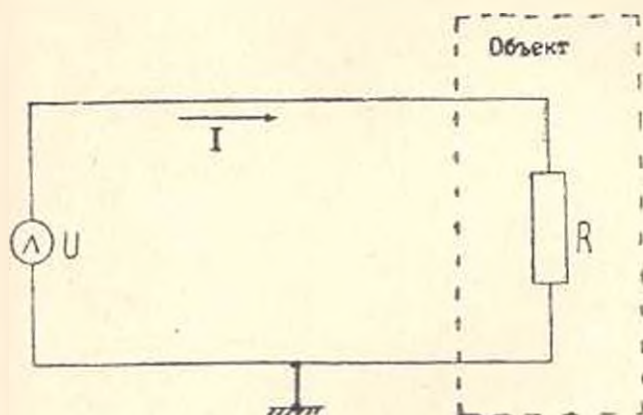


Рис.

Оценки ММФП величины R , максимизирующие последние выражения, получаются для первой и второй модели $\bar{R} = \frac{U_s}{I_s} = 1 \text{ Ом}$. для тре-

тей модели $\bar{R} = \frac{U_s}{I_s} \left(1 + \frac{I_s \sqrt{4\sigma^2 + I_s^2} - I_s - 2\sigma^2}{2\sigma^2} \right) = 1,01 \text{ Ом}$.

Поскольку лишь одна из полученных разных по величине оценок должна быть наиболее близка к искомому значению этого параметра, то и она будет являться правильной для метода МФП.

Одним из основных препятствий практического применения ММФП является трудность, а иногда и невозможность определения условной

плотности распределения (5). В подобных случаях предлагается воспользоваться следующим приближенным методом его определения.

Используя методику статистической линеаризации, приведенной в [3], можно написать:

$$\Phi(X; -F'; Y_0 - E''; \bar{B}; \bar{U}) = F + H_1 \cdot E' + H_2 \cdot E''. \quad (10)$$

Элементы вектора F определяются как:

$$f_i = \varphi_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n g'_{ij} M(c'_j)^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n g''_{ij} M(c'_j)^2,$$

где φ_i — элемент вектора $\Phi(X; Y_0; \bar{B}; \bar{U})$ в (3); $g'_{ij} = \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial^2 X_{ij}}$;

$$g''_{ij} = \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial^2 Y_{ij}}.$$

Элементы векторов H_1 и H_2 определяются как:

$$h_{1ij} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial X_{ij}} + \frac{1}{2} g'_{ij} \frac{M(c'_j)^2}{M(c'_j)^3}; \quad h_{2ij} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial Y_{ij}} + \frac{1}{2} g''_{ij} \frac{M(c'_j)^2}{M(c'_j)^3}.$$

Обозначив в (10) случайным вектором $E_0 = H_1 \cdot E' + H_2 \cdot E''$ для приближенного значения ФФП, можно написать:

$$L(X; Y_0; \bar{B}; \bar{U}) = P_{E_0; \bar{B}; \bar{U}}(-F; \bar{B}; \bar{U}).$$

Заметим, что оптимизация функции (11) методами оптимизации нелинейных функционалов невозможна, т. к. при изменении значений $\bar{B}$ и $\bar{U}$ изменяются значения элементов матриц H_1 и H_2 , совместная плотность распределения элементов вектора E_0 , а, следовательно, и сама оптимизируемая функция. Поэтому определение оценок ММФП предлагается реализовать с помощью следующей итерационной процедуры.

1. Векторам $\bar{B}$ и $\bar{U}$ задают исходные значения.
2. Для заданных значений $\bar{B}_i$ и $\bar{U}_i$ определяются элементы матриц H_1 и H_2 .
3. Определяется функция плотности распределений линейного преобразования случайных векторов E' и E'' : $E_0 = H_1 \cdot E' + H_2 \cdot E''$.
4. Для заданных значений $\bar{B}_i$ и $\bar{U}_i$ определяются элементы вектора F и по найденной функции плотности распределений $P_{E_0; \bar{B}; \bar{U}}(-F; \bar{B}; \bar{U})$ — значение ФФП в заданной точке.
5. Используя один из методов оптимизации нелинейных функционалов, определяются новые значения оценок $\bar{B}_{i+1}$ и $\bar{U}_{i+1}$, минимизирующие текущую ФФП.
6. Проверяются условия $|\bar{B}_{i+1} - \bar{B}_i| < \epsilon$; $|\bar{U}_{i+1} - \bar{U}_i| < \epsilon$ и при их соблюдении определение оценок $\bar{B}$ и $\bar{U}$ заканчивается, в противном случае процесс повторяется, начиная с п. 2.

ԱՌԱՎԵԼԱԿՈՒՅՆ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՃՇՄԱՐՏԱՆՄԱՆՈՒԹՅԱՆ
ՄԵԹՈԴԻ ԷԽՄՈՒՆՔՆԵՐԸ

Ա մ փ օ փ ու մ

Դիտարկվում է բարդ օբյեկտների ներքին պարամետրերի գնահատման խնդիրը: Առաջարկվում է իրենց իրական արժեքներին ավելի մոտ համարել ներքին պարամետրերի այն արժեքները, որոնց դեպքում օբյեկտում բնիա-
ցող ֆիզիկական երևույթները նկարագրող ստոխաստիկ մաթեմատիկական մոդելում առավելագույն հավանականությամբ ապահովվում է մոդելում կի-
րառված ֆիզիկայի հիմնական օրենքների բավարարումը: Այս սկզբունքով
ստացված ներքին պարամետրերի արժեքները անվանվում են առավելագույն
ճշմարտանմանության գնահատականներ:

Բերված է այդ գնահատականների ճշտության վերլուծումը և առաջարկ-
ված է նշված գնահատումն իրականացնող խտրացիայի պրոցեդուրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Эйххофф Н. Основы идентификации систем управления. М., «Мир», 1975.
2. Сойс Ж., Мольс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М., «Связь», 1976.
3. Голдеский В. С., Зиварш А. Н. О косвенном контроле безынерционных систем. «Точность и надежность кибернетических систем», 1977, вып. 5

Л. А. УНАНЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Газотранспортные системы в настоящее время относятся к наиболее активно развивающимся подсистемам топливно-энергетического комплекса как в масштабе страны, так и районов. Постоянный рост потребления газа, изменчивость сырьевой базы, вследствие истощения действующих и открытия новых месторождений подвергают непрерывному пересмотру потоков газа от источников до потребителей, изменению конфигурации газотранспортных систем и ее параметров. В связи с огромными затратами, связанными с развитием газотранспортных систем, оптимальное решение этих вопросов имеет народнохозяйственное значение. И как показано в исследованиях [1], из-за наличия прямых и обратных связей между предыдущими и последующими решениями, корректное решение стратегии развития газотранспортных систем можно получить лишь на основе разработки и реализации динамических моделей, охватывающих весь период планирования. Несмотря на актуальность вопроса разработки динамических моделей развития газотранспортных систем, ей посвящено относительно небольшое число работ по сравнению со статическими постановками и в них, как правило, решается ограниченный круг вопросов с различной степенью допущений (линеаризация зависимостей, оптимизация лишь потоков газа без учета распределения давлений газа в сети и др.). В связи с этим ниже предлагается динамическая модель оптимизации развития газотранспортных систем, реализация которой позволяет одновременно определить оптимальную стратегию развития сети — технические решения по газопроводным участкам и компрессорным станциям, потоки газа с учетом распределения давлений — по дискретным временным уровням выбранного периода планирования. Эти решения выбираются из условия обеспечения минимума суммарных приведенных затрат на систему за весь период планирования с учетом периода «последствий» [2].

Рассмотрим N временных уровней t , $t = 0, N$ периода планирования, где $t = 0$ соответствует моменту принятия решений, а $t = N$ — концу периода планирования. Интервал между соседними временными уровнями может равняться одному или нескольким годам. Состояние

газотранспортной сети на t -м временном уровне опишем с помощью графа $G_t(X_t, T_t)$, $t = \overline{0, N}$, где X_t — множества узлов системы, а T_t — множества газопроводных участков и компрессорных станций. Предполагается, что выполняются следующие условия

$$X_t \subseteq X_{t+1}, \quad T_t \subseteq T_{t+1}, \quad t = \overline{0, N-1},$$

что соответствует последовательному развитию сети.

Для рассматриваемого случая, когда совместно определяются технические решения по газопроводным участкам, компрессорным станциям и потокораспределение в сети с учетом распределения давлений газа, затраты Z_{ij} на каждый элемент (i, j) системы являются функцией от выбираемых технических решений $u_{ij}^1, \dots, u_{ij}^N$, начальных $P_i^k, \dots, P_j^k$, конечных давлений $P_i^k, \dots, P_j^k$ и потоков газа $Q_{ij}^k, \dots, Q_{ij}^k$ по элементу, соответствующим рассматриваемым временным уровням, где k — номер временного уровня ввода элемента в эксплуатацию. Для действующих элементов: $k = 1$.

Поэтому целевую функцию задачи оптимизации можно представить следующим образом:

$$\sum_{(i,j) \in T_N} \min_{u_{ij}} Z_{ij}(\bar{u}_{ij}, \bar{P}_i, \bar{P}_j, \bar{Q}_{ij}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\bar{u}_{ij} = (u_{ij}^1, \dots, u_{ij}^N)$; $\bar{P}_i = (P_i^1, \dots, P_i^N)$; $\bar{P}_j = (P_j^1, \dots, P_j^N)$; $\bar{Q}_{ij} = (Q_{ij}^1, \dots, Q_{ij}^N)$.

Технологически допустимая область поиска минимума (1) задается следующими условиями.

1. Условиями неразрывности потоков газа по узлам сети

$$\sum_{i \in X_j^k} \operatorname{sgn}(P_i^k - P_j^k) \cdot Q_{ij}^k + \sum_{i \in Y_j^k} \operatorname{sgn}(P_j^k - P_i^k) \cdot Q_{ij}^k - Q_j^k + Q_{ja}^k = 0, \quad (2)$$

$$j \in X_k, \quad k = \overline{1, N}$$

где X_j^k и Y_j^k — соответственно, множества газопроводных участков и компрессорных станций, смежных к j -му узлу на k -м временном уровне; Q_j^k — потребляемый в j -м узле газ на k -м временном уровне (для нейтральных узлов они равны нулю); Q_{ja}^k — отбираемый газ на k -м временном уровне из источника, расположенном в j -м узле;

$$\operatorname{sgn}(a) = \begin{cases} 0, & \text{если } a = 0, \\ 1, & \text{если } a \geq 0, \\ -1, & \text{если } a < 0. \end{cases}$$

2. Функциональными условиями по газопроводным участкам

$$|P_i^k - P_j^k| \leq c \cdot Q_{ij}^{k/2} (d_{ij}^{k-1})^{5/2}, \quad k = \overline{1, N} \quad (3)$$

и по компрессорным станциям

$$a_{ij}^{k-1} \cdot \min(P_i^{k2}, P_j^{k2}) - \max(P_i^{k2}, P_j^{k2}) \leq b_{ij}^{k-1} \cdot Q_{ij}^k, \quad k = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где c — коэффициент; d_{ij}^{k-1} — эквивалентный диаметр участка (i, j) на $k-1$ -м временном уровне; a_{ij}^{k-1} , b_{ij}^{k-1} — коэффициенты А. Г. Немудрова [3] для компрессорной станции (i, j) действующей или рассчитанной на $k-1$ -м временном уровне.

Кроме условий (2) — (4) на переменные P_i^k , P_j^k , Q_{ij}^k , Q_{i0}^k , $k = \overline{1, N}$ устанавливаются прямые ограничения типа „не больше чем“ и (или) „не меньше чем“ (Q_{ij}^k — наперед заданные постоянные).

Реализация рассмотренной модели сводится к решению задачи нелинейного математического программирования, размерность которой пропорциональна числу временных уровней. Поэтому при больших N ее реализация связана с большими вычислительными трудностями, которые усугубляются дискретностью выбираемого оборудования (труб и компрессорных агрегатов).

Рассмотрим следующие основные два способа ее реализации. Первый способ, для которой решены основные принципиальные вопросы, основывается на предварительном расчете и использовании аналитических зависимостей (технико-экономических характеристик) затрат $Z_{ij}(P_i, P_j, Q_{ij})$, с помощью которых формулируется целевая функция задачи оптимизации. При этом, из целевой функции исключаются технические решения и задача переводится в область непрерывных переменных P_i, P_j, Q_{ij} , что позволяет использовать обычные методы математического программирования. Технические решения по газопроводным участкам и компрессорным станциям определяются после реализации задачи математического программирования, по оптимальным значениям P_i^*, P_j^*, Q_{ij}^* с помощью зависимостей, на основании которых рассчитываются технико-экономические характеристики. Наиболее удобными функциями для аналитического представления технико-экономических характеристик являются обычные нелинейные полиномы [4] (при N не более двух) или составленные функции [5] (при $N > 2$), коэффициенты которых определяются методом наименьших квадратов.

Второй способ (менее трудоемкий) заключается в прямой реализации модели путем непосредственного расчета затрат Z_{ij} , входящих в целевую функцию (1). Однако, время решения задачи оптимизации при этом многократно возрастает. В настоящее время разрабатывается алгоритмическое и программное обеспечение реализации рассмотренной модели по этому способу.

Основной его особенностью является реализация модели с помощью единой программы, которая включает основной блок и подпрограммы. В основном блоке программы реализуется этап оптимизации (задача математического программирования) относительно переменных P_i, P_j, Q_{ij} . В качестве метода его реализации нами в настоящее время используется метод покоординатного спуска (метод Гаусса—Зейделя) с постепенно уточняющимися шагами.

Накопленный вычислительный опыт показывает, что применительно к районным системам средних размеров описанной моделью можно охватить примерно пяти временных уровней периода планирования с достаточно подробным выделением газопроводных участков и компрессорных станций.

Применительно к большим системам газоснабжения (например, Единой системы газоснабжения) необходимо применять агрегирование системы — рассмотрение участка от компрессорной станции до компрессорной станции с перенесением потребителей и источников газа на начало или конец участка. При этом ориентировочные расчеты показывают, что при условии применения средств вычислительной техники средней мощности можно охватить два-три временных уровня периода планирования.

Брянский комплексный
отдел ВНИИГазпром

Поступило 26.XII.1979

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Оптимизация и управление в больших системах энергетики. Т. I, Издательство АН СССР, СЭИ, 1970.
2. Мелентьев Л. А. Системные исследования в энергетике. М., «Наука», 1979, с. 416.
3. Александров А. В., Яковлев Е. И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. М., «Недра», с. 432.
4. Унянин Л. А. Оптимизация развития газотранспортных систем во времени. Реф. сб. «Экономика газовой промышленности», М., ВНИИГазпром, 1974, № 10.
5. Унянин Л. А. Об одном алгоритме формализации задачи выбора оптимальных газо-транспортных систем с учетом динамики развития. М., ВНИИГазпром, 1978, деп. № 31.

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ ՈՒԹ Յ ՈՒՆ

էջ

ՄԵՔՆԵԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

- Մ. Վ. Կոստյան, Հ. Բ. Բաղդասարյան, Ս. Ս. Մեսրոպյան: Կարման պրոցեսի սխառման տրեքի օպտիմիզացման մի մեթոդի մասին՝ բառ պրոթիթի անընդհատ մաշման 3

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

- Է. Բ. Շաբարյան: Էներգամիավորման մեջ մտնող էնէրգաշամակարգերի հաստատված ուժի մի աղբյուրի հաշվի առնելով միջամակարդային հոսքային հոսքի վրա դրված սահմանափակումները 10

ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆԻԿԱ

- Վ. Ս. Բաժարյան: Էլեկտրաշամակարգերի ընդհանրացված պարամետրերի Z-մատրիցայի ուղղումի տրանսֆորմացիայի կոմպլեքս զրոյանցների հոսքային ղեկավարում 12
Կ. Հ. Բաղդյան: Ծրագրային ապահովող յարմարի էլեկտրամագնիսական մոմենտը անհամաչափ էլեկտրամագնիսական տրոհված ուժի մի 25
Կ. Հ. Բաժարյան, Կ. Հ. Բաժարյան: Հոսքային պարամետրերի կոմպլեքսների ընդհանրացված 32

ՀԱՆՎՈՐԱԿԱՆ, ՏԵԽՆԻԿԱ

- Լ. Ա. Իրիգորյան: Տեխնոլոգիական պրոցեսի կառուցման զրոյանցի որոշումը և թողարկվող արտադրանքի օպտիմալ պարամետրերի ընտրումը 37
Ս. Ս. Բաժարյան: Մաթեմատիկական կոմպլեքս մեթոդի տեղումնային կառուցվածքային ռազմական համակարգերի հետադադարյան համար 41
Է. Ն. Բաժարյան: Առավելագույն ֆիզիկական համարանմանության մեթոդի իմունները 51

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՒԹՈՒ

- Լ. Հ. Զոհանյան: Գաղափարային պրոցեսի համակարգերի օպտիմիզացումը պինամիկական մոդելի հիման վրա 58

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- М. В. Кисьян, Г. Б. Багдасарян, С. С. Месроbian. Об одном методе оптимизации параметров процесса резания по непрерывному и пашиванию инструмента 3

ЭНЕРГЕТИКА

- И. И. Ширабхиян. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистем входящих в энергообъединение, с учетом ограничений на мощности межсистемных перетоков 10

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- В. С. Сафарян. Коррекция Z-матрицы обобщенных параметров электрических систем при изменении комплексных коэффициентов трансформации 19
К. О. Согикян. Электромагнитный момент трехфазного асинхронного двигателя в режиме несимметричного электромагнитного тормоза 25
К. А. Гамбарян, Г. О. Мкртчян. Определение характеристик потерь мощности на корону 32

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- А. А. Григорян. Определение коэффициента стабильности технологического процесса и выбор оптимальных параметров выпускаемых изделий 37
С. С. Захарьян. Метод сокращения размерности при исследовании многосвязных систем автоматического регулирования 43
Э. Н. Манукян. Основы метода максимально-физического правдоподобия 51

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

- А. А. Унянян. Оптимизация развития газотранспортных систем на основе динамической модели 58

Технический редактор Л. А. АЗИЗБЕКЯН

ВФ 05416

Изд. № 5305

Заказ 811

Тираж 445

Сдано в набор 15.07.1980 г. Подписано к печати 3.10.1980 г.
Формат бумаги 70 × 108¹/₁₆. Печ. л. 4,25. Бум. л. 2,12. Усл. п. л. 5,95.
Уч. изд. л. 4,46.

Издательство Академии наук Армянской ССР, Ереван, ул. Барекамутян, 24г.
Типография Издательства АН Армянской ССР, Ереван, ул. Барекамутян 24.