

ЭНЕРГЕТИКА

Ե. Լ. ԱԾՈՒՆ, Ս. Բ. ԱՐՄՅՈՒՅԱՆ

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ДВУХ
 ЭНЕРГОСИСТЕМ, СВЯЗАННЫХ ПЕРЕДАЧЕЙ
 ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ
 ОТБОРОМ МОЩНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО
 ПРИСОЕДИНЕНИЯ

В качестве межсистемных связей между отдельными энергосистемами все чаще используются электропередачи постоянного тока. Успешнее систем переменного тока передачами постоянного тока (ППТ) позволяет [1, 2] повысить их устойчивость, надежность, при этом снижаются токи короткого замыкания, облегчаются условия регулирования частоты и активной мощности. В известных [3, 4 и др.] программах расчета установившегося режима (у.р.) энергосистем, содержащих ППТ, не учитывается конфигурация передачи и режим работы ее преобразовательных подстанций. В других работах [1, 2 и др.] режим ППТ рассматривается более подробно, однако при этом энергосистемы, примыкающие к передаче, замещаются эквивалентной э.д.с. за некоторым результирующим реактивным сопротивлением, что не во всех случаях справедливо [5]. В то же время работа ППТ в значительной степени зависит от структуры и режима работы связываемых сю энергосистем, и наоборот, работа регулируемых преобразовательных подстанций ППТ влияет на режим примыкающих энергосистем. Наличие ППТ в системе переменного тока сложной структуры требует совместного решения уравнений у.р. энергосистем и ППТ, основанного на подробном описании как сети переменного тока, так и конфигурации и режима работы ее регулируемых преобразовательных подстанций.

Настоящая статья посвящена рассмотрению алгоритма расчета установившегося режима двух энергосистем, связанных линией электропередачи постоянного тока. В отличие от [1-7] приемная и отправная энергосистемы представляются эквивалентными многополюсниками. Режим ППТ описывается полными уравнениями, учитывающими работу регулируемых преобразовательных подстанций и наличие промежуточного отбора мощности параллельного включения. Алгоритм расчета разработан с учетом регулирования преобразовательных подстанций, осуществляемого как изменением коэффициентов трансформации трансформаторов концевых подстанций ППТ (медленное регулирование), так и непосредственно системой регулирования преобразователей (быстрое регулирование). При этом предполагается, что инвертор работает по характеристике постоянства угла погасания, а выпрямитель — по характерис-

нике постоянства направленного тока. Предлагаемый алгоритм расчета может быть распространен на случай любого количества параллельно включенных отборов мощности.

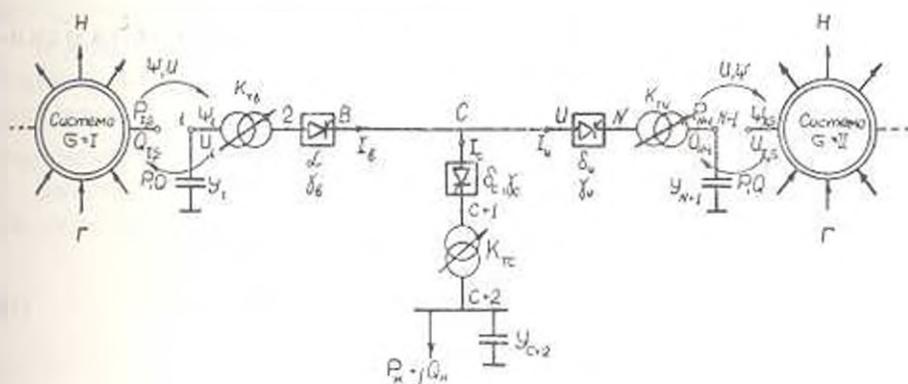


Рис. 1.

Постановка задачи. Принимаются заданными:

а) параметры Y двух ($z = I, II$) систем (рис. 1), приведенных к эквивалентным бесконечным многополюсникам с a, n независимыми узлами, в число которых входят все генераторные и нагрузочные узлы, а также узел, представляющий начало или конец ППТ;

б) параметры режима: $P_{z, \alpha}$ (активные мощности), $Q_{z, \beta}$ (реактивные мощности), $U_{z, \gamma}$ (модули напряжений), $\psi_{z, \delta}$ (фазы напряжений) режима соответственно a, β, γ, δ узлов двух ($z = I, II$) систем, кроме параметров режима начала и конца ППТ;

в) диапазон регулирования напряжения и стандартные отпаики преобразовательных трансформаторов, их сопротивления, проводимости (Y_1, Y_{N+1}, Y_{C+1}) шунтовых конденсаторных батарей преобразовательных подстанций, активные сопротивления (R_1, R_2) участков линии ППТ;

г) углы регулирования преобразовательных подстанций: минимальный угол погасания инвертора $\delta_{ин}$, минимальный угол опережения зажигания выпрямителя α , допустимый диапазон его изменения, заданный угол погасания инвертора промежуточной подстанции δ_1 и мощность отбора S_H ППТ.

Являются искомыми: а) параметры $P_{z, \alpha}, Q_{z, \beta}, U_{z, \gamma}, \psi_{z, \delta}$ соответственно $\beta, \gamma, \delta, \alpha$ узлов двух ($z = I, II$) энергосистем, включая параметры режима начала и конца ППТ;

б) параметры режима всех узлов ППТ, в том числе номера отпаек преобразовательных трансформаторов, обеспечивающих минимальные углы регулирования, действительный угол зажигания выпрямителя α_r и т. д.

Допущения. Переменный ток и напряжение на зажимах преобразователей синусоидальны; выпрямленный ток идеально сглажен; не учитываются потери в преобразователях и конденсаторах;

вентили преобразователей идеальны, разброс в их зажигании отсутствует. Преобразователи работают в основном эксплуатационном режиме при горении вентилей преобразовательных мостов группами по два и по три (режим 2—3).

Расчетные уравнения. Уравнения у. р. многополюсников $\varepsilon = I, II$ запишем следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} P_{\alpha, \beta}^i &= P(\dots \Psi_{\alpha, \beta}^{i-1} \dots U_{\alpha, \beta}^{i-1}); \\ Q_{\alpha, \beta}^i &= Q(\dots \Psi_{\alpha, \beta}^{i-1} \dots U_{\alpha, \beta}^{i-1}); \\ \Psi_{\alpha, \beta}^i &= \Psi(\dots \Psi_{\alpha, \beta}^{i-1} \dots Q_{\alpha, \beta}^{i-1} \dots U_{\alpha, \beta}^{i-1}); \\ U_{\alpha, \beta}^i &= U(\dots \Psi_{\alpha, \beta}^{i-1} \dots U_{\alpha, \beta}^{i-1}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha, \beta, m, f = 1 + n$; $\alpha \neq \beta$; $m \neq f$; $\varepsilon = I, II$;

i — шаг внутренней итерации.

Уравнения передачи постоянного тока записываются с учетом возможности медленного регулирования ее режима при помощи изменения отпаяк преобразовательных трансформаторов на приемном и отправном концах, грубо обеспечивающих минимальные углы регулирования. Более точное регулирование режима передачи осуществляется работой инвертора по характеристике постоянства угла погасания и работой выпрямителя по характеристике постоянства выпрямленного тока.

В соответствии с минимальным углом погасания δ_u инвертора приемного конца передачи, поддерживаемого неизменным системой регулирования ППТ, угол γ_u коммутации инвертора вычисляется по формуле

$$\gamma_u^i = \sin^{-1} [\cos (2\delta_u - \gamma_u^{i-1}) - (g \varphi \sin (2\delta_u + \gamma_u^{i-1}))], \quad (2)$$

где $g \varphi$ — коэффициент мощности на зажимах инвертора:

$$g \varphi = \frac{Q_{N+1}}{P_{N+1}},$$

причем, активная (P_{N+1}) и реактивная (Q_{N+1}) мощности приемного конца ППТ (рис. 2) определяются на основе расчета у. р. приемной энергосистемы $\varepsilon = II$ с учетом соответствующих уравнений связи.

Переменное напряжение U_N на зажимах инвертора определяется по зависимости

$$U_N = \sqrt{\frac{2\pi x_{\gamma} P_N}{3 \sin (2\delta_u - \gamma_u) \sin \gamma_u}}. \quad (3)$$

где x_{γ} — индуктивное сопротивление контура коммутации инвертора.

Коэффициент трансформации инверторной подстанции, обеспечивающей работу инвертора с минимальным углом регулирования, находится как

$$K_{тв} = \frac{U_N}{U_{и.с}}, \quad (4)$$

где $U_{и.с}$ — напряжение узла связи системы $\varepsilon = II$ с ПИТ.

В соответствии с заданным диапазоном регулирования и числа отпайк трансформатора приемного конца ПИТ выбирается ближайшая стандартная отпайка трансформатора, по которой корректируется напряжение узла связи системы $\varepsilon = II$ с ПИТ.

Выпрямленный ток и напряжение приемного конца ПИТ определяются по формулам:

$$I_u = \frac{U_\lambda}{\sqrt{2}x_{\pi}} \left| \cos \beta_u - \cos (\beta_u + \gamma_u) \right|; \quad (5)$$

$$U_u = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_\lambda \cos \beta_u - \frac{3}{\pi} x_{\pi} I_u. \quad (6)$$

Рассчитываются параметры режима промежуточной инверторной подстанции по нижеприведенным зависимостям.

Напряжение узла подключения отбора мощности ПИТ

$$U_c = U_u + I_u R_2. \quad (7)$$

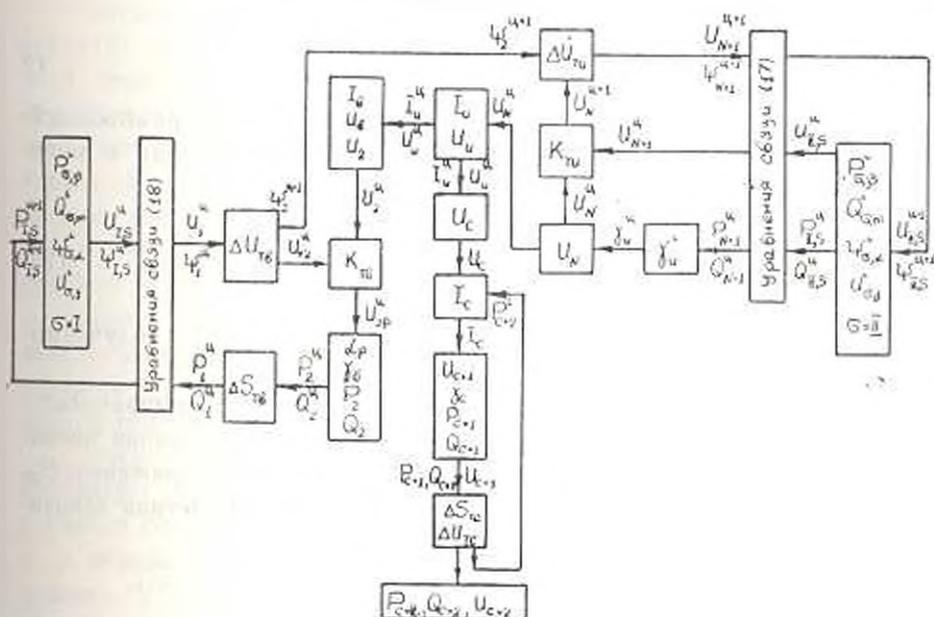


Рис. 2

Переменное напряжение на выходе инвертора, работающего с заданным углом погасания

$$U_{c+1} = \frac{U_c}{3\sqrt{2} \cos \beta_c} \left(U_c + \frac{3}{\pi} X_{\pi} I_c \right), \quad (8)$$

где I — постоянный ток нагрузки, уточняемый в ходе расчета,

$$I_c = \frac{P_{c-1} + \Delta P_{c1}}{U_c}$$

Угол коммутации промежуточной преобразовательной подстанции

$$\gamma_c = -\beta_c + \arccos\left(\cos \beta_c - \frac{\sqrt{3}x_{12} I_c}{U_{c-1}}\right). \quad (9)$$

Активная и реактивная мощности на выходе инвертора

$$P_{c+1} = \frac{3U_{c+1}^2}{2\pi x_{12}} \sin(2\beta_c + \gamma_c) \sin \gamma_c$$

$$Q_{c+1} = \frac{3U_{c+1}^2}{2\pi x_{12}} \left[\gamma_c - \cos(2\beta_c + \gamma_c) \sin \gamma_c \right] \quad (10)$$

Напряжение на входе выпрямителя отправного конца ППТ, определяемое исходя из минимального угла зажигания α выпрямителя,

$$U_a = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \left(U_b + \frac{3}{\pi} x_{12} I_b \right). \quad (11)$$

где выпрямленный ток I_b и напряжение U_b равны:

$$I_b = I_a = I_c; \quad U_b = U_c + I_b R_{11}. \quad (12)$$

Коэффициент трансформации трансформатора выпрямительной подстанции, грубо обеспечивающей работу преобразователя с минимальным углом зажигания, определяется как:

$$K_{12} = \frac{U_a}{U_{1,1}}, \quad (13)$$

где $U_{1,1}$ — напряжение узла связи системы $\varepsilon = 1$ с ППТ, получаемого из расчета у. р. многополюсника $\varepsilon = 1$.

По выбранной стандартной отпайке трансформатора выпрямительной подстанции, исходя из заданного диапазона регулирования напряжения, определяется расчетное значение переменного напряжения U_{2p} выпрямительной подстанции, по которой уточняется расчетная величина угла зажигания выпрямителя

$$\cos \alpha_p = \frac{\pi}{3\sqrt{2}U_{2p}} \left(U_b + \frac{3}{\pi} x_{12} I_b \right), \quad (14)$$

и затем и угол коммутации выпрямителя

$$\gamma_b = -\alpha_p + \arccos\left(\cos \alpha_p - \frac{\sqrt{2}x_{12} I_b}{U_{2p}}\right) \quad (15)$$

Активная и реактивная мощности, потребляемые выпрямителем, определяются по зависимостям:

$$P_2 = \frac{3U_{\text{н}}^2}{2-x_{\gamma b}} \sin(2\alpha_p + \gamma_b) \sin \gamma_b;$$

$$Q_2 = \frac{3U_{\text{н}}^2}{2-x_{\gamma b}} \left[\gamma_b - \cos(2\alpha_p + \gamma_b) \sin \gamma_b \right]; \quad (16)$$

и затем мощности P_1 и Q_1 на входе трансформатора преобразователя, рассчитываемых с учетом потерь в самом трансформаторе.

Уравнениями связи для приемного и отправного концов ППТ служат:

$$P_{N+1} = P_{\text{н.л}}, \quad Q_{N+1} = -U_{\text{н.л}}^2 Y_{N+1} + Q_{\text{н.л}}, \quad U_{N+1} = U_{\text{н.л}}, \quad \Psi_{N+1} = \Psi_{\text{н.л}}; \quad (17)$$

$$P_1 = -P_{\text{л.л}}, \quad Q_1 = -Q_{\text{л.л}} + U_{\text{л.л}}^2 Y_1, \quad U_1 = U_{\text{л.л}}, \quad \Psi_1 = \Psi_{\text{л.л}}; \quad (18)$$

де l, s, II, s — индексы узлов отправного (I) и приемного (II) многополюсников, примыкающих к ППТ;

1, $N+1$ — индексы начала и конца ППТ.

Алгоритм расчета сводится к совместному решению уравнений (1)–(18). Методом последовательных приближений по принципу Зенделя решается система уравнений (1), записанная для отправной энергосистемы $s=1$. При этом в качестве исходных параметров режима для узла связи $s=1$ с ППТ используются активная $P_{\text{л.л}}$ и реактивная $Q_{\text{л.л}}$ мощности, известные лишь в первом приближении. Аналогично рассчитывается у. р. приемной энергосистемы $s=II$, однако в узле связи $s=II$ с ППТ задаются параметры $U_{\text{н.л}}$ и $\Psi_{\text{н.л}}$, значения которых могут быть приняты равными $U_{\text{н.л}} = U_{\text{ном}}$, $\Psi_{\text{н.л}} = 0$. Если приемная и передающая системы связаны лишь передачей постоянного тока, без шунтирующих связей по переменному току, то из-за развязки по частоте единая ось отсчета фаз комплексных напряжений для систем $s=1, II$ является условной.

Найденные в результате расчета у. р. многополюсников $s=1, II$ параметры режима их узлов связи используются в качестве исходных с учетом соответствующих уравнений связи (17) и (18) для расчета у. р. передачи постоянного тока. Полученные в результате расчета режима ППТ параметры режима узлов 1 и $N+1$ в свою очередь, также с учетом уравнений связи (17) и (18), используются в качестве исходных для расчета у. р. многополюсников $s=1, II$ во втором цикле итерации и т. д. до достижения сходимости. На рис. 1 показаны используемые для расчета многополюсников $s=1, II$ и ППТ параметры режима узлов связи, а также система параметров режима, используемая в согласованном расчете режимов многополюсников и ППТ. С целью ускорения сходимости, начиная с третьего цикла, и

вводится поправочный коэффициент ξ по всем параметрам (I) узлов связи

$$I^{n+1} = I^n + \xi(I^{n+1} - I^n).$$

Величина коэффициента ξ зависит от хода протекания итерационного процесса, его диапазон изменения составляет $0,5 < \xi < 2$.

Расчет считается законченным при достижении с заданной точностью баланса мощности в каждом из независимых узлов многополюсников $\varepsilon = 1, II$, дополнительно контролируются параметры режима ППТ. На рис. 2 приведена предлагаемая схема итерации по совместному решению уравнений многополюсников $\varepsilon = 1, II$ и ППТ.

Программа расчета. По предлагаемому алгоритму расчета составлена программа экспериментального назначения для ЭВМ семейства «Напри», позволяющая на наиболее мощной из этой серии — «Напри-3» — анализировать у.р. энергообъединения, включающего ППТ, при общем числе узлов до 300. При этом число промежуточных с ППТ отборов мощности не ограничивается. Выполненные по этой программе практические расчеты показывают стабильную сходимость итерации к искомому решению за 10–15 циклов итераций. Ввод коэффициента ξ значительно способствует уменьшению времени счета. В частных случаях, когда фиксируются модули напряжений в отдельных узлах преобразовательных подстанций, расчет сходится значительно быстрее. В разработанной программе имеется возможность (по ключу) автоматического изменения мощности шунтовых батарей конденсаторов, если не обеспечиваются заданные углы регулирования преобразовательных подстанций.

Пример расчета. Ниже приводятся результаты расчета у.р. двух энергосистем, связанных передачей постоянного тока. Приемная и передающая энергосистемы представлены в виде эквивалентных семиполюсников. Исходные параметры ППТ (рис. 1) приводятся в табл. 1.

Таблица 1
Исходные параметры передачи постоянного тока

Наименования	Выпрямительная подстанция В	Инверторная подстанция И	Промежуточная подстанция С
Параметры трансформатора, <i>о.м</i>	$R_{ТВ} = 0,5;$ $X_{ТВ} = 25$	$R_{ИВ} = 0,8;$ $X_{ИВ} = 47,5$	$R_{ТС} = 2;$ $X_{ТС} = 125$
Число ступек	20	20	10
Пределы регулирования, %	± 10	± 10	± 5
Проводимость батарей шунтовых конденсаторов, <i>сим</i>	$Y_1 = 0,0022$	$Y_{И+1} = 0,0037$	$Y_{С-2} = 0,00138$
Минимальный угол запаздывания зажигания, <i>град</i>	$\alpha = 8,5$		
Минимальный угол погасания, <i>град</i>		$\beta_{И-1} = 15$	$\beta_{С-1} = 15$
Сопротивления участков линии, <i>о.м</i>	$R_1 = 10,5$ $R_2 = 5,25$		

Таблица 2

Результаты расчета установившегося режима

Системы	№№ узлов	Параметры режима				Примечание
		<i>P, Мвт</i>	<i>Q, Мвар</i>	<i>U, кВ</i>	<i>δ, град</i>	
<i>a = I</i>	1	513	363	230	0	узел баланса
	2	350	90,7	235	11,58	
	3	750	275,7	335	16,33	
	4	120	40	301,2	-8,65	
	5	180	70	208,9	-7,78	
	6	250	50	311,6	4	
	7	1042	20	483	-10,43	
<i>a = II</i>	1	450	53,5	235	15,72	
	2	250	110	240	6,28	
	3	-280	-100	502,7	-0,22	
	4	-450	90	321,2	-5,95	
	5	-420	80	316,3	-6,78	
	6	-240	50	221,2	-2,88	
	7	710,9	171,7	511,6	2,28	
ПНТ	1	1042	501,1	483	-10,13	$K_{Ta} = 1,05$
	2	1037,8	96,2	160	-1,37	$\gamma_{\pi} = 8,65$
	B	1037,8	0	636,7	—	$\gamma_{\pi} = 20,3$
	C	302	0	619,5	—	$\gamma_{\pi} = 21,27$
	C+1	302	120	517,8	-1,37	$I_{\alpha} = 1160a$
	C+2	300	172	516	2,4	$I_{\alpha} = 1630a$
	H	712,3	0	613,1	—	$I_{\alpha} = 470a$
	N	712,3	-357,7	511,8	-1,37	$\gamma_{\pi} = 20,58$
	N+1	710,9	-493,8	511,8	2,28	$K_{Ta} = 1$

Заданные параметры режима — по два для каждого независимого узла многополюсников $\alpha = I, II$ — приводятся в табл. 2 (исходные параметры отмечены курсивом). Мощность промежуточного отбора мощности принята $S_{\Pi} = 300 + j 200$. Реактивная мощность, потребляемая промежуточной преобразовательной подстанцией и нагрузкой, покрывается местными источниками реактивной мощности. В табл. 2 приводятся результаты расчета у. р., полученные за 14 циклов итерации при заданном небалансе в узлах многополюсников $\alpha = I, II$ в 0,5 Мва. С третьего цикла итерации в расчет введен коэффициент $\beta = 0,5$. Общее число вычислительных операций оказалось равным 720 тыс.

Выводы

1. Предлагаемый алгоритм расчета у.р. двух энергосистем, связанных передачей постоянного тока с промежуточным отбором мощности, позволяет учесть как сложную структуру примыкающих энергосистем, так и конфигурацию и режим работы регулируемых преобразовательных подстанций ПНТ.

2. Выполненные практические расчеты по разработанной программе указывают на эффективность использования предлагаемого алгоритма.



ՉՈՒԳԱՆՆԵՐ ՄԻՈՑՍՄԱՆԵՐ ՀՅՈՒՄՈՒԹՅԱՆ ՄԵԶԱՆԿՅԱԼ ԱՌԻՄՍԻՎ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ
 ՀՈՍԱՆՔԻ ԳՅՈՒՎ ԿԱՊՎԱՆ ԵՐԿՈՒ ԷՆԵՐԳՈՂԱՍՏԱԿԱՐԿԵՐԻ
 ԳԱՅՈՒՆԱՑՎԱՆ ԻՌԵՐԻՐԻ ՀԱՆՎԱՐԳԻ

Ս Վ Ի Ն Փ Ո Ւ Մ Վ

Հոդվածում աստղարկված է զուգահեռ միացմանը հարաբերյալ միջանկյալ առումով հաստատուն հասանքի գծով կապված երկու էներգամատակարարչի կաշունացված սեմիոնի հաշվարկի ալգորիթմը, որը հնարավորություն է տալիս հաշվի առնելու ինչպես կցված էներգամատակարարչի բարդ կառուցվածքը, այնպես էլ կարգավորվող փոխակերպիչ էլեկտրատեղակայումների աշխատանքային սեմիոնները: Մշակված ձրագրով կատարված գործնական հաշվարկները հաստատում են աստղարկված ալգորիթմի կիրառության էֆեկտիվությունը:

Լ Ի Տ Ի Ր Ա Տ Ր Ա Ր Ա

1. Электрические системы под ред. Велкова В. А., т. III, 1972.
2. Пикер А. В. Схеми и режимы электропередач постоянного тока, «Энергия», 1973.
3. Анонц Г. 1. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистемы с учетом нелинейных характеристик генератора и нагрузок, «Электричество», № 2, 1970.
4. Качанова Н. А., Умедович В. В. Программа расчета установившегося электрического режима энергосистемы с учетом статических характеристик нагрузок ГС. «Применение вычислительных машин для анализа устойчивости и токов короткого замыкания в электрических системах», Киев, 1968.
5. Анонцов В. А. Метод расчета статических характеристик электропередач постоянного тока с учетом сложной структуры примыкающей энергосистемы. Известия ИИИИИТ, № 16, 1970.
6. Hingorani N. G., Nounford J. D., Simulation of h. v. d. c. systems in a. c. load—flow analysis by digital computers, „Proc. Inst. Electr. Eng.,” 113, №9, 1966.
7. Horigome Takashi, Ito Noboru, Digitalcomputer method for the calculation of power flow in an a. c.—d. c. interconnected power system, „Proc. Inst. Electr. Eng.,” 111, №6, 1964.