

УДК 621.316.11

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАРЬЕРНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

С. А. Алаторцев, К. Б. Мусс, Н. К. Смирнов

Моделирование энергосистем. Правильное и надежное построение системы электроснабжения и распределение электрической энергии, исследование режимов этих систем в целом и отдельных элементов в частности, упрощение расчетов и выбор оптимальных параметров могут быть достигнуты физическим моделированием.

До настоящего времени физического моделирования карьерных распределительных сетей еще не было. Опубликованные исследования [Веников, 1956; Электродинамическое моделирование, 1959; Важнов, 1961; Азарьев, 1962; Щуцкий, Чеботаев, 1962] относятся к моделированию мощных энергетических систем постоянного и переменного тока протяженностью до нескольких тысяч километров и шахтной кабельной сети протяженностью в несколько сотен метров.

Выбор параметров модели. При моделировании карьерной распределительной сети кафедрой электрификации горных предприятий Ленинградского горного института принята Т-образная схема замещения. Число ячеек определяется с помощью так называемых коэффициентов Кеннели [Электродинамическое моделирование, 1959]

$$k_1 \approx 1 + \frac{\omega_c^2 l^2}{12v^2 n^2}, \quad k_2 \approx 1 - \frac{\omega_c^2 l^2}{6v^2 n^2},$$

где ω_c — синхронная частота, сек^{-1} ; l — заданная длина линии, км; v — скорость распространения электромагнитных волн, равная скорости света; n — число ячеек.

Коэффициенты Кеннели представляют собой коэффициенты пропорциональности между удельными параметрами линии и модели при заданной частоте. Изменение этих коэффициентов в заданной полосе угловых частот $\Delta\omega$ не должно превышать 5%, т. е. при изменении синхронной частоты ω_c на $\Delta\omega$ имеем

$$|\Delta k_2| = \frac{[(\omega_c + \Delta\omega)^2 - \omega_c^2] l^2}{6v^2 n^2} \approx \frac{2\omega_c \Delta\omega l^2}{6v^2 n^2}.$$

Считая, что $\frac{\Delta k_2}{k_2} \leq 0,005$, получим формулу для определения числа ячеек по заданной частоте

$$\frac{l}{n} \leq \frac{v}{\omega_c} \sqrt{\frac{0,15 \omega_c}{\Delta\omega + 0,025 \omega_c}}, \quad (1)$$

где $\Delta\omega \approx 20/T$ — заданная полоса угловой частоты; T — период изменения переменной величины.

Задаваясь значениями $\Delta\omega$ и соответствующей длиной линии, можно определить необходимое число ячеек n , требуемых для моделирования переходных и установившихся процессов с определенной частотой Δf . Как показали расчеты (табл. 1), для исследования переходного процесса с постоянной времени $T = 0,00001$ сек достаточно одной ячейки при условии моделирования одной ячейкой отрезка линии длиной не более 5 км.

Таблица 1

Определение числа ячеек в зависимости от заданной угловой частоты и длины линии

$T, \text{сек}$	$\Delta\omega, \text{сек}^{-1}$	$\Delta f, \text{гц}$	$\frac{l}{n}$	n при l , равном (км)			
				1	2	3	5
0,00001	2 000 000	318 000	4,64	0,216	0,43	0,65	1,08
0,0001	200 000	31 800	14,6	0,0685	0,137	0,205	0,342
0,001	20 000	3 180	46,4	0,0216	0,0432	0,0648	0,108
0,005	4 000	638	104	0,009	0,019	0,03	0,05
0,01	2 000	318	146	0,007	0,014	0,02	0,03
0,02	1 000	159	206	0,005	0,01	0,015	0,024
0,05	400	63,8	326	0,003	0,006	0,009	0,015
0,1	200	31,8	464	0,002	0,004	0,006	0,01
0,2	100	15,9	630	0,0016	0,0032	0,0047	0,009
0,5	40	6,38	945	0,001	0,002	0,003	0,006

Для воспроизведения на модели всех вариантов, возможных при электроснабжении открытых горных разработок, модель карьерной распределительной сети должна удовлетворять следующим требованиям: 1) моделировать необходимо воздушные и кабельные линии по трем эксплуатационным напряжениям 35, 6, до 1 кв; 2) конструкция модели должна предусматривать возможность моделирования свободных составляющих переходного процесса при однофазном замыкании на землю; 3) кроме параметров прямой и обратной последовательности фаз следует моделировать также параметры нулевой последовательности; 4) предусматривать возможность моделирования существующих типовых схем электроснабжения открытых горных разработок — фронтально-продольных, поперечно-фронтальных, комбинированных бортокольцевых; 5) первоначальным вариантом должно быть одностороннее питание, впоследствии

Таблица 2

Параметры модели карьерной распределительной сети

Моделируемое напряжение, кв	Моделируемая длина линий, км		Моделируемое сечение проводов, мм ²	Материал провода или марка гибкого кабеля
	общая	одной ячейкой		
Воздушная линия				
До 1,0	3	1	16—120	Медь
6,0	18	2	16—120	Алюминий
35,0	6	3	25—120	Алюминий
Кабельная линия				
До 1,0	0,50	0,25	10—95	ГРШЭ
6,0	0,75	0,25	25—95	КШВГЭ

возможно двухстороннее и многостороннее; 6) нагрузки необходимо подключать как со стороны питающих гибких кабелей, так и непосредственно к воздушным линиям; 7) следует обеспечить достаточную точность моделирования режима сети при изменении нагрузки от 0,5 до 1,5 номинальной; 8) в качестве понижающих трансформаторов принять модели ТМ-5600/35 и ТМ-560/6. Исходные параметры моделирования карьерной распределительной сети сведены в табл. 2.

Определение масштаба параметров модели. Согласно методике выбора масштаба параметров модели [Важнов, 1961], наиболее целесообразен масштаб 0,3—1,2. Максимальный масштаб 1,2 соответствует максимальному значению индуктивного L и активного R сопротивления, минимальное же значение 0,3 — величине емкости.

Мощность районных систем P_c , питающих открытые горные разработки, составляет в среднем 20—25 $Мв \cdot а$ при напряжении $u_c = 35$ $кв$. Отсюда параметры оригинала принимаем $P_c = 20$ $Мв \cdot а$, $u_c = 35$ $кв$, при номинальном токе $I_c = 330$ $а$, а ток и напряжение модели соответственно $I_m = 3,3$ $а$ и $u_m = 350$ $в$. Тогда масштаб параметров модели для напряжения

$$m_u = \frac{u_m}{u_o} = \frac{350}{35 \cdot 10^3} = 10^{-2}, \quad (2)$$

для тока

$$m_i = \frac{I_m}{I_o} = \frac{3,3}{330} = 10^{-2}, \quad (3)$$

для мощности

$$m_p = \frac{P_m}{P_o} = m_u m_i = 10^{-4} \quad (4)$$

или

$$P_m = 20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 2000 \text{ в} \cdot а,$$

для сопротивления

$$m_z = \frac{Z_m}{Z_o} = \frac{m_u}{m_i} = 1. \quad (5)$$

Выбранный масштаб сопротивлений $m_z = 1$ позволяет сохранить значения $Z_o = Z_m$, что значительно упрощает расчеты. Полученная базисная мощность модели при общем напряжении всей модели, равном 350 $в$, позволяет использовать стандартный трансформатор типа ТС-380/220. Для этого на стороне сети 380 $в$ даны соответствующие отпайки, а напряжение от сети 220 $в$ подается на вторичную обмотку.

Расчет параметров модели. Параметры воздушных и кабельных линий рассчитывали для прямой и нулевой последовательностей. Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности линий принимали по справочным данным. Емкостную проводимость фазы воздушной линии и активную проводимость фазы кабельной линии определяли по формулам [Мельников, 1950; Фотин, 1958]. Параметры нулевой последовательности определяли в соответствии с существующей методикой [Фотин, 1958; Ульянов, 1964]. В качестве примера в табл. 3 приведены параметры воздушной и кабельной линий. Модель выполнена в соответствии с поставленными требованиями. Параметры линии изменяли соответствующими отводами от активно-индуктивных сопротивлений, а емкости фаз — переключением переключателя на требуемое значение. Катушки индуктивности выполнены с незамкнутым железным сердечником из стали Э-320 с учетом работы на прямолинейной части характеристики. Отсутствие замкнутого контура позволило получить $L = \text{const}$ при токах модели 1,5—4 $а$, при соответствующих размерах сердечников и числе витков катушек.

Параметры воздушных и кабельных линий сечением 50 мм
для прямой и нулевой последовательностей при 1,6 и 35 кВ

Прямая последовательность					Нулевая последовательность		
R ,	L , мгн	C , пф	x , ом	b , $\frac{1}{\text{ом}}$	$C_{\text{доб}}$, пф	$L_{\text{доб}}$, мгн	$q_{\text{доб}}$, ком
Воздушная линия							
0,195	0,54	10 700	0,341	3,36	2320	0,710	
0,39	1,17	19 700	0,738	6,18	4240	1,345	
0,585	2,02	25 700	1,269	8,07	5520	1,851	
Кабельная линия							
0,05	0,158	0,025	49,4	0,0158	14 500	0,0201	380
0,05	0,090	0,033	32,5	0,0208	2 400	0,033	680

Примечание. Длина воздушной линии для напряжений 1,6 и 35 кВ соответственно 1,2 и 3 км; длина кабельной линии 250 м; обозначения см. рис. 2.

С целью проверки возможности замены в модели катушек с воздушными сердечниками катушками с железными сердечниками были предварительно собраны две идентичные цепочные схемы с 8 катушками на фазу. Каждая катушка моделировала 1 км воздушной линии.

Как показало осциллографирование, наличие железного сердечника лишь незначительно влияет на характер переходного процесса.

Индуктивность, как известно, является функцией

$$L = F(\mu, S, i, w),$$

где μ — магнитная проницаемость среды; S — поперечное сечение сердечника катушки; i — номинальный ток катушки; w — число витков катушки.

На основании этой зависимости и неоднократных совпадений результатов, полученных в процессе опыта при определении индуктивности катушек с различными параметрами, выведены эмпирические формулы определения числа витков

$$w = 5,01 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{L d_{\text{пр}}}{S \mu_n}}, \quad (6)$$

поперечного сечения сердечника катушки

$$S = \sqrt{\frac{L \gamma 10^7}{I_n^2 \mu_n f}} \text{ см}^2 \quad (7)$$

и высоты сердечника

$$h = \frac{\sqrt{S}}{\beta} 10^2 \text{ мм}, \quad (8)$$

где L — заданная индуктивность, мгн; $d_{\text{пр}}$ — диаметр провода с изоляцией, мм; μ_n — начальная магнитная проницаемость, гс/э; I_n — номинальный ток катушки, а; f — частота сети, гц; γ — коэффициент, определяемый по графику рис. 1; β — коэффициент, зависящий от величины сердечника (большему значению S соответствует меньшее значение β); здесь $\beta = 2,6 \quad 3,5$.

Моделирование свободных составляющих. Для определения мест повреждения линии при замыкании фазы на землю уже рассматривалась возможность [Сирота, 1959; Мамонтов, 1962] использования свободных

составляющих переходного процесса при однофазном замыкании на землю.

С целью проверки этого предположения и определения возможности использования свободных составляющих в качестве средства воздействия на защиту в модели предусмотрена возможность моделирования свободных составляющих переходного процесса. Это моделирование осуществляется при помощи «расчетной схемы замещения», составленной на основании Т-образной схемы замещения и метода эквивалентного генератора (рис. 2). В модели предусмотрена возможность исследования распределительных сетей протяженностью 2 км и сечением 50 и 120 мм² с изолированной, глухозаземленной или заземленной через индуктивное или активное сопротивление нейтралью трансформаторов.

Наблюдение и осциллографирование свободных составляющих возможно в месте замыкания на землю, а также в поврежденной и неповрежденной фазах. Как видно из осциллограмм рис. 3, свободные составляющие в поврежденной и неповрежденной фазах имеют разноименные знаки. Это подтверждает наши расчеты, а также расчеты, приведенные у И. М. Сироты [1959].

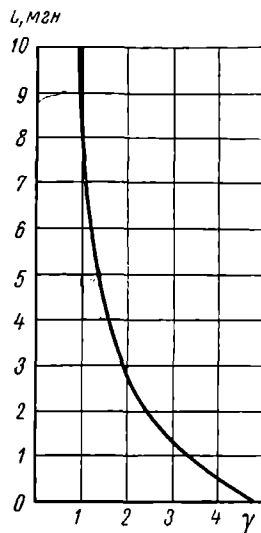


Рис. 1. Определение коэффициента γ .

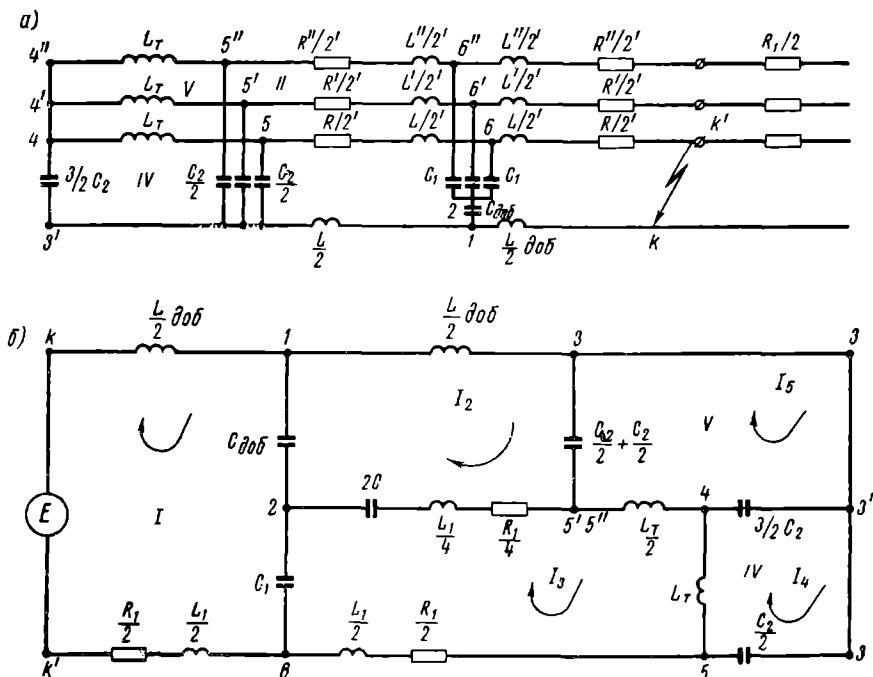


Рис. 2. Схемы замещения участка линии с трансформатором: Т-образная (а) и расчетная (б).

Моделирование силовых трансформаторов. Модели силовых трансформаторов, используемых в физических моделях электрических сетей, должны подробно воспроизводить основные электрические процессы.

Для выполнения условия подобия необходимо соблюдать условие совпадения потерь в стали и меди для модели и оригинала, т. е. выполнение условий $p_{ст} \text{ idem}$ и $p_{м} \text{ idem}$ в относительных единицах или определенном масштабе. В одном модельном трансформаторе невозможно получить одновременное совпадение характеристик холостого хода и равенство потерь короткого замыкания. Поэтому трансформаторы для физических моделей электрических сетей подразделяют на два типа: 1) трансформаторы с подобием потерь короткого замыкания, но с нарушением характеристик холостого хода; 2) трансформаторы с подобием характеристик холостого хода, но с нарушением характеристик потерь короткого замыкания. Первый тип трансформаторов используется при исследовании динамической устойчивости линий электропередач, второй при анализе режимов [Веников, 1956; Электродинамическое моделирование, 1959].

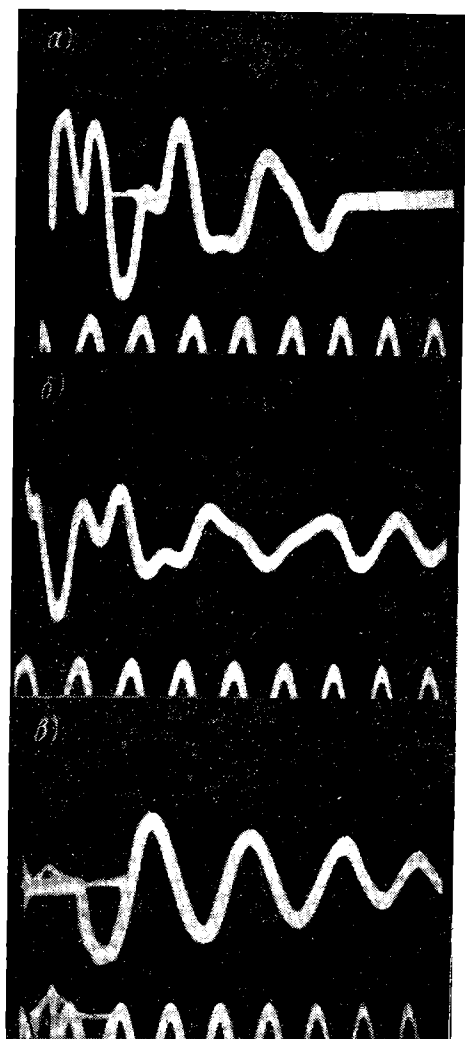


Рис. 3. Осциллограммы свободных составляющих переходного процесса в месте замыкания на землю (а), в поврежденной (б) и неповрежденной (в) линиях.

Используя принятую ранее методику (формулы 2—5), получим при моделировании трансформатора ТМ-5600-6/0,4 кв масштаб: для напряжения $m_u = 5,83 \cdot 10^{-2}$; для тока $m_i = 6,48 \cdot 10^{-2}$; для сопротивления $m_z = 0,9$; для мощности $m_p = 37,8 \cdot 10^{-4}$, $p_m = 2,12 \text{ кв} \cdot \text{а}$.

При моделировании трансформатора ТМ-5600-35/6 кв масштаб: для напряжения $m_u = 10^{-2}$; для тока $m_i = 3,78 \cdot 10^{-2}$; для сопротивления $m_z = 0,266$; для мощности $m_p = 3,78 \cdot 10^{-4}$, $p_m = 2,12 \text{ кв} \cdot \text{а}$.

Таким образом, мощности модельных трансформаторов не выходят за пределы базисной мощности модели.

В соответствии с выбранным масштабом реальные трансформаторы перерасчитаны на модельные (табл. 4).

Исходя из изложенных выше утверждений о невозможности мо-

делирования в одном трансформаторе одновременно потерь в стали и меди, спроектирован трансформатор с коэффициентом трансформации $K = 1$, моделирующий потери в меди, и дроссель, включенный параллельно трансформатору, моделирующий потери в стали. Трансформаторы моделированы холоднокатаной сталью Э-330.

Модельные трансформаторы проектировались предварительным подбором веса меди и размеров сердечника, исходя из требуемого условия

Параметры реальных и модельных трансформаторов

Тип трансформатора	X_H^* , ом	Z_K , ом	X_K , ом	I_H , а	u_K , в	P_M , в·а	r_M , ом	X_M , ом	I_M , а	u_M , в	$P_{ст}$, в·а
ТМ-560	68	0,926	2,9	51,0	270	7200	308	2450	2,55	6300	2000
Модель ТМ-560	61	0,83	2,61	3,3	34	27,2	278	2200	0,165	367	7,55
ТМ-5600	224	2,35	16,5	90	2620	57 000	1130	8560	4,05	—	18 500
Модель ТМ-5600	59,6	0,625	4,38	3,3	26,2	21,6	300	2280	0,153	—	7,0

* X_H , I_H — соответственно номинальные индуктивное сопротивление и ток; X_K , Z_K , u_K — индуктивное и полное сопротивления и напряжение в режиме короткого замыкания; r_M , X_M , I_M , u_M — активное, индуктивное сопротивления, напряжение и ток в режиме холостого хода; P_M , $P_{ст}$ — потери в меди и потери в стали трансформаторов.

подобия $p_M = idem$ или $p_{ст} = idem$ с последующим контрольным расчетом трансформатора (дросселя). В целях снижения намагничивающего тока и потерь в стали при расчете принята индукция в магнитопроводе заниженная до 10 000 гс. Расчет производили по обычным формулам [Ермолин, 1957].

Моделирование нагрузки. Так как исследовались быстропротекающие процессы, когда переходные процессы в электрических машинах еще не внесли соответствующих искажений в линии, нагрузка моделируется при

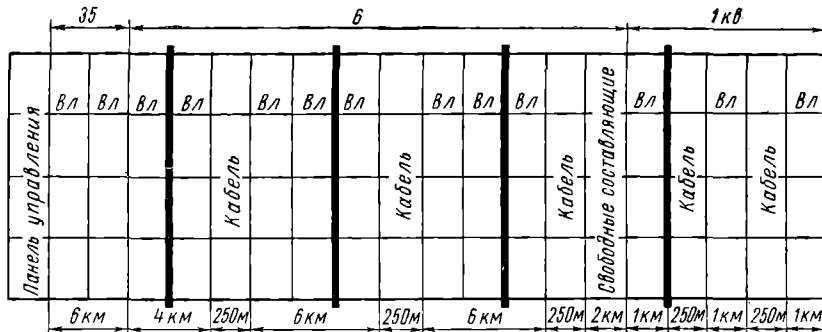


Рис. 4. Структурная схема модели.

помощи статических трехфазных элементов, состоящих из катушек индуктивностей и активных сопротивлений (реостатов). Место подключения нагрузки — гибкие кабели.

Число нагрузочных элементов выбираем равным числу кабелей, т. е. соответственно 3 элемента в сети 6 кВ и 2 элемента в сети 0,38 кВ. Нагрузочные элементы рассчитаны, исходя из величины номинального тока модели $I_H = 3,3$ а: на каждый трехфазный элемент 0,66 а.

Конструкция физической модели. Элементы модели расположены в ячейках размером $250 \times 250 \times 400$ мм. Общее число ячеек 80. Расположение ячеек по выполняемым функциям показано на рис. 4. Модельные трансформаторы, нагрузочные элементы и базисный трансформатор находятся под моделью в столе, на котором установлена сама модель. Модель и стол сверху облицованы гетинаксом.

Параметры, соответствующие тому или иному сечению линии, изменяются переключателями типа ПР. Катушки индуктивности с целью исключения влияния на них металлического каркаса расположены примерно в средней части вертикальной плоскости ячейки. Взаимовлияние катушек исключается расположением их по всей модели в шахматном порядке. Такое расположение катушек было выбрано на основании проведенных измерений влияния металлического каркаса на катушку и на группу катушек, а также катушек друг на друга. Креплением катушек в ячейках служат картонные каркасы, приклеенные к нижней части ячейки. Как видно из результатов расчета (табл. 3), значения индуктивностей для моделирования гибких кабелей представляет собой по сравнению с R и C незначительную величину, и ими можно пренебречь.

Активные сопротивления подобраны с учетом сопротивления витков самой катушки индуктивности и монтажных проводов. Конденсаторы и активные сопротивления, моделирующие емкостную проводимость в воздушных и кабельных линиях и активную проводимость в кабельных линиях, напаяны непосредственно на переключатели.

Выводы

1. Впервые созданная физическая модель карьерной распределительной сети дает возможность производить любые исследования электрических сетей различного сечения, длины и конфигурации.

2. Приведенные эмпирические формулы и методика расчета позволяют рассчитывать катушки индуктивности с железными сердечниками.

3. Индуктивность и добротность таких катушек в среднем в три раза выше индуктивности и добротности такой катушки без железного сердечника.

4. Вес меди катушки с железным сердечником в 6—7 раз меньше веса меди эквивалентной катушки без сердечника.

5. Разработанная методика моделирования силовых трансформаторов позволяет получать одновременно $P_{ст} = idem$ и $P_m = idem$ без смены трансформаторов.

ЛИТЕРАТУРА

Азарьев Д. И. Математическое моделирование электрических систем. Госэнергоиздат, 1962.

Важнов А. И. Электродинамическая модель энергосистемы. Госэнергоиздат, 1961.

Веников В. А. Физическое моделирование электрических сетей. Госэнергоиздат, 1956.

Ермолин Н. П., Ваганов А. П. Расчет маломощных трансформаторов. Госэнергоиздат, 1957.

Мамонтов О. В. Методы кибернетики в теории электронных защит. Госэнергоиздат, 1962.

Мельников Н. А. Расчеты режимов работы сетей электрических систем. Госэнергоиздат, 1950.

Сирота И. М. Переходные процессы в компенсированной сети при замыкании фазы на землю, Тр. ИЭ АН УССР, вып. 6, 1959.

Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Энергия, 1964.

Фотин В. П. Повышение напряжения в длинных линиях при несимметричных замыканиях на землю. Госэнергоиздат, 1958.

Шуцкий В. И., Чеботаев Н. И. Моделирование шахтных электрических сетей низкого напряжения. Научн. тр. МГИ, № 42, 1962.

Электродинамическое моделирование энергетических систем, Изд-во АН СССР, 1959.