

УДК 621.316.99:614.825

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Е.Г. Алаев, Ю.В. Дёмин, А.И. Мозилов, Л.В. Садовская, Л.Д. Сафрошкина, Е.Ю. Кислицын, Г.В. Иванов

Новосибирская государственная академия водного транспорта, г. Новосибирск

E-mail: ngavt@ngs.ru

Предложена методика определения параметров электробезопасности заземляющих устройств с числом элементов более 1000. Исследовано влияние искажающих факторов на точность определения потенциалов на металле, на напряжение прикосновения и на электромагнитную обстановку.

Основное количество электроустановок энергетических систем страны построено в прошлом веке, когда широко использовалось достаточно надёжное оборудование. Как показала многолетняя эксплуатация, оно мало чувствительно к электромагнитным помехам.

В настоящее время в электроэнергетику активно внедряются программно-технические комплексы: автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии [1], а также различные микропроцессорные устройства. Для их надёжного функционирования требуется создание благоприятной электромагнитной обстановки, которая во многом определяется параметрами заземляющего устройства (ЗУ). Параметры ЗУ определяют и условия безопасной эксплуатации электроустановок.

Проблема электромагнитной совместимости возникла в связи с тем, что все звенья электроустановки находятся в электрической или электромагнитной связи. Как отмечается в многочисленных исследованиях М.В. Матвеева, М.К. Костина, А.Г. Овсянникова и др. [2], например, компьютерная техника весьма требовательна к электромагнитной обстановке: к уровню электромагнитных полей, импульсных помех, качеству питания и заземления. Авторы отмечают, что на объектах ОАО «Амурэнерго», «Бурятэнерго», «Читаэнерго» и др. опасные влияния выявлены на более чем 80 % электроустановок. Большинство проблем связано с молниезащитой (40 % объектов), потенциалами на устройствах (ЗУ) при коротких замыканиях в высоковольтной сети (35...40 %), неудовлетворительным состоянием металлических связей в пределах ЗУ (более 30 % объектов).

Исследованиями Сибирского НИИ Энергетики на подстанциях 1150 кВ «Кокчетавская», 500 кВ «Амурская», «Заря» и др. установлено, что при коммутациях высоковольтного оборудования и коротких замыканиях электромагнитные помехи, возникающие за счет потенциалов поступающих из цепи питания и мест заземления, являются доминирующими при воздействии на цифровую технику. Поэтому обязательным условием использования любой цифровой техники является её сертификация по электромагнитной совместимости и электробе-

зопасности согласно действующим стандартам (ГОСТ Р 508 39-95; Р 50628-93 и Р 50377-92). Сопоставление параметров электромагнитной обстановки и действующих стандартов на цифровую технику позволяет сформулировать требования к ЗУ, необходимые для обеспечения как надёжной, так и безопасной работы электрооборудования, в том числе и цифровой техники. Практика показывает, что на всех этапах создания АСУТП от обследования, проектирования до реализации и эксплуатации, указанная проблема остаётся вне поля зрения специалистов и является актуальной.

В настоящей статье представлена методика расчёта и оценки влияния электромагнитных помех на параметры электробезопасности ЗУ в электроэнергетических системах. Следует выделить:

- разработку способа расчёта параметров электробезопасности ЗУ с числом элементов более 1000;
- исследование влияния искажающих факторов на точность определения потенциалов на металле и на напряжение «до прикосновения».

Поскольку на электромагнитную совместимость оказывают влияние потенциалы на металле и напряжение прикосновения (напряжение «до прикосновения»), необходимо выполнить их предварительный расчёт с учётом влияния токового электрода. Такой расчёт осуществлён с помощью программы «Поток» (СибНИИЭ, г. Новосибирск) и приведен в табл. 1.

В табл. 1, п. 4, напряжение «до прикосновения» получилось отрицательным, что лишено физического смысла. Предложено вместо потенциала на поверхности металла брать потенциал грунта в непосредственной близости от поверхности металла.

Как показал анализ, расчёты напряжения «до прикосновения» вблизи узлов ячейки дают явно заниженные значения, а вблизи середины — завышенные. Причины этого кроются в методических погрешностях расчётной модели.

С целью повышения точности может быть использовано три способа расчёта:

- **Прямой.** Рассчитывают три значения напряжения «до прикосновения» для искусственных заземлителей: вблизи концевых узлов и около середины; среднее значение (начало + середина) и (середина + конец).

- «**Относительный**». Рассчитывают потенциалы на поверхности грунта (U_i) и в ближайшей точке от поверхности искусственного заземлителя, определяют их разность.
- «**Однократного интегрирования**». Определяют поперечные сопротивления элементов ЗУ с помощью однократного интегрирования по длине элемента от начального до конечного узла – с последующим осреднением. Расчёты $U_{ЗУ}$ и $U_{Г}$ выполняются идентично, что позволяет снизить погрешность до 10 %.

Таблица 1. Расчёт потенциалов на металле и напряжений «до прикосновения» с учётом расстояния до токового электрода

Вид расчёта	Потенциал, В, на поверхности металла (точка № 1)	Потенциал, В, на поверхности грунта (вблизи точки № 1 на металле)	$U_{Гр}$, В, ($U_{Гр} = U_{Г}$), п. 2, п. 3	Потенциал, В, на поверхности грунта (точка № 2)	Разность потенциалов, В, ($U_{ГЗ} - U_{Г1}$)	Примечание
Без учёта влияния токового электрода (ТЭ)	0,510	0,530	-0,020	0,493	0,037	ЗУ эквипотенциально
С учётом влияния ТЭ, разнос 100 м	0,342	0,362	-0,020	0,258	0,104	0,104/0,037≈3 Увеличение в 3 раза
С учётом влияния ТЭ, разнос 200 м	0,429	0,443	-0,020	0,401	0,048	Увеличение к 0,037 на 23 %

Примечание: 1. Расчётный ток принят 1 А. 2. Расчётная модель заземлителя: решётка – 100×100 м², ячейка – 25×25 м², удельное сопротивление грунта – 100 Ом·м, глубина решётки – 0,5 м, диаметр заземлителя – 0,04 м

Третий способ расчёта даёт приемлемую точность для ограниченного числа рассчитываемых элементов ЗУ (обычно закладывается в расчёт не более 100...200 элементов, хотя фактически их число на крупных подстанциях может достигать нескольких тысяч).

В настоящей статье предложен переход на итерационный метод определения параметров ЗУ, позволяющий увеличить число рассчитываемых элементов до нескольких тысяч.

Расчёт параметров электробезопасности ЗУ с числом элементов более 1000

1. Эквипотенциальное ЗУ

Расчёт эквипотенциального ЗУ сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} \|R_{ij}\| \times \|\bar{I}_j\| = U_0 \\ \sum_{j=1}^N \bar{I}_j = I_0 \end{cases},$$

где R_{ij} – собственные и взаимные сопротивления растеканию; \bar{I}_j – стекающие с элементов (поперечные токи); I_0 – вводимый в заземлитель ток; U_0 – общий потенциал заземлителя.

На первом шаге итерации токи с элементов принимаются равными \bar{I}_j – стекающие с элементов (поперечные токи); I_0 – вводимый в заземлитель ток; U_0 – общий потенциал заземлителя.

На первом шаге итерации токи с элементов принимаются равными $\bar{I}_j^{(1)} = I_0/N$ подсчитывается среднее значение потенциала

$$U_0^{(1)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^{(1)}.$$

Далее находятся разности потенциалов ($U_i^{(1)} - U_0^{(1)}$), в соответствии с которыми корректируются токи:

$$\Delta \bar{I}_i^{(1)} = 0,5(U_i^{(1)} - U_0^{(1)}) / R_{ii}.$$

После этого проводятся следующие циклы итераций до тех пор, пока величина потенциала на каждом элементе $U_i^{(n)}$ не совпадёт с их средним значением $U_0^{(n)} \cong U_0$ с заданной точностью. Расчёты показали, что число итераций для 1250 элементов не превышает 10. Определив величину стекающих с элементов токов, рассчитывают напряжения «до прикосновения».

2. Неэквипотенциальное ЗУ

При расчёте неэквипотенциального ЗУ используется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \|R_{ij}\| \times \|\bar{I}_j\| = \|U_i\| \\ \sum_{j=1}^N \bar{I}_j = I_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $U_i = (U_i^H + U_i^K) / 2$, U_i^H и U_i^K – значения потенциалов в начальном и конечном узле i -го элемента; $\bar{I}_i = I_i^H - I_i^K$, I_i^H и I_i^K – продольные токи в начале и в конце i -го элемента.

Вводится вторая система уравнений, связывающая падение напряжений \bar{U}_i с продольными сопротивлениями и токами, из решения которой, при условии пренебрежения индуктивными связями между элементами ЗУ, определяются сопротивления Z_{ii}

$$\|Z_{ii}\| \times \|I_i\| = \|\bar{U}_i\|, \quad (2)$$

где Z_{ii} – суммарное продольное сопротивление i -го элемента, $I_i = (I_i^H + I_i^K) / 2$, $\bar{U}_i = U_i^H - U_i^K$.

Совместное решение системы ур. (1) и (2) выполняется способом узловых потенциалов.

При итерационном способе решения задачи расчёты для n -го узла запишутся в виде:

$$U_n^{(1)} \sum_{i=1}^4 (G_i + g_i / 4) - \sum_{i=1}^4 (G_i - g_i / 4) U_i = I_0,$$

где G_i – суммарная продольная проводимость i -го элемента, примыкающего к n -му узлу; g_i – поперечная проводимость i -го элемента; U_i – потенциал на противоположном от n -го узла конце этого элемента; i – число примыкающих к n -му узлу металлических элементов (не более 4-х). Величины сопротивлений R_0 , Z_{ii} и проводимостей G_i и g_i следует определять в соответствии с методикой [3].

Положив на первом итерационном цикле $U_i=U_0$ (как и в случае эквипотенциального ЗУ), получим первое приближение для значения входного потенциала ЗУ:

$$U_n^{(1)} = \frac{I_0 + U_0 \sum_{i=1}^4 (G_i - g_i / 4)}{\sum_{i=1}^4 (G_i + g_i / 4)}$$

Далее определяются потенциалы $U_k^{(1)}$ на противоположных от n -го узла концах i -ых элементов по уравнению

$$U_{ik}^{(1)} = \frac{U_n^{(1)}(G_i - g_i / 4) + U_0 \sum_{j=1}^3 (G_j - g_j / 4)}{(G_i + g_i / 4) + \sum_{j=1}^3 (G_j + g_j / 4)},$$

где G_j и g_j – продольные и поперечные проводимости для примыкающих к i_k -му узлу j -ых элементов; G_i и g_i – продольные и поперечные проводимости для i -ых элементов, примыкающих к n -му узлу.

Предлагаемая итерационная модель проверялась на решётчатом ЗУ площадью $S=100 \times 100 \text{ м}^2$ с ячейками $S_0=25 \times 25 \text{ м}^2$. ($I_0=1 \text{ А}$, $L_3=25 \text{ м}$, $r_3=2 \text{ см}$, $H_3=50 \text{ см}$). Расчёты выполнялись для удельных сопротивлений грунта: $\rho_r=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (эквипотенциальный заземлитель) и $\rho_r=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (неэквипотенциальный заземлитель), результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения стекающих токов I_i , мА, для эквипотенциальной расчетной модели и узловых потенциалов U_n , мВ, для неэквипотенциальной расчетной модели

Токи	Эквипотенциальная расчётная модель		Неэквипотенциальная расчётная модель		
	Аналитическое решение	Итерационное	Потенциалы	Аналитическое решение	Итерационное
I_1	17,11	17,09	U_1	58,55	58,51
I_2	18,31	18,37	U_2	52,58	52,70
I_3	21,62	21,65	U_3	51,10	51,26
I_4	22,76	22,79	U_4	50,61	50,79
I_5	29,59	29,47	U_5	50,12	50,30
I_6	34,97	34,82	U_6	49,70	49,87

Данные табл. 2 свидетельствуют о достаточно высокой сходимости результатов аналитических и итерационных расчётов.

Влияние искажающих факторов на точность определения параметров электробезопасности ЗУ

Ниже представлены результаты исследований влияния искажающих факторов на значения потенциалов на металле ($U_{ме}$), в грунте (U_r) и на напряжения «до прикосновения» ($U_{дп}$), что позволяет оценить эквипотенциальность ЗУ и электромагнитную обстановку на объекте. Анализу были подвергнуты следующие факторы:

- влияние измерительной схемы – расположения токового и потенциального электродов;
- магнитное влияние измерительной токовой линии;
- влияние нелинейности внутреннего продольного сопротивления стальных искусственных заземлителей;
- влияние неэквипотенциальности ЗУ на электромагнитную обстановку;
- влияние частоты измерительного тока.

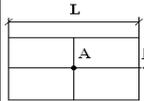
Точность расчётов оценивалась как на теоретических, так и на практических моделях. Погрешность выполненных расчётов не превышала 10 %.

Основные результаты

В результате исследований установлено:

1. Существенное влияние схемы измерения на значения потенциалов на металле, в грунте и на напряжение «до прикосновения», см. табл. 1 и 3. Выявлено, что при минимальном расстоянии между электродами ($AB/L=1$) наблюдается «занижение» значений $U_{ме}$ на 30 %, U_r на 50 % и $U_{дп}$ на 60...80 %. Для снижения погрешности предложены формулы нахождения «0» для размещения в этой точке потенциального электрода: при ($AB/L \geq 2$, $AD_0=AB/2$), при ($AB/L < 2$, $AD_0=AB/2+L/12$).

Таблица 3. Влияние схемы измерения на «занижение» значений потенциалов на металле ($U_{ме}$), в грунте U_r и на напряжение «до прикосновения» ($U_{дп}$)

Вид ЗУ	Соотношение AB/L	$U_{ме}$, %	U_r , %	$U_{дп}$, %
 Эквипотенциальное ЗУ ($\rho_r = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)	1	30	50	60...80
	2	15	20	10
	3	10	15	<5

2. Существенное магнитное влияние токовой линии и нелинейности внутреннего продольного сопротивления на потенциалы на металле и напряжения «до прикосновения».

2.1. Максимальное значение потенциалов на металле наблюдается в месте ввода тока; к периферии – понижение потенциала на металле: 2,5 % для эквипотенциальных и 29,3 % для неэквипотенциальных ЗУ (табл. 4, 5).

2.2. Максимальное значение напряжения «до прикосновения» на периферии: увеличение на 15...20 % для эквипотенциальных и уменьшение в 1,5 раза для неэквипотенциальных ЗУ (табл. 4, 5).

3. Нелинейность внутреннего продольного сопротивления оказывает максимальное влияние для неэквипотенциальных заземлителей в области ввода тока 200 А, так имеет место увеличение $U_{дп}$ в 2,5 раза, а для $U_{ме}$ на 20...30 % к току 1 А и 5 кА.

Таблица 4. Расчёт влияния искажающих факторов на точность определения потенциалов, мВ, на металле стальных искусственных заземлителей и напряжения до прикосновения $U_{до пр.}$ для эквипотенциального ЗУ ($\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)

№ точек	Максимальное значение		Магнитное влияние токовой линии (ВЛ)		Влияние нелинейности внутреннего сопротивления		
	$U_{ме}$	$U_{до пр.}$	$U_{ме}$	$U_{до пр.}$	Ток, А	$U_{ме}$	$U_{до пр.}$
1	311	26,9	310	26,6	220	347	9,41
					1	337	5,88
					5000	338	5,89
2	304	34,8	307	35,3	200	328	19,8
					1	328	19,8
					5000	328	19,8
3	303	31,8	306	32,2	200	327	49,2
					1	327	49,3
					5000	326	48,9
Примечание	Понижен. к периферии на 2,5 %	Повышен. к периферии на 2,5 %	Очень слабое влияние	Повышен. к периферии на 24,6 %	-	Очень слабое влияние	Увеличение в месте ввода тока (т. 1) на 37,5 % к току 200 А

Таблица 5. Расчёт влияния искажающих факторов на точность определения потенциалов, мВ, на металле стальных искусственных заземлителей и напряжения до прикосновения $U_{до пр.}$ для неэквипотенциального ЗУ ($\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)

№ точек	Максимальное значение		Магнитное влияние токовой воздушной линии		Влияние нелинейности внутреннего сопротивления		
	$U_{ме}$	$U_{до пр.}$	$U_{ме}$	$U_{до пр.}$	Ток, А	$U_{ме}$	$U_{до пр.}$
1	35,5	4,52	34,6	4,29	220	51,8	4,6
					1	41,2	1,84
					5000	43,2	1,85
2	25,9	3,27	30,3	4,06	200	32,1	Остальные точки: нет влияния
					1	32,3	
					5000	32,6	
3	25,1	2,91	28,7		200	31,4	
					1	31,6	
					5000	31,9	
Примечание	Понижен. к периферии на 29,3 %	Понижен. к периферии в 1,5 раза	Увеличение под линией на 14,5 %			Увеличение в месте ввода тока 20...30 % (к току 200 А – 14,5 %)	Увеличение в месте ввода тока в 2,5 раза (при токе 200 А)
			Решётка: $S=150 \times 150 \text{ м}^2$; ячейки $24 \times 25 \text{ м}$; число ячеек 6×6 ; узлов 7×7 ; длина элемента 25 м ; диаметр элемента $0,04 \text{ м}$; глубина $0,5 \text{ м}$				

4. Влияние на электромагнитную обстановку при использовании эквипотенциальных ЗУ электроустановок (удельное сопротивление грунта $\rho_f=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и более; отличие потенциала в месте ввода тока и на периферии не более 5...10 %).

4.1. Вследствие хорошей проводимости металла и выравнивания потенциалов по металлу ухудшением электромагнитной обстановки можно пренебречь при всех видах помех.

4.2. Следует учитывать ухудшение электромагнитной обстановки при воздействии напряжения «до прикосновения», так как во всех случаях наблюдается увеличение потенциала на 20...40 %.

5. Влияние на электромагнитную обстановку неэквипотенциальных ЗУ электроустановок (удельное сопротивление грунта минимальное, например, $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, средняя неэквипотенциальность – 30 %, сильная – 40...50 %).

5.1. Имеет место ухудшение электромагнитной обстановки, так как наблюдается перепад потенциала по металлу на 15...30 %.

5.2. Следует учитывать существенное ухудшение электромагнитной обстановки при воздействии напряжения «до прикосновения», т. к. наблюдаются его изменения в 1,5...2,5 раза.

6. При использовании частоты 180 Гц (рабочая частота типового прибора ПИНП) для исследования неэквипотенциальных заземлителей ($\rho=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) было выявлено, что по отношению к уровню общих несимметричных напряжений (для третьей степени интенсивности электромагнитных возмущений) допустимая величина возмущений составляет от 0,5 до 10 В. Пересчет на реальный ток короткого замыкания, например, 5 кА, показывает, что величина электромагнитных возмущений превышает нормируемое значение более чем в 36 раз.

При сильной неэквипотенциальности (более 70 %) величина электромагнитных возмущений превышает нормируемое значение в 13 и более раз.

Заключение

Предложены итерационные методы расчёта параметров электробезопасности эквипотенциальных

и неэквипотенциальных заземляющих устройств. Выявлено, что значения потенциалов на металле, в грунте и напряжения «до прикосновения» могут в значительной степени зависеть от схемы измерения, магнитного влияния токовой линии, нелинейности внутреннего продольного сопротивления, а также от частоты тока в заземляющих устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовская Л.В., Палагушкин Б.В., Хромов Е.Г., Кислицын Е.Ю. Наводимые напряжения на кабельных линиях и электронном оборудовании АСУ ТП подстанций и рекомендуемые меры защиты // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. Омского гос. ун-та путей сообщения. – Омск, 2007. – С. 27–32.
2. Kostin M.K., Matveyev M.V., Ovsyannikov A.G., Verbin V.S., Zhivodernikov S. Some results of EMS investigation in Russian substations // Conseil International des Grands Reseaux Electriques, Session, 2002. – P. 36–103.
3. Кислицын Е.Ю., Иванов Г.В., Мозилов А.И., Садовская Л.В. Влияние электромагнитных помех на параметры электробезопасности заземляющих устройств, электроустановок и на электромагнитную обстановку // Под общ. ред. Ю.В. Демина. – Новосибирск: ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», 2007. – 22 с.

Поступила 11.02.2008 г.

УДК 621.372.4:537.52

МЕТОД РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДОВ СПЛОШНЫХ ПЛАСТИН И ПЛАСТИН С ОТВЕРСТИЕМ В ФОРМЕ КРУГА И ФОРМЕ СФЕРИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Ю.Н. Исаев, Е.О. Кулешова, О.В. Васильева, Д.А. Русол*

Томский политехнический университет

E-mail: kuleshova@elti.tpu.ru

*ОАО «НИПИ», г. Томск

Решается задача определения распределения зарядов на поверхности плоских и сферических пластин с отверстием и без него через потенциал пластины при отсутствии и наличии внешнего поля. Уравнение, описывающее связь между распределением зарядов и потенциалом пластины, является интегральным. Получены полиномы, позволяющие свести сложное интегральное уравнение к алгебраическим уравнениям. Приводятся примеры расчета распределения зарядов на поверхности сплошного диска и диска с отверстием, пластины в виде сплошного сферического сегмента.

В общем случае, для точного расчета распределения зарядов проводников требуется строгое решение соответствующей электростатической задачи. Сложность аналитического решения большинства электростатических задач обусловила появление и развитие ряда приближенных методов расчета. Один из наиболее существенных недостатков этих методов заключается в том, что их можно применить при решении узкого круга задач. Предлагаемый метод позволяет найти распределение зарядов на поверхности проводника при любом осесимметричном внешнем поле.

Если поместить проводящую пластину во внешнее электростатическое поле [1, 2], то на поверхности проводника происходит перераспределение зарядов. Возникшее распределение зарядов компенсирует (гасит) влияние внешнего поля. Для тонкой пластины соотношение между распределением зарядов на пластине, потенциалом пластины и потенциалом внешнего электростатического поля запишутся следующим образом [3, 4]:

$$-U^0(\mathbf{r}_0) + U_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_D \frac{\sigma(\mathbf{r})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} d\mathbf{r}, \quad \mathbf{r} = \{x, y, z\},$$

$$\mathbf{r}_0 = \{x_0, y_0, z_0\}, \quad \mathbf{r}, \mathbf{r}_0 \in D, \quad (1)$$

где $U^0(\mathbf{r}_0)$ – потенциал внешнего поля, U_0 – потенциал проводника, $\sigma(\mathbf{r})$ – распределение зарядов на проводнике, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость окружающей среды, x, y, z – система декартовых координат, x_0, y_0, z_0 – координаты расположения заряда, \mathbf{r}, \mathbf{r}_0 – радиус-вектора, D – область определения потенциала электростатического поля.

Интегральное уравнение (1) позволяет найти распределение потенциалов при известном распределении зарядов на проводнике – это прямая задача. Гораздо сложнее и интереснее обратная задача. Чаще известен потенциал результирующего поля $-U^0(\mathbf{r}_0) + U_0$, и для того, что бы найти распределение зарядов нужно решить интегральное уравнение Фредгольма первого рода (1) относительно $\sigma(\mathbf{r})$.