

УДК 621.039.588

РАСЧЁТ НАВОДИМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА ИГНИТОР В ПРОЦЕССЕ СРЫВА ПЛАЗМЫ ПО ВЕРТИКАЛИ

B.N. Докука, A.A. Гостев, P.P. Хайрутдинов

ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва, Троицк, Россия

Цель расчётов — определение напряжений в обмотках полоидального поля, возникающих в процессе срыва плазмы в токамаке Игнитор. При этом наиболее критичным параметром является величина межвиткового напряжения в обмотках полоидального поля. Рассмотрен вариант расчёта срыва плазмы сценария на 4,65 с. В связи с возникающими перенапряжениями предлагается провести ряд мероприятий для обеспечения безопасной работы токамака.

Ключевые слова: токамак Игнитор, электромагнитная полоидальная система, срыв плазмы по вертикалам, напряжение в контуре при срывае, межвитковое напряжение.

CALCULATON OF VOLTAGES INDUCED IN POLOIDAL FIELD COILS OF THE TOKAMAK IGNITOR DURING VDE

V.N. Dokuka, A.A. Gostev, R.R. Khayrutdinov

SSC RF TRINITI, Troitsk, Moscow, Russia

The goal of the calculations is to determine the voltages induced in the poloidal coils during VDE in the Ignitor tokamak. The most critical parameter is the value of turn-to-turn voltage in the poloidal coils. Calculation of plasma disruption is considered at the moment 4.65 s of discharge scenario. Some proposals are given to provide safety operation of the tokamak due to getting overvoltage in coils.

Key words: tokamak Ignitor, electromagnetic poloidal system, vertical displacement event, voltage in the circuit at disruption, turn-to-turn voltage.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-3-93-104

ВВЕДЕНИЕ

Токамак Игнитор [1] разрабатывается в качестве установки для проведения первых экспериментов для достижения условий зажигания. Токамак Игнитор характеризуется оптимальной комбинацией высоких магнитных полей ($B_t = 13$ Тл), компактным размером ($R_0 = 1,32$ м), относительно низким аспектным отношением ($A = 2,8$) и значительной вытянутостью поперечного сечения плазмы и треугольности ($k = 1,83$, $\delta = 0,4$). Центральная плотность плазмы, при которой может быть достигнуто зажигание в токамаке Игнитор, составляет около 10^{21} м^{-3} . Максимальная величина тока плазмы $I_p = 11$ МА. Максимальная температура зажигания составляет около $T_{e0} = T_{i0} = 11$ кэВ, время удержания энергии $\tau_E = 0,6$ с. В режиме с чисто омическим нагревом зажигание достигается вскоре после 4 с.

Плазма с вытянутым сечением обладает неустойчивостью в вертикальном направлении. В штатном режиме стабилизация положения плазмы обеспечивается системой обратных связей. При нарушении работы системы управления возможен неконтролируемый уход плазмы по вертикалам (VDE — Vertical Displacement Event), заканчивающийся срывом плазменного тока, что представляет собой одно из наиболее опасных по своим последствиям явлений. В процессе срыва становится возможным выделение большого количества энергии на обращённых к плазме элементах вакуумной камеры. Из-за быстрого перемещения плазменного шнура в процессе срыва возникают дополнительные механические усилия за счёт наведённых в механической конструкции электрических токов, что также повышает вероятность разрушения элементов конструкции токамака. Вследствие низкой температуры плазмы (порядка 4—10 эВ) после теплового срыва происходит быстрое затухание плазменного тока, что приводит к большой величине напряжения на ободе плазмы и создаёт условия для генерации токов ускоренных электронов и токов гало в периферийной плазме, замыкающихся на стенку вакуумной камеры. При этом полоидальный компонент токов гало из-за высокого значения тороидального магнитного поля может создавать существенные механические нагрузки в районе точки касания плазмой стенки вакуумной камеры. При затухании тока в плазме часть его тороидального компонента перебрасывается на проводящие в тороидальном направлении элементы вакуумной камеры, что дополнительно увеличивает механическую нагрузку на камеру. Для крупных исследовательских

установок типа Игнитор, где коммутируются большие электрические мощности в процессе срыва плазмы, возникают перенапряжения в обмотках. Однако в опубликованных докладах и статьях по проекту Игнитор вопрос о напряжениях, индуцированных в обмотках при срыве плазмы, пока ещё не рассматривался.

Целью данной работы является проведение расчёта межвитковых напряжений, возникающих в обмотках полоидального поля в процессе срывов плазмы. Моделирование процесса VDE-срывов в плазме токамака Игнитор выполнено с помощью плазмофизического кода ДИНА [2].

Статья состоит из шести разделов: «Электромагнитная структура токамака Игнитор»; «Расчёт электромагнитных характеристик установки Игнитор»; «Подготовка данных сценария токов в обмотках полоидального поля токамака Игнитор»; «Динамика токов в обмотках при моделировании срыва плазмы»; «Результаты моделирования срыва плазмы вниз при фиксированных токах в обмотках»; «Сравнение максимальных значений межвитковых напряжений при срыве плазмы в расчётах с меняющимися и постоянными токами в обмотках».

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ТОКАМАКА ИГНИТОР

Электромагнитная полоидальная система (ЭМС) токамака Игнитор включает в себя обмотки полоидального поля, вакуумную камеру и первую стенку. При подготовке данных ЭМС установки Игнитор использованы данные из эскизного проекта [3]. Полоидальная система симметрична относительно экваториальной плоскости установки, и в табл. 1 приведены параметры обмоток (положение центра, размеры и число витков) только её верхней части. В последнем столбце табл. 1 приведены названия токов, протекающих в соответствующих обмотках полоидального поля.

Т а б л и ц а 1. Параметры обмоток полоидального поля токамака Игнитор

Название обмотки	R , мм	dR , мм	Z , мм	dZ , мм	Число витков	Название тока
P1.1	243,65	51,3	185,5	366	21	c1—3
P1.2	293,65	48,7	185,5	366	21	c1—3
P2.1	350,05	56,9	185,5	366	21,5	c2
P2.2	405,4	53,8	185,5	366	21,5	c2
P2.3	458,4	52,2	185,5	366	21,5	c2
P2.4	509,85	50,7	185,5	366	21,5	c2
P3.1	243,65	51,3	588,5	366	21	c1—3
P3.2	293,65	48,7	588,5	366	21	c1—3
P4.1	350,05	56,9	588,5	366	21,5	c4
P4.2	405,4	53,8	588,5	366	21,5	c4
P4.3	458,4	52,2	588,5	366	21,5	c4
P4.4	509,85	50,7	588,5	366	21,5	c4
P5.1	243,65	51,3	991,5	366	21	c5—8
P5.2	293,65	48,7	991,5	366	21	c5—8
P6.1	353,38	63,56	991,5	366	19,6	c6
P6.2	412,94	55,56	991,5	366	19,6	c6
P6.3	457,4	33,36	991,5	366	19,6	c6
P6.4	504,64	61,12	991,5	366	39,2	c6
P8.1	329,68	59,36	1511	599	39,4	c5—8
P8.2	385,14	51,56	1511	599	39,4	c5—8
P8.3	433,1	44,36	1511	599	39,4	c5—8
P8.4	495,24	79,92	1511	599	78,8	c5—8
P9.1	739,4	78,6	1664,65	415,5	44,25	c9
P9.2	840,55	123,7	1664,65	415,5	73,75	c9
P10	1066,5	195,6	1786,15	405,9	87	c10
P11	1774,55	146,7	1407,45	184,5	29	c11
P12	1934,7	101,8	1292,8	291,2	31	c12
P13	2188,35	152,7	1184,8	473,2	77	c13
P14	2400,45	191,6	1032,65	670	141	c14
P15	2098	205,4	2190	201,4	47	c15—16
P16	2311,5	200,4	2250	270,4	47	c15—16

Функционально шестьдесят две секции обмоток полоидального поля токамака Игнитор подразделяются на центральный соленоид (P1—P8), дающий основной вклад в поток полоидального поля, обмотки равновесия (P9—P14), используемые для управления положением и формой плазмы, и обмотки (P15—P16), используемые на стадии зажигания. Активные обмотки управления обратной связью, необходимые для предотвращения смещения плазмы, планируется разместить внутри обмоток равновесия, но с отдельными источниками электропитания. Обмотки P1, P2, P3, P4, P5, P6, P8, P9 составлены из отдельных секций. Обмотки P1 и P3 соединены последовательно. Соединены также последовательно обмотки P5 и P8. Обмотки P15 и P16 включены встречнопоследовательно (с токами, протекающими в противоположных направлениях).

Вакуумная камера (ВК) выполнена из жаропрочного никель-хромового сплава инконель с удельным сопротивлением $1,25 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Толщина вакуумной камеры меняется от 2,6 см на внутреннем обводе ВК до 5,2 см на внешнем обводе. На рис. 1 представлен вид верхней части обмоток полоидального поля токамака Игнитор с частью вакуумной камеры. Обозначения обмоток приведены в соответствии с данными табл. 1. С правой стороны рисунка указаны названия токов, протекающих в соответствующих обмотках.

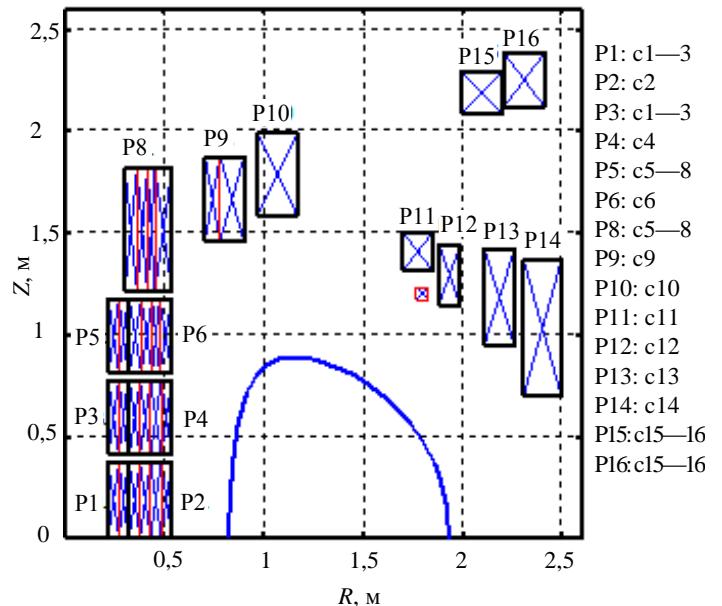


Рис. 1. Вид верхней части обмоток полоидального поля токамака Игнитор с частью вакуумной камеры. Обозначения обмоток указаны в соответствии с данными табл. 1

РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВКИ ИГНИТОР

Учитывая, что обмотки собираются из секций, предложено в численной модели установить по одной магнитной петле (датчик напряжения обхода ДНО) в непосредственной близости каждой секции. В этом случае появляется возможность контролировать величину локального полоидального магнитного потока и соответственно наведённого в секции напряжения. Таким образом, в ЭМС установки добавлено 64 датчика напряжения обхода (ДНО): 62 расположены с внутренней стороны каждой секции полоидальных обмоток и две петли, установленные в экваториальной плоскости на внешнем и внутреннем обводе ВК. Ввиду симметрии установки положение датчиков, помеченных красным цветом, представлено на рис. 2 только для верхней полу-плоскости. Нумерация ДНО следует нумерации секций обмоток полоидального поля (ДНО +P1.2 означает, что датчик напряжения обхода установлен вблизи обмотки +P1.2, расположенной выше экваториальной плоскости токамака; ДНО -P1.2 означает, что датчик напряжения обхода установлен вблизи обмотки -P1.2, расположенной ниже экваториальной плоскости). На основе данных ЭМС токамака Игнитор выполнен расчёт электромагнитных параметров с использованием кода ДИНА [2]. Величина рассчитанного сопротивления вакуумной камеры составляет 73,1 мкОм.

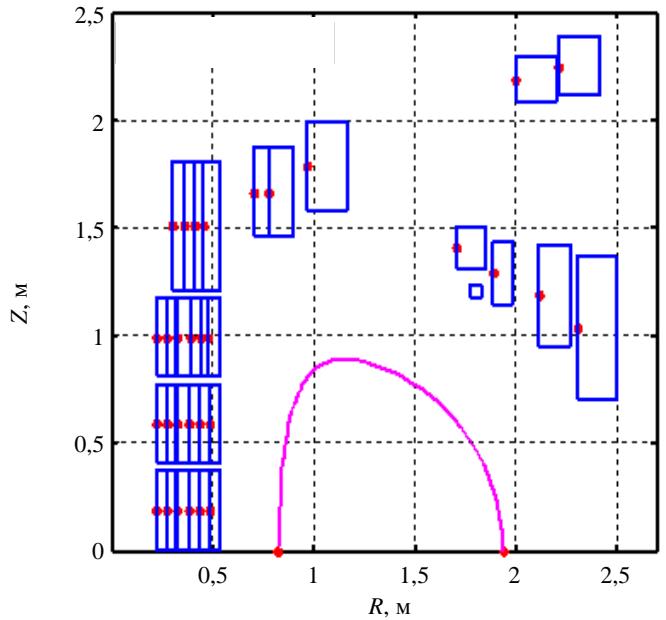


Рис. 2. Расположение витков ДНО (●) в токамаке Игнитор
Рис. 2. Расположение витков ДНО (●) в токамаке Игнитор
ДНО +P1.2 означает, что датчик напряжения обхода установлен вблизи обмотки +P1.2, расположенной выше экваториальной плоскости токамака; ДНО -P1.2 означает, что датчик напряжения обхода установлен вблизи обмотки -P1.2, расположенной ниже экваториальной плоскости). На основе данных ЭМС токамака Игнитор выполнен расчёт электромагнитных параметров с использованием кода ДИНА [2]. Величина рассчитанного сопротивления вакуумной камеры составляет 73,1 мкОм.

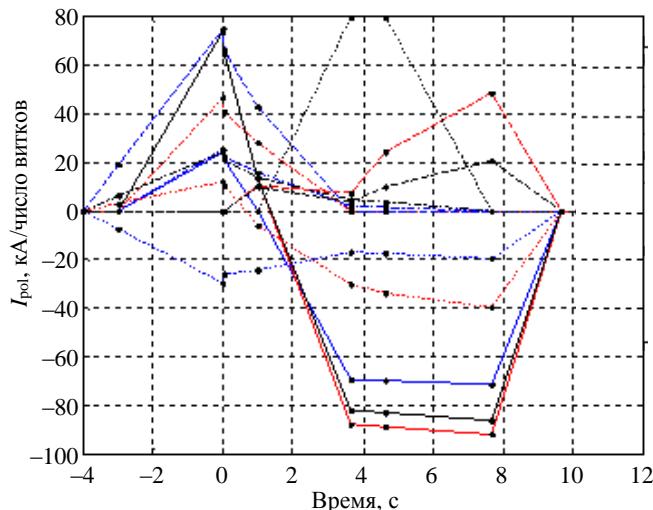


Рис. 3. Сценарий токов через виток в процессе разряда в токамаке Игнитор с учётом соединений обмоток в серии: — c1—3; — c2; — c4; — c5—8; — c6; — c9; — c10; — c11; — c12; — c13; — c14; — c15—16

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ СЦЕНАРИЯ ТОКОВ В ОБМОТКАХ ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА ИГНИТОР

На основе данных параметров плазмы и суммарных токов в обмотках в процессе развития разряда в токамаке Игнитор рассчитан программный сценарий токов через виток для каждой из обмоток полоидального поля. Полученный сценарий токов приведён на рис. 3 и в табл. 2. Число независимых токов с учётом соединений обмоток в серии равно 12. Используются общепринятые для Игнитора названия токов, приведённые ранее в табл. 1 и на рис. 1.

Т а б л и ц а 2. Сценарий токов в обмотках токамака Игнитор

Токи, кА	Время, с				
	0,05	1	3,65	4,65	7,65
c1—3	20,95	0	-69,05	-69,76	-71,43
c2	64,47	12,79	-87,44	-88,60	-91,86
c4	64,47	12,79	-81,86	-82,91	-86,05
c5—8	22	15,74	2,03	1,52	0
c6	40,41	27,55	0	0	0
c9	20,88	13,56	4,24	3,18	0
c10	65,74	42,53	0	0	0
c11	0	10,34	6,90	24,14	48,28
c12	0	9,68	3,23	9,68	20
c13	-26,29	-24,68	-16,88	-17,53	-19,48
c14	10,49	-6,17	-30,35	-34,04	-39,50
c15—16	0	0	79,15	79,15	0

ДИНАМИКА ТОКОВ В ОБМОТКАХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СРЫВА ПЛАЗМЫ

Моделирование процесса срыва плазмы выполняется в рамках двух предположений о динамике токов в обмотках в процессе срыва. В первом случае считается, что токи в обмотках полоидального поля остаются постоянными (закрепленными) в процессе развития срыва плазмы. Во втором случае предполагается, что токи в обмотках полоидального поля меняются в соответствии с наводимыми в них напряжениями. При этом считается, что электрическое сопротивление в цепях определяется, главным образом, величиной сопротивлений обмоток. Принято, что удельное сопротивление меди равно $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Оценка сопротивлений электрических контуров приведена в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Оценка сопротивления цепей, мОм

R _{c1—3}	R _{c2}	R _{c4}	R _{c5—8}	R _{c6}	R _{c9}	R _{c10}	R _{c11}	R _{c12}	R _{c13}	R _{c14}	R _{c15—16}
5,88	9,09	9,09	30,00	13,83	29,30	22,23	12,33	13,99	39,31	82,06	45,53

Динамика токов в обмотках полоидального поля и пассивных контурах (проводящих элементов ВК) во время срыва плазмы определяется уравнениями Кирхгофа:

$$\frac{d}{dt} \left(L_i I_i + \sum_{j \neq i}^N M_{ij} I_j + \Psi_i^{pl} \right) + R_i I_i = U_i,$$

где L_i — матрица собственных индуктивностей активных и пассивных контуров; M_{ij} — матрица взаимных индуктивностей всех контуров; R_i — электрическое сопротивление i -го контура; Ψ_i^{pl} — вклад в полоидальный поток контура i от тока плазмы; U_i — напряжение на активных обмотках; I_i — токи в активных и пассивных контурах; i — номер проводящего контура. При этом напряжения U_i в активных об-

мотках подбираются так, чтобы компенсировать резистивные потери в контурах, т.е. $U_i = R_i I_i^{\text{ref}}$, где I_i^{ref} — программное значение тока на момент возникновения срыва.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СРЫВА ПЛАЗМЫ ВНИЗ ПРИ ФИКСИРОВАННЫХ ТОКАХ В ОБМОТКАХ

Моделирование срыва плазмы вниз проводится с параметрами плазмы и токами в обмотках, достижимыми в процессе развития разряда на момент 4,65 с. При проведении моделирования «горячего» VDE считается, что критическая величина запаса магнитной устойчивости на границе плазменного шнуря q^* равна 2. Предполагается, что в процессе VDE-профиль плотности плазмы остаётся плоским, а сама средняя плотность поддерживается постоянной на уровне $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Процессы переноса энергии в плазме при этом не учитывались.

На рис. 4 представлена эволюция тока плазмы I_p и тороидальной составляющей гало-тока $I_{\text{halo,tor}}$, малого радиуса плазмы a и положения магнитной оси (R_{mag} , Z_{mag}) в процессе срыва плазмы вниз. На рис. 5

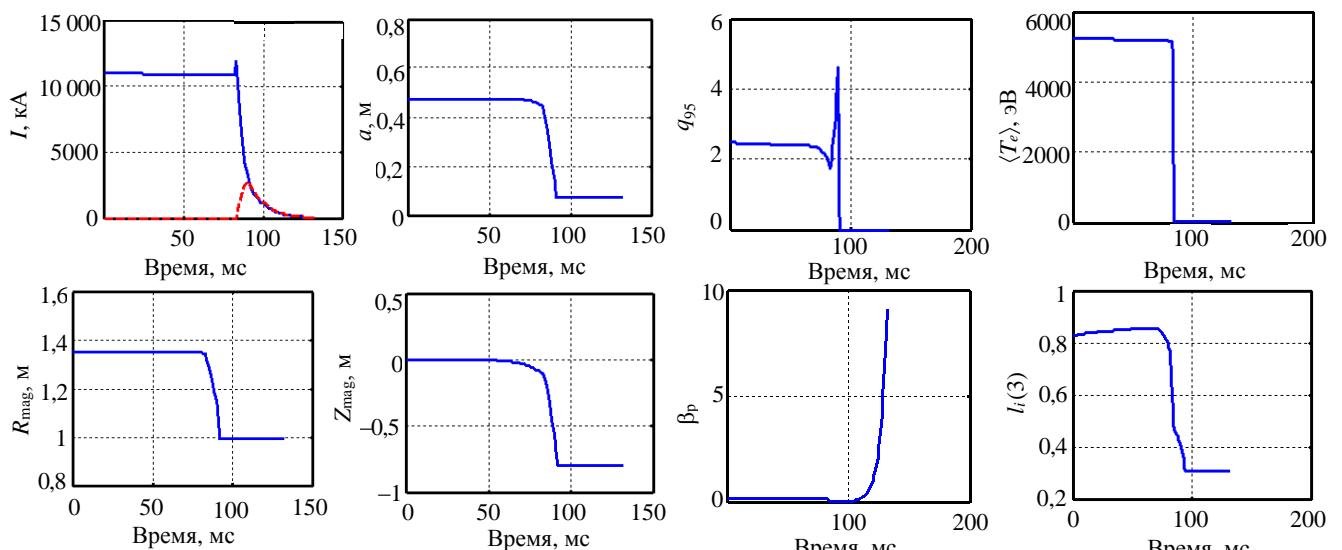


Рис. 4. Эволюция тока плазмы I_p (—) и тороидальной составляющей гало-тока $I_{\text{halo,tor}}$ (---), малого радиуса плазмы a и положения магнитной оси (R_{mag} , Z_{mag}) в процессе срыва плазмы

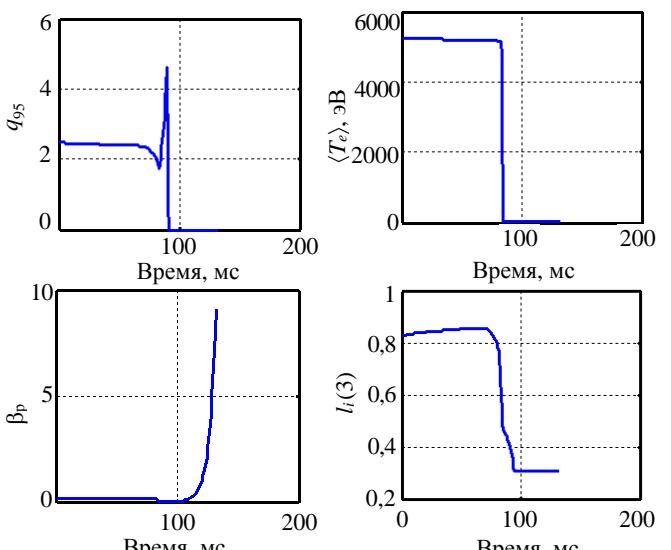


Рис. 5. Эволюция запаса устойчивости на границе шнуря q_{95} , средней температуры плазмы $\langle T_e \rangle$, полоидального β_p и внутренней индуктивности $l_i(3)$ в процессе срыва плазмы вниз

приведена эволюция запаса устойчивости на границе плазменного шнуря q_{95} , средней температуры плазмы $\langle T_e \rangle$, полоидальной β_p и внутренней индуктивности $l_i(3)$. В процессе движения плазмы вниз запас устойчивости на уровне q_{95} достигает критического значения $q^* = 2$ и давление плазмы резко уменьшается из-за теплового срыва. Наблюдаются появление небольшого подъёма тока плазмы вследствие МГД-перераспределения профиля тока, что приводит к снижению величины внутренней индуктивности l_i . Эволюция тороидального и полоидального компонентов гало-токов приводится на рис. 6. Максимальная величина тороидального компонента гало-тока составляет примерно 2,8 МА, максимум полоидальной составляющей гало-тока 1 МА. Представлена также динамика тока в ВК и вытянутости плазменного шнуря по вертикали. Максимальная величина тока в ВК достигает 6 МА.

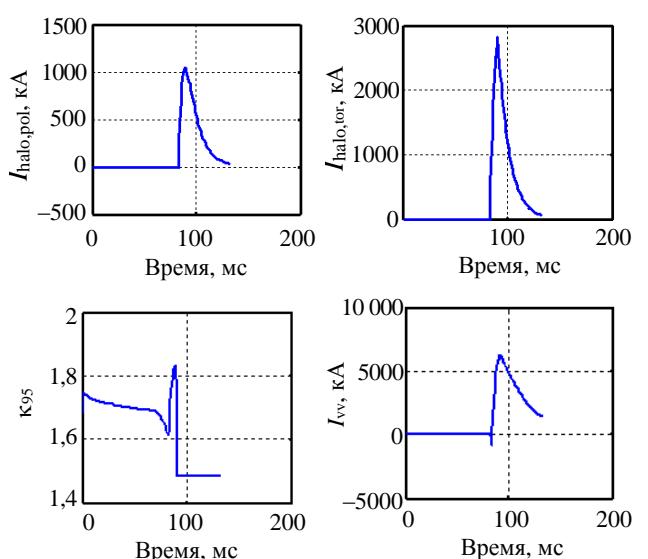


Рис. 6. Динамика компонентов гало-токов $I_{\text{halo,pol}}$ и $I_{\text{halo,tor}}$. Ток в ВК и вытянутость плазменного шнуря по вертикали

На рис. 7—10 представлена конфигурация плазмы на различных стадиях развития срыва вниз. Конфигурация плазмы в момент начала развития срыва вниз показана на рис. 7. Конфигурация плазмы на момент начала теплового срыва и возникновения гало-тока приведена на рис. 8. Конфигурация плазмы на момент достижения максимальных значений гало-токов и тока в ВК представлена рис. 9. Конфигурация плазмы на рис. 10 соответствует моменту перед наступлением размыкания последней замкнутой магнитной поверхности плазмы.

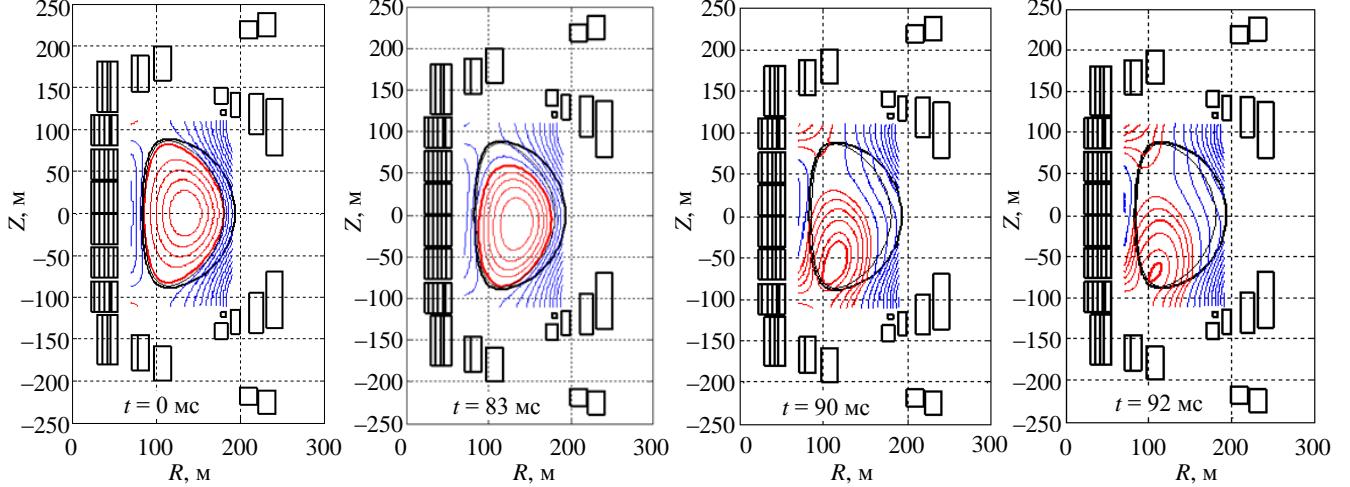


Рис. 7. Конфигурация плазмы в момент начала развития срыва вниз

Рис. 8. Конфигурация плазмы на момент начала теплового срыва

Рис. 9. Конфигурация плазмы на момент достижения максимальных значений гало-токов и тока в ВК

Рис. 10. Конфигурация плазмы на момент перед размыканием последней замкнутой поверхности

На рис. 11, *a* представлено напряжение U_{c1-3} , наводимое в контуре тока с1—3 в процессе срыва, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c1-3}$, полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи секций обмоток, входящих в цепь тока с1—3, и с учётом числа витков в соответствующих обмотках. Таким образом, напряжение $U_{\text{ДНО } c1-3}$ по всем ДНО, расположенным вблизи обмоток +P1.1, +P1.2, -P1.1, -P1.2, +P3.1, +P3.2, -P3.1, -P3.2, можно рассчитать по формуле

$$U_{\text{ДНО } c1-3} = n_{+P1.1} U_{\text{ДНО } +P1.1} + n_{+P1.2} U_{\text{ДНО } +P1.2} + n_{-P1.1} U_{\text{ДНО } -P1.1} + n_{-P1.2} U_{\text{ДНО } -P1.2} + n_{+P3.1} U_{\text{ДНО } +P3.1} + n_{+P3.2} U_{\text{ДНО } +P3.2} + n_{-P3.1} U_{\text{ДНО } -P3.1} + n_{-P3.2} U_{\text{ДНО } -P3.2},$$

где $n_{+P1.1}$ — число витков в секции обмотки +P1.1, расположенной в верхней полуплоскости; $U_{\text{ДНО } +P1.1}$ — напряжение в ДНО, находящемся вблизи секции обмотки +P1.1; $n_{-P1.1}$ — число витков в секции обмотки -P1.1, расположенной в нижней полуплоскости; $U_{\text{ДНО } -P1.1}$ — напряжение в ДНО, находящемся вблизи секции обмотки -P1.1, и т.д. Стоящие перед названиями обмоток знаки (+ / -) указывают на положение секций обмоток относительно экваториальной плоскости токамака Игнитор.

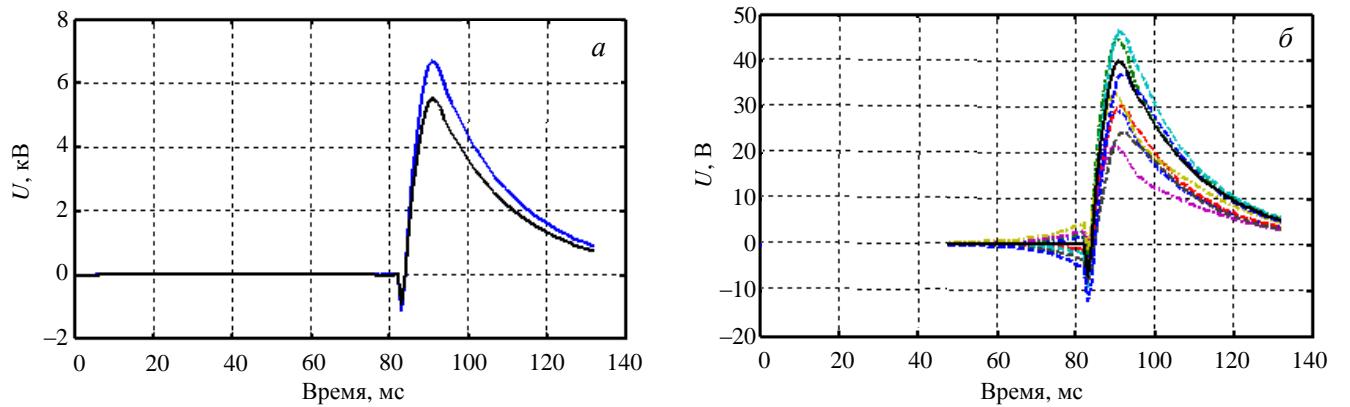


Рис. 11. Напряжение U_{c1-3} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока с1—3, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c1-3}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока с1—3, число витков 168 (*a*); напряжения в ДНО (— · — ДНО +P1.1, — · · — ДНО +P1.2, — · — ДНО -P1.1, — · · — ДНО -P1.2, — · — ДНО +P3.1, — · · — ДНО +P3.2, — · — ДНО -P3.1, — · · — ДНО -P3.2), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока с1—3, и межвитковое напряжение U_{c1-3}/n_{c1-3} (—) в контуре с1—3 (*б*)

На рис. 11, б представлены напряжения в ДНО, расположенных вблизи секций обмоток, включённых в контур тока с1—3, и межвитковое напряжение U_{c1-3}/n_{c1-3} в контуре (наведённое в контуре напряжение, пересчитанное на один виток). При этом полное число витков n_{c1-3} в контуре с1—3 рассчитывается по формуле

$$n_{c1-3} = n_{+P1,1} + n_{+P1,2} + n_{-P1,1} + n_{-P1,2} + n_{+P3,1} + n_{+P3,2} + n_{-P3,1} + n_{-P3,2}$$

и n_{c1-3} равно 168.

Аналогично рассчитываются напряжения $U_{\text{ДНО } c2}$ и U_{c2}/n_{c2} для контура с2, $U_{\text{ДНО } c4}$ и U_{c4}/n_{c4} для с4, $U_{\text{ДНО } c5-8}$ и U_{c5-8}/n_{c5-8} для с5—8, $U_{\text{ДНО } c6}$ и U_{c6}/n_{c6} для с6, $U_{\text{ДНО } c9}$ и U_{c9}/n_{c9} для с9, $U_{\text{ДНО } c10}$ и U_{c10}/n_{c10} для с10, $U_{\text{ДНО } c11}$ и U_{c11}/n_{c11} для с11, $U_{\text{ДНО } c12}$ и U_{c12}/n_{c12} для с12, $U_{\text{ДНО } c13}$ и U_{c13}/n_{c13} для с13, $U_{\text{ДНО } c14}$ и U_{c14}/n_{c14} для с14, $U_{\text{ДНО } c15-16}$ и U_{c15-16}/n_{c15-16} для с15—16.

На рис. 12—22 представлены результаты расчёта напряжений, наводимых в остальных цепях токамака Игнитор, и проведено сравнение с данными сигналов в ДНО. На рис. 22, б видно, что из-за того, что обмотки Р15 и Р16 включены встречно-последовательно, напряжение U_{c15-16}/n_{c15-16} в цепи с15—16, пересчитанное на один виток, оказывается значительно ниже тех напряжений, что наводятся в соответствующих ДНО, установленных вблизи этих обмоток. Отметим, что вследствие направления срыва вниз на магнитных петлях, расположенных вблизи одноимённых нижних обмоток, достигаются более высокие значения напряжений.

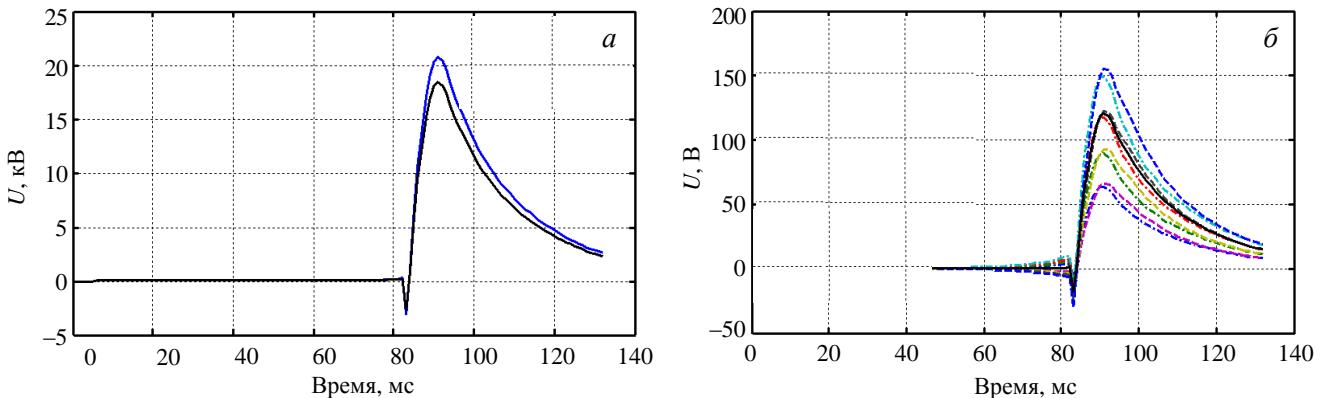


Рис. 12. Напряжение U_{c2} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока с2, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c2}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока с2, число витков 172 (а); напряжения в ДНО (--- — ДНО +P2.1, -·- — ДНО +P2.2, -·— — ДНО +P2.3, -·— — ДНО +P2.4, -·— — ДНО -P2.1, -·— — ДНО -P2.2; --- — ДНО -P2.3, -·— — ДНО -P2.4), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока с2, и межвитковое напряжение U_{c2}/n_{c2} (—) в контуре с2 (б)

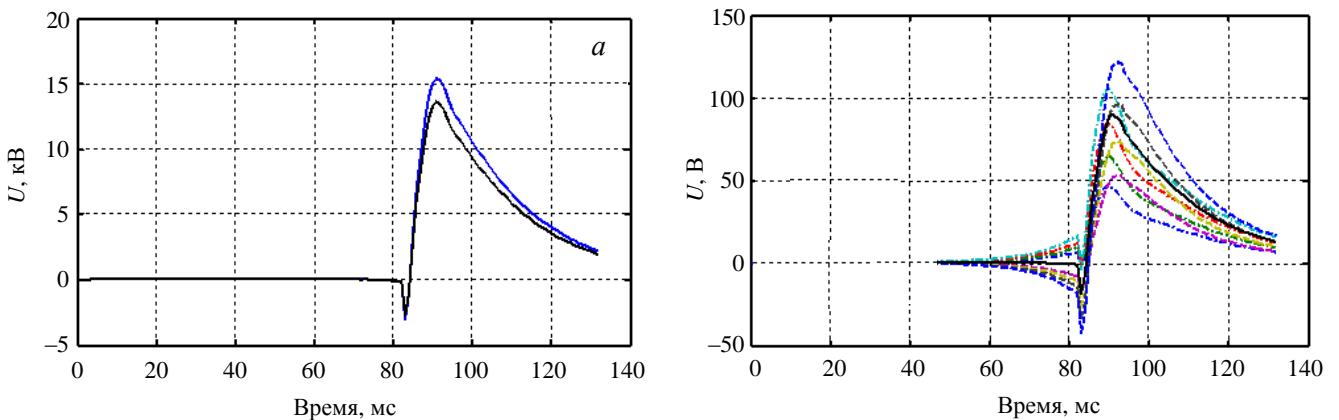


Рис. 13. Напряжение U_{c4} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока с4, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c4}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока с4, число витков 172 (а); напряжения в ДНО (--- — ДНО +P4.1, -·- — ДНО +P4.2, -·— — ДНО +P4.3, -·— — ДНО +P4.4, -·— — ДНО -P4.1, -·— — ДНО -P4.2, --- — ДНО -P4.3, -·— — ДНО -P4.4), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока с4, и межвитковое напряжение U_{c4}/n_{c4} (—) в контуре с4 (б)

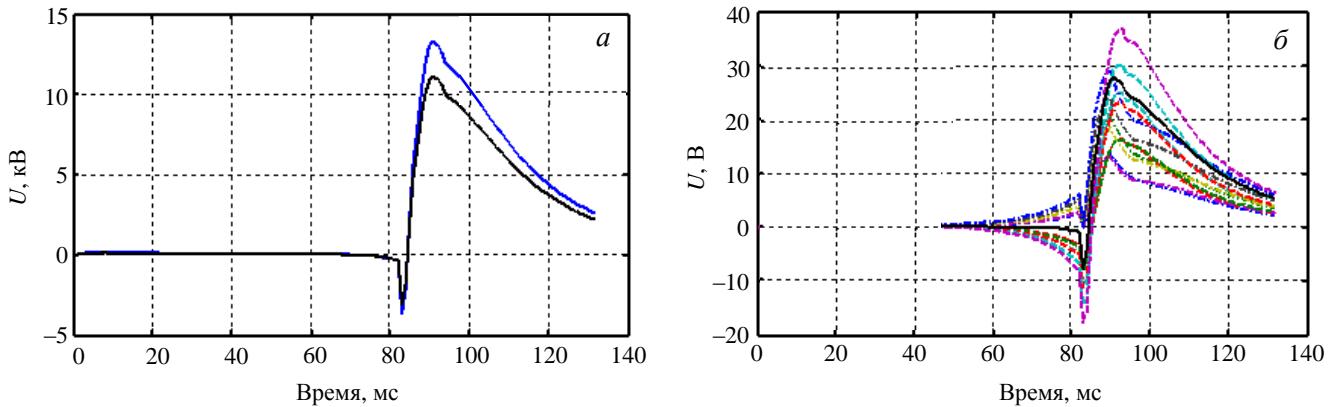


Рис. 14. Напряжение U_{c5-8} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c5-8$, вместе с напряжением $U_{\text{дно } c5-8}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c5-8$, число витков 478 (а); напряжения в ДНО (— — ДНО +P5.1, ··· — ДНО +P5.2, ··· — ДНО -P5.1, ··· — ДНО -P5.2, ··· — ДНО +P8.1, ··· — ДНО +P8.2, ··· — ДНО +P8.3, ··· — ДНО +P8.4, ··· — ДНО -P8.1, ··· — ДНО -P8.2, ··· — ДНО -P8.3, ··· — ДНО -P8.4), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c5-8$, и межвитковое напряжение $U_{c5-8/n_{c5-8}}$ (—) в контуре $c5-8$ (б)

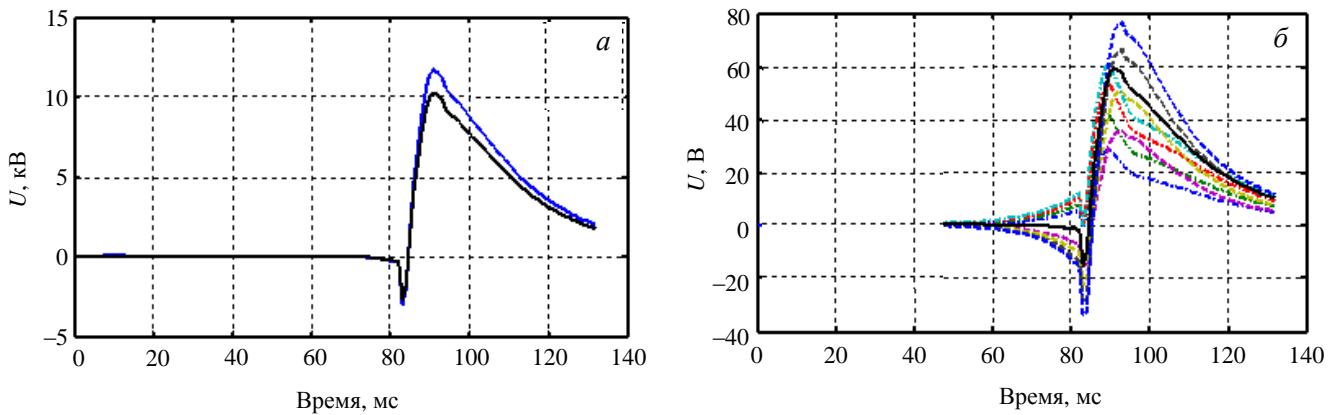


Рис. 15. Напряжение U_{c6} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c6$, вместе с напряжением $U_{\text{дно } c6}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c6$, число витков 196 (а); напряжения в ДНО (— — ДНО +P6.1, ··· — ДНО +P6.2, ··· — ДНО +P6.3, ··· — ДНО +P6.4, ··· — ДНО -P6.1, ··· — ДНО -P6.2, ··· — ДНО -P6.3, ··· — ДНО -P6.4), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c6$, и межвитковое напряжение $U_{c6/n_{c6}}$ (—) в контуре $c6$ (б)

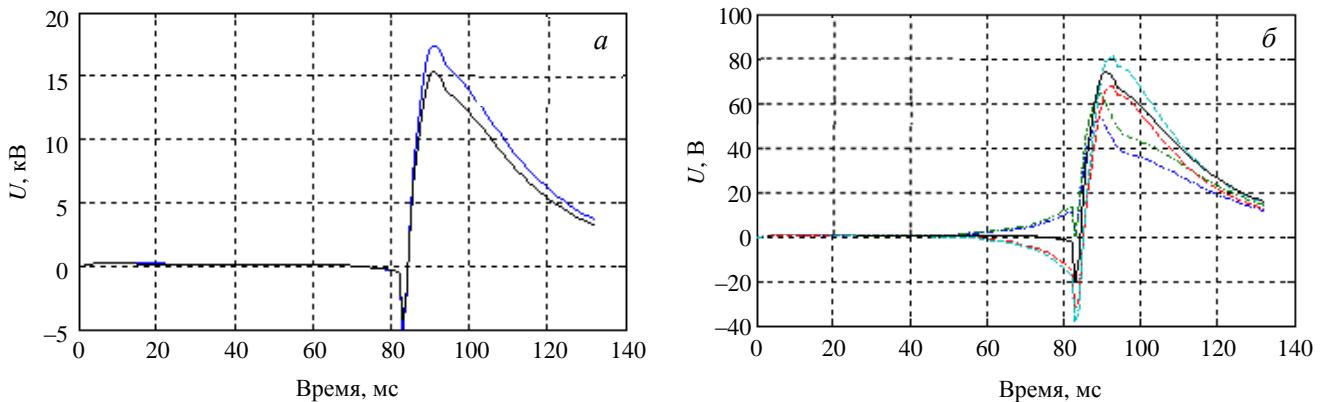


Рис. 16. Напряжение U_{c9} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c9$, вместе с напряжением $U_{\text{дно } c9}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c9$, число витков 236 (а); напряжения в ДНО (— — ДНО +P9.1, ··· — ДНО +P9.2, ··· — ДНО -P9.1, ··· — ДНО -P9.2), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c9$, и межвитковое напряжение $U_{c9/n_{c9}}$ (—) в контуре $c9$ (б)

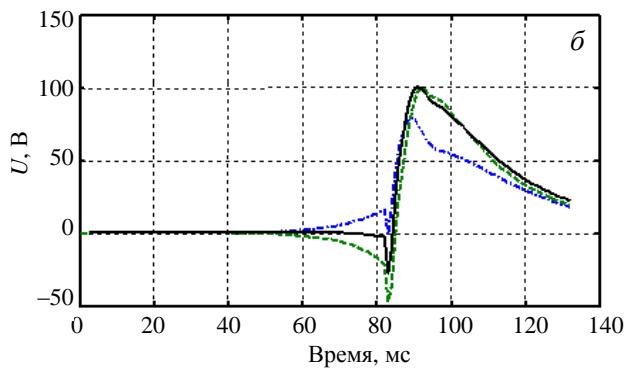
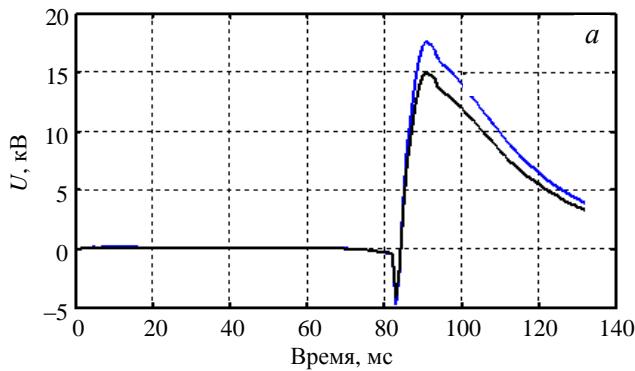


Рис. 17. Напряжение U_{c10} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c10$, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c10}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c10$, число витков 174 (а); напряжения в ДНО (--- — ДНО +P10; --- — ДНО -P10), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c10$, и межвитковое напряжение U_{c10}/n_{c10} (—) в контуре $c10$ (б)

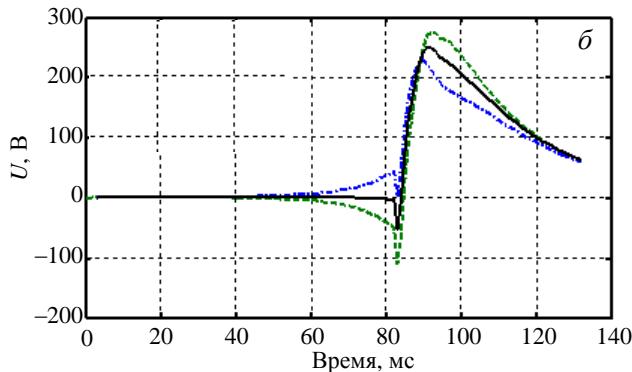
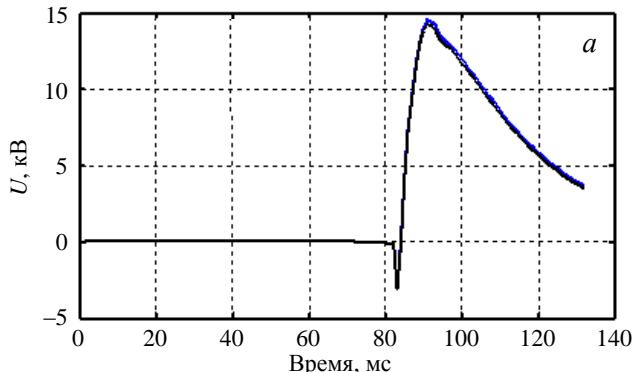


Рис. 18. Напряжение U_{c11} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c11$, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c11}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c11$, число витков 58 (а); напряжения в ДНО (--- — ДНО +P11, --- — ДНО -P11), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c11$, и межвитковое напряжение U_{c11}/n_{c11} (—) в контуре $c11$ (б)

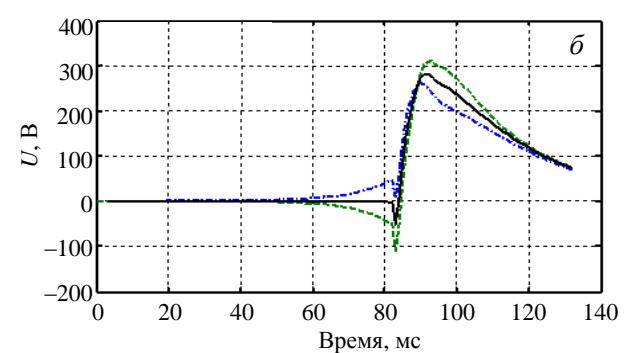
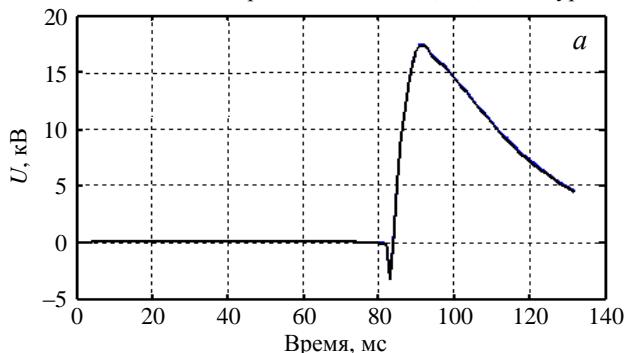


Рис. 19. Напряжение U_{c12} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c12$, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c12}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c12$, число витков 62 (а); напряжения в ДНО (--- — ДНО +P12, --- — ДНО -P12), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c12$, и межвитковое напряжение U_{c12}/n_{c12} (—) в контуре $c12$ (б)

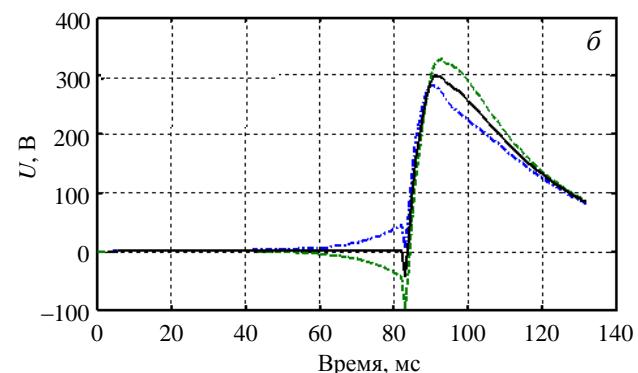
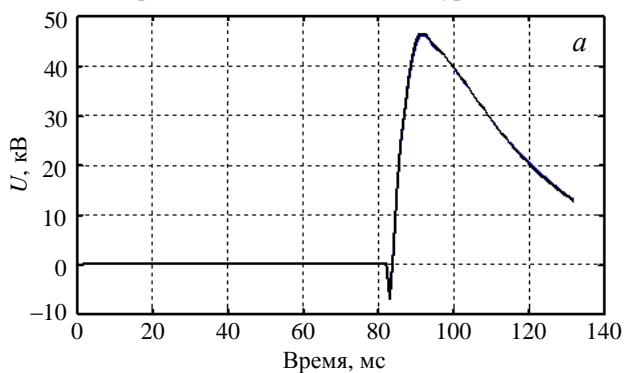


Рис. 20. Напряжение U_{c13} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c13$, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c13}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c13$, число витков 154 (а); напряжения в ДНО (--- — ДНО +P13, --- — ДНО -P13), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c13$, и межвитковое напряжение U_{c13}/n_{c13} (—) в контуре $c13$ (б)

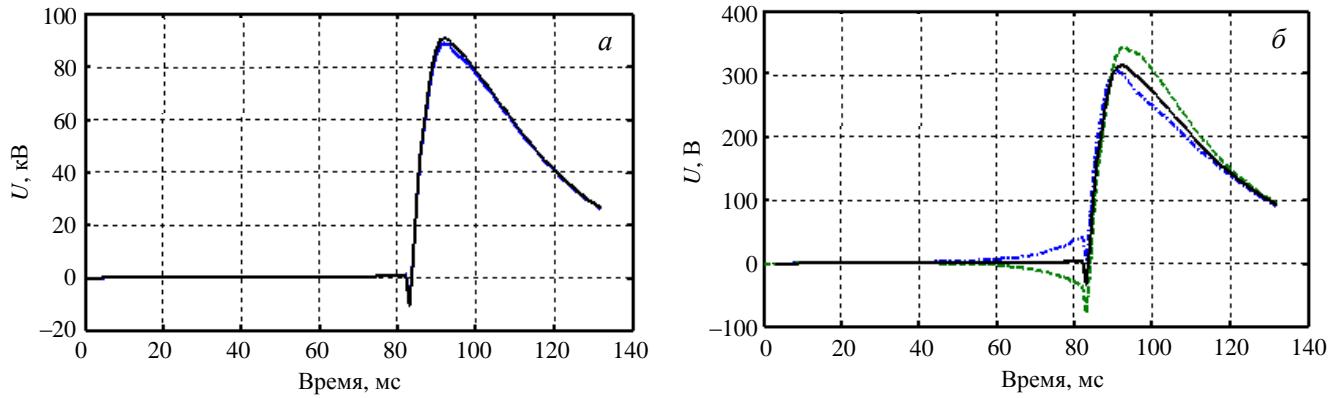


Рис. 21. Напряжение U_{c14} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c14$, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c14}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c14$, число витков 282 (а); напряжения в ДНО (··· — ДНО +P14, ··· — ДНО -P14), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c14$, и межвитковое напряжение U_{c14}/n_{c14} (—) в контуре $c14$ (б)

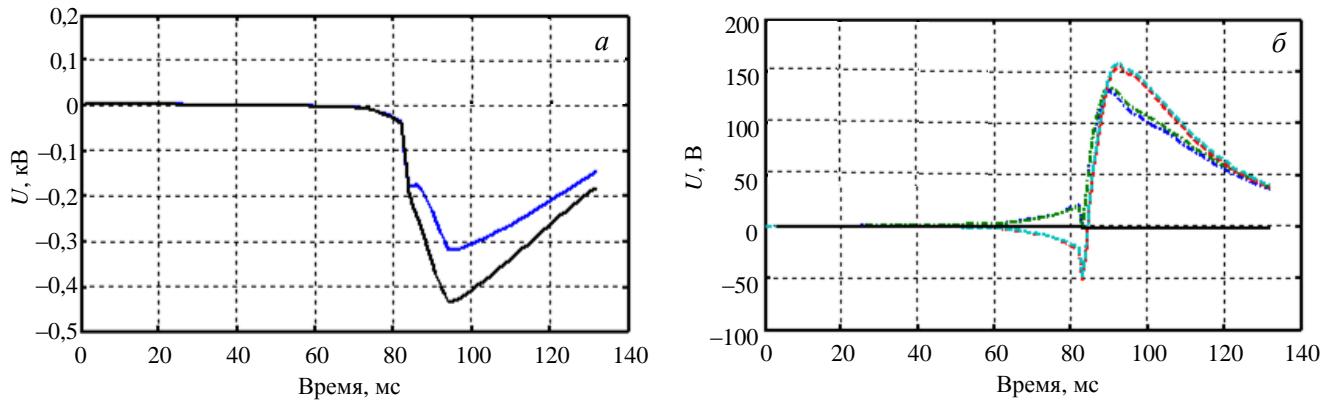


Рис. 22. Напряжение U_{c15-16} (—), наводимое в процессе срыва в контуре тока $c15-16$, вместе с напряжением $U_{\text{ДНО } c15-16}$ (—), полученным суммированием напряжений по всем ДНО, установленным вблизи обмоток, входящих в цепь тока $c15-16$, число витков 188 (а); напряжения в ДНО (··· — ДНО +P15, ··· — ДНО +P16, ··· — ДНО -P15, ··· — ДНО -P16), расположенных вблизи обмоток, включённых в контур тока $c15-16$, и межвитковое напряжение U_{c15-16}/n_{c15-16} (—) в контуре $c15-16$ (б)

СРАВНЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕЖВИТКОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СРЫВЕ ПЛАЗМЫ В РАСЧЁТАХ С МЕНЯЮЩИМИСЯ И ПОСТОЯННЫМИ ТОКАМИ В ОБМОТКАХ

Расчёт срыва плазмы проведён в предположении, что токи в обмотках полоидального поля меняются в соответствии с наводимыми в них напряжениями. Моделирование срыва выполнено с теми же параметрами плазмы и начальными токами в обмотках, которые достигаются в процессе развития разряда к моменту 4,65 с.

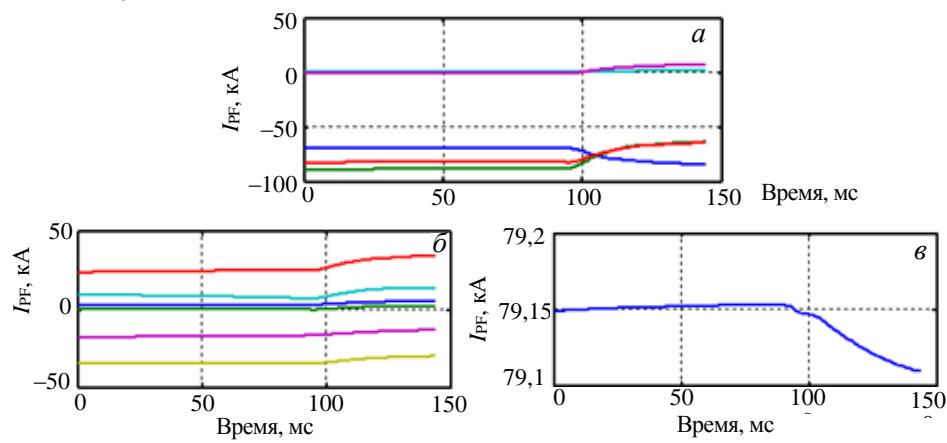


Рис. 23. Динамика токов в электрических контурах в расчёте с меняющимися токами: — c1—3, — c2, — c4, — c5—8, — c6 (а); — c9, — c10, — c11, — c12, — c13, — c14 (б); — c15—16 (в).

На рис. 23 представлена динамика контурных токов в процессе срыва при моделировании с меняющимися токами в обмотках. Отдельно показана динамика токов, относящихся к центрально-му соленоиду ($c1-3$, $c2$, $c4$, $c5-8$, $c6$), к обмоткам равновесия ($c9$, $c10$, $c11$, $c12$, $c13$, $c14$) и к обмоткам для зажигания ($c15-16$).

Опуская подробное описание результатов моделирования, полученных в расчёте с меняющимися в процессе развития срыва токами в обмотках, приведём только сравнение полученных при этом максимальных по абсолютной величине значений наводимых межвитковых напряжений с теми значениями, которые представлены в разделе «Результаты моделирования срыва плазмы вниз при фиксированных токах в обмотках».

Значения максимальных по абсолютной величине напряжений, наводимых в контурах полоидальных обмоток в процессе срыва плазмы вниз, вместе с соответствующими значениями межвитковых напряжений, полученными при расчёте срыва с постоянными токами в обмотках, даны во втором и третьем столбцах табл. 4. В четвёртом и пятом столбцах приведены значения максимальных напряжений, индуцируемых в контурах, при расчёте срыва с меняющимися токами в обмотках полоидального поля.

Т а б л и ц а 4. Максимальные значения наводимых напряжений и межвитковых напряжений

Название контура	Модель с постоянными токами в контурах		Модель с меняющимися токами в контурах	
	U , кВ	U , В/виток	U , кВ	U , В/виток
c1—3	6,70	39,86	8,51	50,67
c2	20,77	120,73	26,15	152,01
c4	15,44	89,77	19,85	115,42
c5—8	13,26	27,73	17,85	37,34
c6	11,67	59,53	15,43	78,71
c9	17,47	74,04	23,84	101,00
c10	17,60	101,14	24,16	138,86
c11	14,54	250,67	20,40	351,79
c12	17,42	281,04	24,73	398,82
c13	46,09	299,32	66,09	429,18
c14	88,44	313,62	127,71	452,86
c15—16	0,319	1,70	0,485	2,58

На рис. 24 представлено сравнение максимальных межвитковых напряжений в обмотках, достигаемых в процессе срыва плазмы вниз. Максимальные межвитковые напряжения, возникающие при моделировании в случае с постоянными токами в обмотках, показаны синим цветом, красным — напряжения, полученные при расчёте с меняющимися токами.

ВЫВОДЫ

Проведённые расчёты показывают, что в обмотках P1—P8, относящихся к центральному соленоиду, наводимые в витках обмоток напряжения не превышают 150 В. При этом межвитковые напряжения, генерируемые в процессе срыва, в расчёте с меняющимися токами в обмотках примерно на 30% выше, чем при моделировании с постоянными токами. Наибольшие напряжения индуцируются в обмотках равновесия P9—P14, используемых для управления положением и формой плазмы. Наблюдается резкое нарастание наведённых напряжений в обмотках P11—P14, расположенных с наружной стороны ВК. Наибольшие наводки напряжений возникают в случае моделирования срыва плазмы с меняющимися в обмотках токами и на 50% выше, чем при моделировании с постоянными токами. Максимальное межвитковое напряжение в витке достигается на обмотке P14 и составляет примерно 450 В, локальное напряжение на обмотке P14, расположенной в нижней части, может доходить до 500 В. Из табл. 4 следует, что максимальное напряжение на виток в контуре, включающем обмотки P15—P16, составляет всего 2,5 В. Однако локальное напряжение на виток, достигаемое на нижней обмотке P16, составляет 220 В.

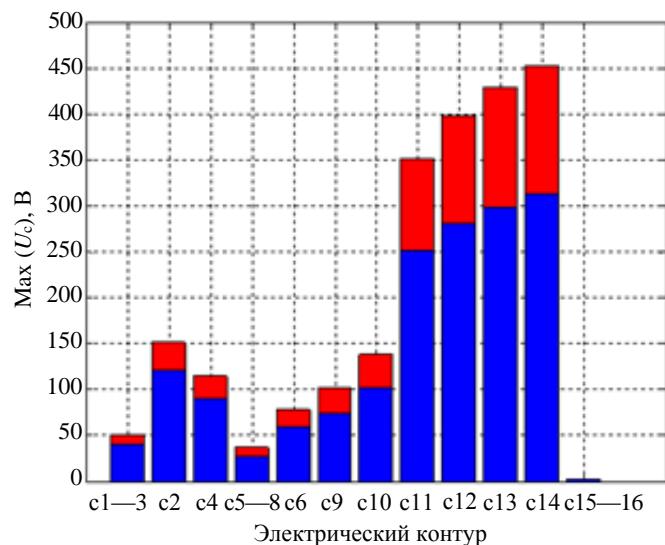


Рис. 24. Сравнение максимальных межвитковых напряжений в обмотках с постоянными и меняющимися токами в обмотках

Из анализа данных по наводимым и межвитковым напряжениям, приведённых в табл. 4, следует, что межвитковая и межслоевая изоляция должны выдерживать испытательное напряжение до 40 кВ (например, фторопластовые плёнки), а в конструкционной изоляции возможно применение стеклопластиков и эпоксидных смол. В разработанном эскизном проекте установки Игнитор не указано конкретных данных по защите обмоток от возникающих перенапряжений.

В этой связи для безопасной работы токамака Игнитор необходимо предусмотреть следующие мероприятия:

- усилить межвитковую и общую изоляцию обмоток (относительно вакуумной камеры);
- при проектировании системы питания разработать устройства (блоки) ограничения перенапряжений (как активные, например, кроубар или пороговые с управляемым тиристорным ключом, так и пассивные — на полупроводниковых ограничителях напряжений).

Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования УНУ «Комплекс установки ТСП». Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI59917X0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Coppi B., Aioldi A., Bombarda F. et al.** Critical Physics Issues for Ignition Experiments: Ignitor, MIT (RLE) Report PTP 99/06 (1999), Revised and extended May 2000, Cambridge, MA, USA.
2. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — J. Comp. Physics, 1993, vol. 109, p. 193—201.
3. **Aioldi A., Cenacchi G.** Equilibrium Configuration for Ignitor experiment. Revised and extended February 2002, FP 01/1 February 2001, Instituto di Fisica Del Plasma, Milano, Italy.



Владимир Николаевич Докука, с.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия
v.dokuka@mail.ru



Александр Алексеевич Гостев, первый зам. директора ОФТР, ветеран атомной энергетики и промышленности; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия



Рустам Рашитович Хайрутдинов, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия
khayrtd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 мая 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3, с. 93—104.