

КОМПЕНСАЦИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ  
ОБМОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА ТУМАН-3М© 2011 г. Л. Г. Аскинази, Н. А. Жубр, В. А. Корнев, С. В. Лебедев,  
Д. В. Разуменко, А. С. ТукачинскийФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26Поступила в редакцию 11.02.2011 г.  
После доработки 16.03.2011 г.

В токамаке, в котором обмотка, создающая тороидальное магнитное поле с индукцией  $B_T$ , питается от емкостного накопителя, основной причиной уменьшения  $B_T$  во время разряда являются резистивные потери. Модернизация схемы питания обмотки тороидального магнитного поля (о.т.п.) токамака ТУМАН-3М направлена, во-первых, на увеличение  $B_T$  в стадии инжекционного нагрева и, во-вторых, на обеспечение квазистационарности  $B_T$  в течение всего разряда токамака. Для этой цели в существующую схему включен дополнительный двухсекционный емкостный накопитель, коммутируемый двумя тиристорными ключами. Каждая из двух секций накопителя имеет напряжение заряда 0.25 кВ, емкость 4.32 Ф и энергозапас 135 кДж. Максимальный ток разряда секции 40 кА. Модернизированная схема компенсирует резистивные потери в о.т.п. и таким образом обеспечивает в стадии инжекционного нагрева увеличение магнитного поля на 50% по сравнению со “старой” схемой:  $B_T = 1.0$  Тл вместо 0.68 Тл. При этом схема поддерживает ток о.т.п. 110 кА с точностью 10% в течение ~60 мс.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Существовавшая до последнего времени схема питания обмотки тороидального магнитного поля (о.т.п.) токамака ТУМАН-3М обеспечивала быстрое, за время 11 мс, нарастание тока в о.т.п.  $I_{о.т.п.}$  до максимальной величины 110 кА (и соответственно тороидального магнитного поля  $B_T$  — до 1 Тл) и последующий “медленный” спад с характерным временем 160 мс [1] — см. рис. 1. Из-за спада  $I_{о.т.п.}$ , обусловленного резистивными потерями в о.т.п., величина  $B_T$  в стадии инжекционного нагрева (на 70 мс) оказывалась равной 0.68 Тл вместо 1.0 Тл в начале разряда (на 30 мс).

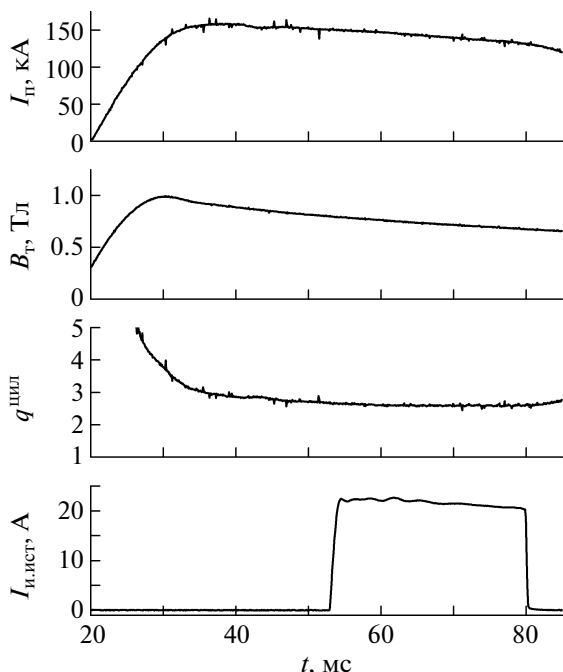
Кроме того, спад  $B_T$  приводил к необходимости снижения плазменного тока  $I_p$  для сохранения значения коэффициента запаса устойчивости  $q^{шл}$ . Это создавало трудности для ряда экспериментов, в частности для экспериментов по инжекционному нагреву [2]: следствием уменьшения  $I_p$  являлось снижение доли быстрых частиц, удерживаемых в плазме и определяющих мощность, вводимую в плазму при этом способе дополнительного нагрева [3]. Также были затруднены измерения потенциала плазмы с помощью диагностики на основе инжекции пучка тяжелых ионов, так как из-за изменения  $B_T$  в ходе разряда менялась локализация исследуемого объема, что снижало точность измерений и усложняло интерпретацию результатов [4]. Для преодоления перечисленных выше недостатков было необходимо усовершенствование схемы питания о.т.п.

В данной статье представлены результаты модернизации схемы питания о.т.п.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРЕЖНЕЙ СИСТЕМЫ  
ПИТАНИЯ О.Т.П. И ВЫБОР СХЕМЫ  
МОДЕРНИЗАЦИИ

В связи с тем, что токамак ТУМАН-3М проектировался и сооружался для проведения экспериментов по магнитному сжатию плазмы [1], его конструкция и схема питания имеют ряд особенностей, не характерных для традиционных токамаков. В частности, о.т.п. установки для снижения индуктивности изготовлена из одновитковых катушек, а не многовитковых, как в большинстве токамаков. Такая конструкция обладает низкой индуктивностью (70 мкГн), что позволяет быстро (за 3 мс) увеличивать магнитное поле  $B_T$  и таким образом осуществлять магнитное сжатие плазмы. (Поскольку в настоящее время эксперименты по магнитному сжатию не проводятся, конденсаторная батарея, позволяющая быстро увеличивать  $B_T$ , на схемах, приведенных в статье, не показана.)

Медленно меняющееся поле, используемое в экспериментах по омическому и инжекционному нагреву, в существовавшей до последнего времени схеме создается при разряде емкостного накопителя  $C_1$  на о.т.п.  $L_2$  через балластную индуктивность  $L_1$ , ограничивающую скорость нарастания тока в о.т.п. (см. рис. 2) и обеспечивающую мед-



**Рис. 1.** Эволюция плазменного тока  $I_{\text{п}}$ , продольного магнитного поля  $B_{\text{т}}$ , коэффициента запаса устойчивости  $q^{\text{шлл}}$  и форма импульса тока ионного источника инжектора нейтральных атомов  $I_{\text{и.ист}}$  (отражающая длительность фазы инжекционного нагрева) в типичном разряде токамака ТУМАН-3М до модернизации системы питания о.т.п.

ленный спад тока  $I_{\text{о.т.п.}}$ , который после разряда  $C_1$  протекает по цепи  $L_1-L_2-D_1$ .

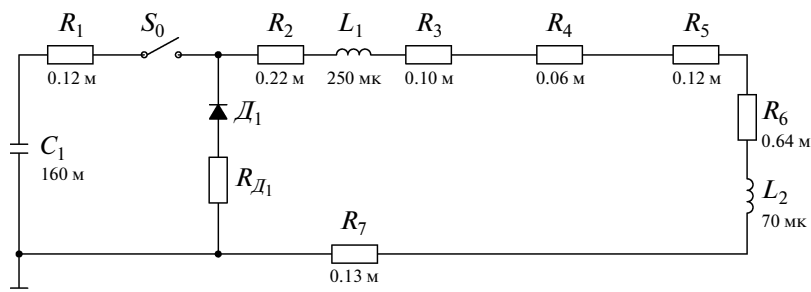
Из-за диссипации энергии в резистивных элементах такая схема питания о.т.п. не может поддерживать неизменным поле  $B_{\text{т}}$  на протяжении фазы плато тока по плазме  $I_{\text{п}}$  (см. рис. 1). Для обеспечения сценария с квазипостоянным  $B_{\text{т}}$  было необходимо разработать дополнительный источник тока в схеме питания, компенсирующий резистивные потери в цепи. Для поддержания постоянной величины  $B_{\text{т}}$  ток, обеспечивае-

мый этим источником, должен увеличиваться в течение фазы плато тока по плазме ( $\sim 60$  мс). Максимальный ток такого источника должен составлять  $\sim 40$  кА.

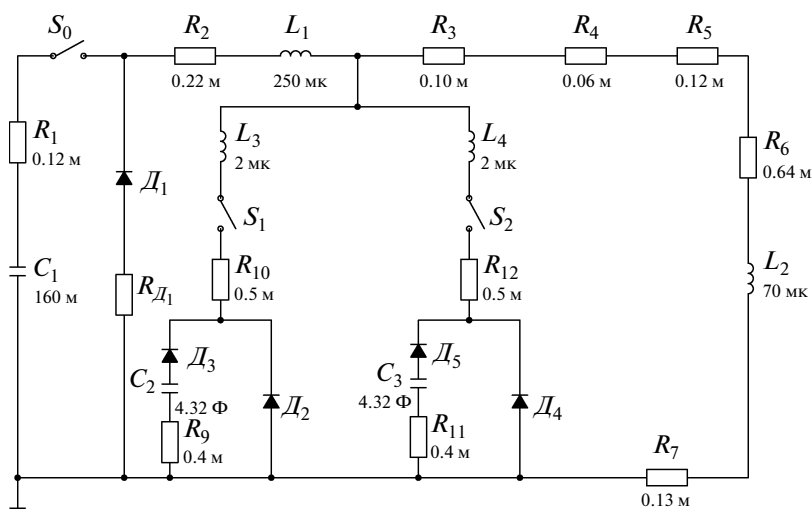
При выборе источника следовало учесть также возможность перегрева о.т.п. при увеличении питающего ее тока. Так, при работе установки в соответствии со схемой на рис. 2 энергия, выделяющаяся в о.т.п. во время разряда, составляет  $\sim 0.5$  МДж. В течение рабочего дня при следовании разрядов через 10–14 мин о.т.п. нагревается до  $\sim 30-40^\circ\text{C}$ . Выполненные нами расчеты показали, что для того, чтобы температура тороидального соленоида (при сохранении частоты следования разрядов установки) не превышала допустимых  $60^\circ\text{C}$ , дополнительное энерговыделение в о.т.п. за разряд не должно превосходить 0.3 МДж. Для этого требовалось обеспечить достаточно быстрый вывод тока из о.т.п. после окончания плазменного разряда.

В качестве дополнительного источника питания о.т.п. нами был выбран емкостный накопитель, состоящий из двух секций, коммутируемых с помощью тиристорных ключей (см. рис. 3). Расчеты показали, что при одновременном отпирании ключей  $S_1$  и  $S_2$  для обеспечения заданной величины изменения тока  $I_{\text{о.т.п.}}$  ( $<10\%$ ) на стадии плато тока по плазме оказывается достаточно использовать накопитель на основе электролитических конденсаторов с суммарной емкостью  $C_2 + C_3 = 18$  Ф (начальное напряжение  $U_0 = 170$  В, запасенная энергия  $W \approx 0.26$  МДж).

Снижения суммарной емкости дополнительной батареи можно достичь при поочередном разряде емкостей  $C_2$  и  $C_3$  (см. рис. 3). При моделировании работы этой схемы варьировались емкости конденсаторов  $C_2$  и  $C_3$ , начальные напряжения на них и моменты срабатывания ключей  $S_1$  и  $S_2$ . Перечисленные величины подбирались такими, чтобы уровень пульсаций тока в о.т.п. не превосходил 10% на протяжении плато тока ( $\sim 60$  мс).



**Рис. 2.** Схема питания обмотки тороидального поля токамака ТУМАН-3М до модернизации.  $L_2$  и  $R_6$  – индуктивность и сопротивление о.т.п.;  $L_1$  и  $R_2$  – индуктивность и сопротивление балластной индуктивности;  $C_1$  – высоковольтная конденсаторная батарея ( $5 \text{ кВ} \times 0.16 \text{ Ф}$ );  $S_0$  – игнитронный ключ, через который емкость  $C_1$  разряжается на нагрузку;  $D_1$  – силовой диод, имеющий сопротивление  $R_{D1}$ ;  $R_1, R_3-R_5, R_7$  – распределенные сопротивления токонесущих участков схемы.



**Рис. 3.** Схема питания обмотки тороидального поля после модернизации.  $L_1$  – балластная индуктивность,  $L_2$  – о.т.п. ( $R_6$  – активное сопротивление о.т.п.);  $C_1$  – высоковольтная конденсаторная батарея, коммутируемая ключом  $S_0$ ;  $C_2$  и  $C_3$  – емкости секций дополнительной конденсаторной батареи;  $R_9$  и  $R_{11}$  – внутренние сопротивления секций  $C_2$  и  $C_3$ ;  $S_1, S_2$  – ключи, коммутирующие секции дополнительной батареи в заданные моменты времени.

Численное моделирование показало, что при использовании двух батарей емкостью по 4.32 Ф удастся обеспечить требуемый уровень изменения тока  $I_{\text{о.т.п.}}$  в течение ~60 мс. Использованные при расчетах значения внутренних сопротивлений конденсаторных батарей  $R_9$  и  $R_{11}$  одинаковы и составляют 0.4 мОм, что соответствует величине этого параметра для батарей емкостью 4.32 Ф, состоящих каждая из 160 параллельно соединенных электролитических конденсаторов EPCOS B43564 (27000 мкФ × 250 В). Моделирование также показало, что дальнейшее увеличение числа конденсаторных секций не приводит к заметному уменьшению суммарной емкости дополнительной батареи (при заданной длительности фазы с квазипостоянным  $I_{\text{о.т.п.}}$ ), хотя и может несколько уменьшить амплитуду пульсаций тока в цепи питания о.т.п.

Таким образом, для питания о.т.п. была выбрана двухзвенная схема построения дополнительного емкостного накопителя. Отметим, что выбранная схема обеспечивает быстрый вывод тока из о.т.п. после плазменного разряда: ~110 мс. При этом энергия, запасенная в накопителе, не превышает 0.27 МДж. За счет этого удастся обеспечить квазистационарную величину  $V_T$  без значительного увеличения нагрева о.т.п. за время разряда.

### 3. РАБОТА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ОБМОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ

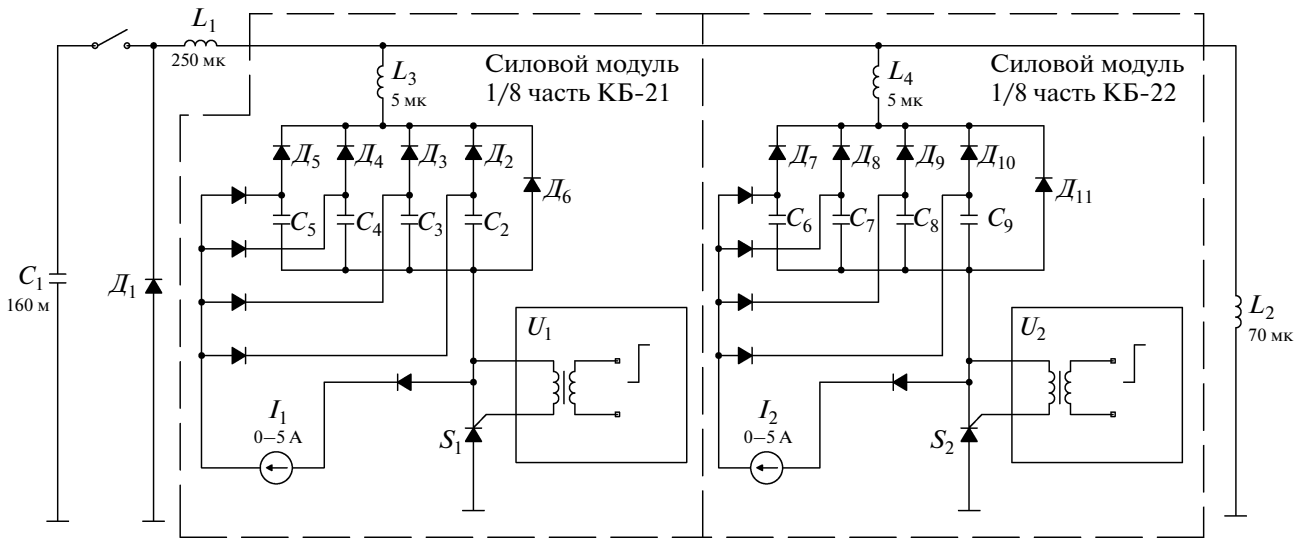
При создании системы питания о.т.п. был выбран модульный принцип конструкции, что позволяет в случае необходимости оперативно от-

ключать вышедшие из строя модули или заменять их исправными. В то же время, при необходимости уменьшения уровня пульсаций магнитного поля, появляется возможность решить эту задачу путем изменения программы управления модулями, коммутируя звенья батарей не в два, а в три (или больше) различных момента времени.

Принципиальная схема дополнительного накопителя для системы питания о.т.п., реализованная в настоящее время на установке ТУМАН-3М, представлена на рис. 4. Высоковольтная (5 кВ) батарея  $C_1$ , диод  $D_1$  и балластная индуктивность  $L_1$  являются элементами, входящими в состав штатной системы питания о.т.п. ( $L_2$  на рис. 4). Дополнительный емкостный накопитель состоит из двух одинаковых конденсаторных батарей КБ-21 и КБ-22, снабженных тиристорными ключами. Напряжения заряда батарей независимо регулируются в пределах 0–250 В. Емкость каждой батареи составляет 4.32 Ф. Моменты открывания ключей подбираются индивидуально для каждой из двух батарей из условия обеспечения не более чем 10%-ного изменения  $I_{\text{о.т.п.}}$  на протяжении плато тока по плазме.

Каждая батарея состоит из восьми идентичных силовых модулей, соединенных параллельно. Отдельный модуль состоит из четырех секций ( $C_2$ – $C_5$  и  $C_6$ – $C_9$ ), каждая из которых состоит из пяти конденсаторов. На рис. 4 для наглядности в каждой из батарей КБ-21 и КБ-22 изображен один из силовых модулей. Разряд модуля осуществляется с помощью тиристора Т173-2000-16.

Максимальные расчетные значения тока 5000 А через тиристорный ключ оказываются примерно вдвое выше допустимого среднего тока тиристора в открытом состоянии 2250 А. Однако



**Рис. 4.** Принципиальная схема дополнительного емкостного накопителя с коммутирующими устройствами, включенного в цепь питания о.т.п. в результате модернизации. КБ-21 и КБ-22 — независимо заряжаемые конденсаторные батареи, состоящие каждая из восьми идентичных силовых модулей, соединенных параллельно;  $C_2$ – $C_9$  — конденсаторные секции, состоящие каждая из пяти параллельно соединенных конденсаторов EPCOS B43564 (27 000 мкФ × 250 В);  $U_1$ ,  $U_2$  — блоки запуска тиристорных ключей  $S_1$  и  $S_2$ ;  $I_1$ ,  $I_2$  — тиристорные стабилизаторы тока заряда КБ-21 и КБ-22 соответственно.

учитывая малую длительность перегрузки и большую скважность (разряды следуют с периодом ~10–14 мин), величина параметра  $i^2t$  в описываемой схеме составляет менее  $7.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ , что во много раз меньше предельно допустимой величины  $i^2t$  для используемых тиристоров ( $12000 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ ).

Экспериментально измеренное напряжение, которое возникает в точке подключения силовых модулей в результате разряда высоковольтной батареи  $C_1$ , не превышает 950 В при максимальной величине напряжения на  $C_1$  (5000 В). Таким образом, максимальное напряжение, которое может быть приложено к тиристорам, находящимся в закрытом состоянии, оказывается значительно ниже предельно допустимой для данного класса приборов величины 1600 В. Из приведенных оценок следует, что выбранный тип тиристорных устройств способен работать в обсуждаемой схеме.

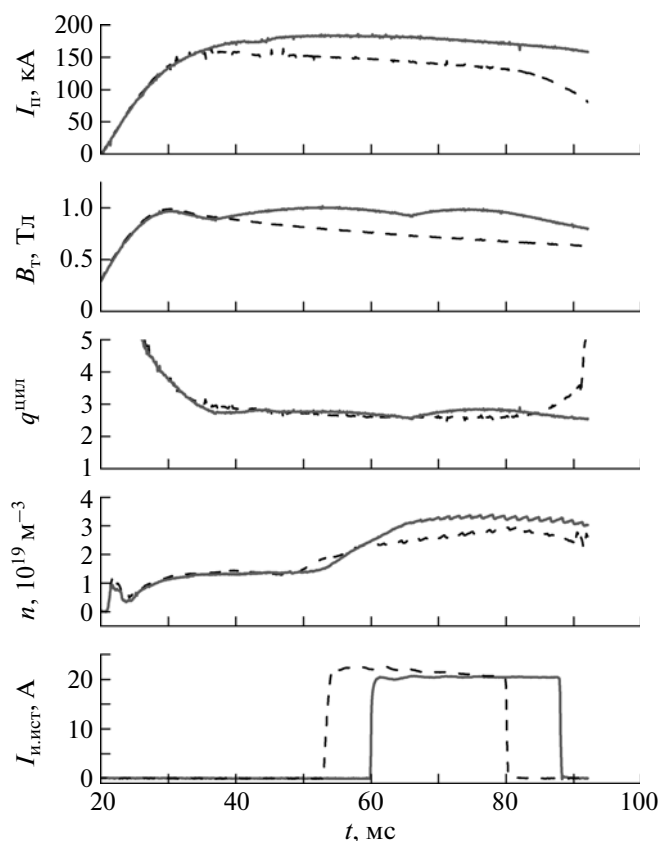
Для дублирования защиты конденсаторов от превышения напряжения (в случае пробоя тиристора) каждая секция из пяти конденсаторов защищена последовательно включенным диодом ДЧ343-1000-16 ( $D_2$ – $D_5$  и  $D_7$ – $D_{10}$ ) с соответствующими выравнивающими делителями (не показанными на схеме). Диоды  $D_6$  и  $D_{11}$  (ДЧ343-1000-16) служат для защиты конденсаторов от перезаряда отрицательным напряжением. Дроссели  $L_3$  и  $L_4$  обеспечивают отпирание тиристорных ключей в параллельно включенных силовых модулях (за счет поддержания напряжения на других тиристорах после открытия первого) и ограничивают скорость нарастания тока через тиристоры в переходных и

аварийных режимах, чтобы она не превышала критического значения.

Помимо этого каждый конденсатор снабжен плавким предохранителем, предотвращающим разряд всего накопителя на один конденсатор в случае короткого замыкания в нем. Тем не менее, в случае пробоя одного из конденсаторов в предохранителе может возникнуть дуговой разряд, что приведет к протеканию тока разряда всего модуля из 20 конденсаторов через неисправный элемент. Диоды  $D_2$ – $D_5$  и  $D_7$ – $D_{10}$  помимо дублирования защиты конденсаторов по напряжению служат для предотвращения такого развития событий.

В результате ввода в эксплуатацию модернизированной системы питания обмотки тороидального магнитного поля были существенно повышены электротехнические параметры установки. На рис. 5 представлена эволюция тока по плазме  $I_{\text{п}}$  и тороидального магнитного поля  $B_{\text{т}}$  на оси токамака в двух типичных разрядах до и после модернизации системы питания о.т.п. В обоих представленных разрядах ток в о.т.п. близок к максимальному значению (которое определяется напряжением на высоковольтной конденсаторной батарее  $C_1$ ).

В разряде с модернизированной системой питания о.т.п. значения начальных напряжений на батареях КБ-21 и КБ-22, а также моменты срабатывания соответствующих тиристорных ключей подобраны из условия максимальной продолжительности промежутка времени, в течение которого ток в о.т.п. является квазипостоянным. Как следует из рис. 5, после модернизации удается поддерживать величину тороидального магнит-



**Рис. 5.** Эволюция плазменного тока  $I_p$ , тороидального магнитного поля  $B_T$ , коэффициента запаса устойчивости  $q_{\text{цикл}}$  (без учета тороидальной поправки), средней концентрации плазмы  $n$  и форма импульса тока ионного источника  $I_{\text{и.ист}}$  инжектора нейтральных атомов. Штриховые линии – плазменный разряд до модернизации схемы питания о.т.п., сплошные – разряд после модернизации.

ного поля установки на уровне  $\sim 1$  Тл (что соответствует току в тороидальном соленоиде  $\sim 110$  кА) в течение более 60 мс при уровне пульсаций менее 10%.

При этом на поздней фазе разряда эффективное увеличение  $B_T$  оказывается весьма существенным. Например, на момент 75 мс (см. рис. 5)  $B_T$  увеличивается от 0.68 до 0.97 Тл, т.е. на 40%. Вследствие этого появляется возможность продлить (более чем на 10 мс) длительность плато тока по плазме и увеличить  $I_p$ . Это особенно важно для экспериментов по нагреву плазмы методом инжекции пучка атомов с высокой энергией (инжекционный нагрев). В частности, в результате ввода в эксплуатацию описанной выше системы питания о.т.п. максимальный ток по плазме  $I_p$  был повышен от 150 до 180 кА, а на более поздней

фазе разряда, например на момент 75 мс,  $I_p$  удалось увеличить от 135 до 170 кА. Отметим, что наблюдаемое на рис. 5 уменьшение тока в диапазоне 70–90 мс не обусловлено необходимостью снижения  $I_p$  из-за снижения  $B_T$ , а связано с особенностями схемы возбуждения плазменного тока в установке.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке ТУМАН-3М разработана и введена в эксплуатацию дополнительная система питания обмотки малоиндуктивного тороидального соленоида, существенно расширившая диапазон эксплуатационных параметров токамака. Данная система при работе совместно со штатным емкостным накопителем позволяет в течение 60 мс поддерживать ток в соленоиде на уровне  $\sim 110$  кА с точностью 10%. В результате индукция тороидального магнитного поля на протяжении всей фазы плато тока по плазме оказывается практически постоянной и достигает 1 Тл.

Вследствие проведенной модернизации системы питания о.т.п. удалось увеличить максимальную величину тока по плазме  $I_p$  от 155 до 180 кА. Одновременно в режимах с максимальными плазменными токами отпала необходимость принудительного снижения  $I_p$  во избежание развития магнитогидродинамических неустойчивостей при спаде  $B_T$ .

Описанная в данной работе система питания о.т.п. продемонстрировала высокий уровень надежности и может быть рекомендована к применению в импульсных индуктивно-емкостных системах с токами порядка десятков – сотен тысяч ампер.

Авторы благодарны за финансовую поддержку данной работы Министерству образования и науки РФ, Российской академии наук (программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 30) и Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 10-02-01414-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Г.М., Голант В.Е., Горностаев С.В. и др. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 105.
2. Askinazi L.G., Chernyshev F.V., Golant V.E. et al. // 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2–6 July 2007. ECA. 2007. V. 31F. P-1.146.
3. John Wesson. Tokamaks. Oxford University Press, 2004.
4. Askinazi L.G., Kornev V.A., Lebedev S.V. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 3517.