

93-349



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P13-93-349

В.В.Калиниченко

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕРАВНОВЕСИЯ
НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИЛ
ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ

1993

При подаче на катушку с замкнутым ферромагнитным сердечником переменного напряжения синусоидальной формы в цепи катушки будет протекать намагничивающий ток, форма которого в общем отличается от синусоидальной [1]. Искажения формы намагничивающего тока зависят от амплитуды возбуждающего напряжения и ширины петли гистерезиса материала сердечника (указанные искажения увеличиваются с ростом амплитуды возбуждающего напряжения и с расширением петли гистерезиса; см. в [1] с. 639, рис. 23-10 и с. 641, рис. 23-12). При этом, в отсутствие подмагничивания сердечника катушки полем постоянного тока, положительные и отрицательные полуволны намагничивающего тока имеют одинаковую форму и равные амплитуды. Иными словами, функция $i(t)$ будет зеркально-симметричной относительно оси абсцисс (оси времени t).

Иная картина будет наблюдаться, если одновременно с подачей переменного напряжения на катушку ее сердечник подвергнется намагничиванию полем постоянного тока. В этих условиях положительные полуволны намагничивающего тока будут отличаться от его отрицательных полуволн как по форме, так и по амплитуде. Функция $i(t)$ становится в этом случае асимметричной относительно оси абсцисс (см. в [1] с. 671, рис. 24-7).

В принципе, из изложенного выше следует, что намагничивающий ток $i(t)$ содержит информацию о параметрах намагничивающей силы (н.с.) постоянного тока, действующей на сердечник. Эта информация может быть выделена путем соответствующего преобразования намагничивающего тока. В частности, на основе сравнения амплитуд положительных и отрицательных полуволн намагничивающего тока можно судить о величине и знаке н.с. постоянного тока, которая действует на сердечник. Представляется удобным дать следующее общее название этому преобразованию: детектирование асимметрии намагничивающего тока. В результате такого детектирования получается постоянное напряжение, величина и знак которого соответствуют величине и знаку н.с. постоянного тока, действующей на сердечник. Отметим, что здесь не рассматривается детектирование путем выделения и фазочувствительного выпрямления второй гармоники. Таким образом, на основе детектирования асимметрии намагничивающего тока возможно построение преобразователей неравновесия н.с. (ампер-витков) постоянных токов. Указанные преобразователи используются для магнитного сравнения постоянных токов в устройствах для измерения постоянных токов большой силы (в магнитных компараторах или измерительных преобразователях постоянного тока).

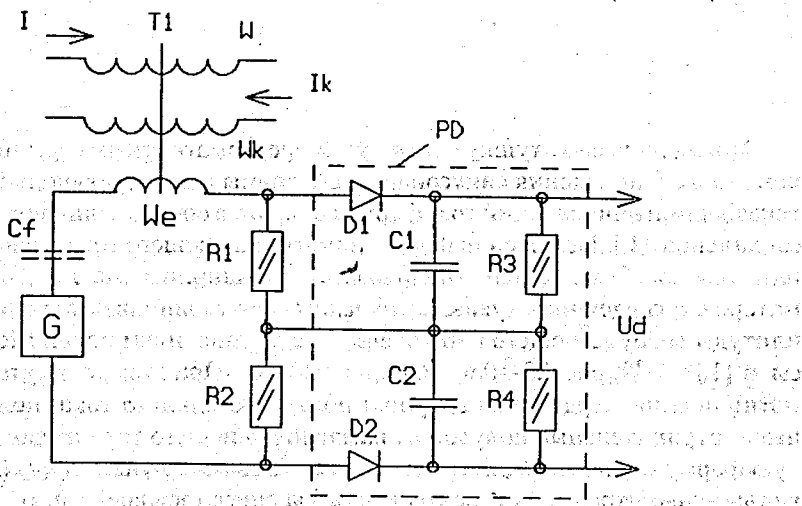


Рис. 1. Базовая схема преобразователя неравновесия ампер-витков

На рис. 1 представлена базовая схема преобразователя неравновесия ампер-витков, в основу которой положено детектирование асимметрии намагничивающего тока. Преобразователь содержит тороидальный ферромагнитный сердечник $T1$ (рабочий магнитопровод), на который намотаны обмотка возбуждения W_e и компенсационная обмотка W_k . Измерительная обмотка W выполняется обычно в виде одного проходного витка. К измерительной обмотке W подводится измеряемый постоянный ток I , к компенсационной обмотке W_k — постоянный ток компенсации I_k . Обмотка возбуждения W_e , резисторы $R1$ и $R2$ соединены последовательно друг с другом, и эта цепочка подключена к выходу генератора возбуждения G . Резисторы $R1$, $R2$ и блок пиковых детекторов PD образуют детектор асимметрии намагничивающего тока.

Намагничивающий ток, протекая по резисторам $R1$ и $R2$, создает на них падения напряжений, которые поступают на входы блока PD . Блок PD содержит первый ($D1$, $C1$, $R3$) и второй ($D2$, $C2$, $R4$) пиковые детекторы. Напряжение на выходе первого пикового детектора соответствует, например, амплитуде положительной полуволны намагничивающего тока, а напряжение на выходе второго — амплитуде отрицательной полуволны намагничивающего тока. Разность этих напряжений является выходным напряжением U_d блока PD .

Измеряемый ток I , протекая по измерительной обмотке W с числом витков N , создает н.с. IN . Ток компенсации I_k , протекая по компенсацион-

ной обмотке W_k с числом витков N_k , создает н.с. $I_k N_k$, направленную навстречу н.с. IN . На магнитопровод $T1$ действует результирующая н.с. $F = IN - I_k N_k$. Разбаланс ампер-витков ($F \neq 0$) вызывает появление асимметрии намагничивающего тока, вследствие чего на выходе PD появляется постоянная составляющая напряжения U_d (положительная или отрицательная). При балансе ампер-витков ($F = 0$) симметрия намагничивающего тока восстанавливается, при этом U_d становится равным нулю.

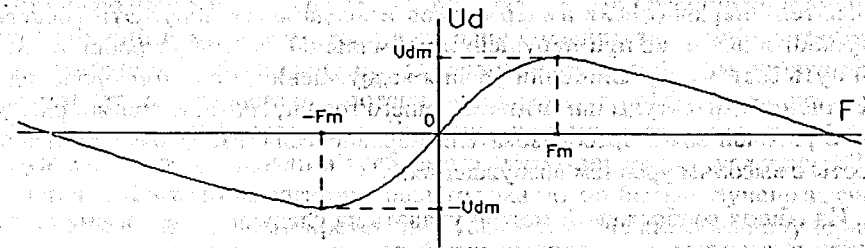


Рис. 2. Выходная статическая характеристика преобразователя неравновесия ампер-витков $U_d = f(F)$

Выходная статическая характеристика преобразователя неравновесия ампер-витков представляет собою зависимость $U_d = f(F)$. Ее вид показан на рис. 2. На начальном ее участке ($F = 0$) U_d практически линейно изменяется в соответствии с изменением F ; затем линейность нарушается и при некотором значении $|F_m|$ достигается максимальное значение $|U_{dm}|$; при дальнейшем увеличении $|F|$ напряжение уменьшается до нуля и даже может изменить знак. Таким образом, рассматриваемое устройство является преобразователем неравновесия ампер-витков: постоянная составляющая его выходного напряжения U_d по величине и знаку соответствует разбалансу ампер-витков F (в некотором ограниченном диапазоне значений F).

Величина измеряемого тока I определяется в момент баланса н.с. (равновесия): в идеальном случае (при точном балансе) $F = 0$ (критерием баланса является $U_d = 0$)

$$I = I_k N_k / N. \quad (1)$$

В первом приближении рабочей зоной выходной статической характеристики можно считать ее участок от $-F_m$ до $+F_m$. В процессе работы разбаланс ампер-витков должен быть меньше $|F_m|$. В противном случае нор-

мальная работа измерительного устройства, содержащего преобразователь неравенства ампер-витков, нарушается.

При измерении больших постоянных токов (сотни ампер — десятки килоампер) начальный разбаланс ампер-витков существенно превышает указанные пределы. Поэтому первостепенной задачей является обеспечение работоспособности измерительных устройств рассматриваемого типа в широком диапазоне значений измеряемых токов. Здесь укажем два пути решения этой задачи. Первый из них состоит в том, что в измерительное устройство вводятся средства для автоматического поиска рабочей зоны преобразователя неравенства ампер-витков и ввода в эту зону. Эти средства вступают в действие при нарушении нормальной работы устройства. Второй путь состоит в увеличении уровня возбуждения, при этом происходит увеличение амплитуды намагничивающего тока и, соответственно, расширение рабочей зоны преобразователя неравенства ампер-витков (режим работы с высоким уровнем возбуждения).

Из общих соображений можно указать на следующие основные достоинства и недостатки указанных путей решения задачи. В первом случае уровень возбуждения может быть выбран из условия получения минимальной погрешности преобразователя неравенства ампер-витков (режим работы с оптимальным уровнем возбуждения), что является несомненным достоинством, так как позволяет повысить точность измерительного устройства. В частности, для ослабления эффекта «магнитной памяти», который может вызвать сдвиг нуля выходного напряжения преобразователя неравенства ампер-витков, амплитуда возбуждающего напряжения выбирается достаточной для насыщения магнитопровода. Недостатком в этом случае является относительное усложнение устройства за счет дополнительных средств для поиска и ввода в рабочую зону преобразователя неравенства ампер-витков.

Режим работы преобразователя неравенства ампер-витков с оптимальным уровнем возбуждения является весьма перспективным в устройствах измерения и стабилизации больших постоянных токов. Технические решения по такого рода устройствам будут обсуждаться в отдельной работе. В настоящей работе основное внимание уделено обсуждению вопросов, относящихся к реализации режима работы с высоким уровнем возбуждения.

Реализация режима работы с высоким уровнем возбуждения не приводит к усложнению устройства, однако здесь следует ожидать увеличения погрешности преобразователя неравенства ампер-витков. Поэтому этот путь решения задачи следует использовать в тех случаях, когда допустимая погрешность измерительного устройства имеет порядок 10^{-3} , а определяющими являются простота и надежность.

Для надежной работы измерительного устройства, содержащего рассматриваемый преобразователь неравенства ампер-витков, необходимо выполнить условие

$$I_{em} N_e \geq 2I_m N, \quad (2)$$

где I_{em} — амплитуда намагничивающего тока, I_m — максимальное значение измеряемого тока. Например, при $I_m = 1000$ А, $N = 1$ виток и умеренном количестве витков обмотки возбуждения ($N_e = 1000$ витков) амплитуда намагничивающего тока I_{em} составляет порядка 2 А. При расширении диапазона значений измеряемого тока в сторону больших значений соответственно требуется и увеличение I_{em} . С увеличением амплитуды намагничивающего тока возрастают потери мощности в элементах контура возбуждения, что нежелательно. Уменьшение мощности потерь в контуре возбуждения при сохранении требуемого (в соответствии с условием (2)) значения амплитуды намагничивающего тока может быть получено за счет уменьшения длительности протекания тока в течение каждого полупериода напряжения возбуждения.

Уменьшение длительности импульсов намагничивающего тока достигается (в простейшем случае) включением последовательно с W_e , $R1$ и $R2$ формирующего конденсатора C_f . Включение конденсатора C_f показано на базовой схеме преобразователя (рис. 1) пунктиром. В этом случае возбуждение целесообразно осуществлять переменным напряжением прямоугольной формы, а генератор возбуждения G выполнять в виде транзисторного или тиристорного инвертора напряжения. Под действием напряжения возбуждения происходит перезаряд конденсатора C_f от генератора возбуждения G через элементы контура возбуждения (W_e , $R1$ и $R2$). Участие конденсатора C_f в формировании намагничивающего тока проявляется в уменьшении длительности импульсов этого тока. При этом, как и для схемы без конденсатора C_f , функция $i(t)$ обладает симметрией при $F = 0$, а при $F \neq 0$ симметрия нарушается.

Базовая схема (рис. 1) преобразователя неравенства ампер-витков (с конденсатором C_f или без него) имеет существенный недостаток: напряжение возбуждения, приложенное к обмотке возбуждения W_e , благодаря прямой магнитной (трансформаторной) связи через магнитопровод $T1$ передается к обмоткам измерительной W и компенсационной W_k . При малых значениях эквивалентных импедансов цепей, подключенных к обмоткам W и W_k , здесь будут протекать большие переменные токи на частоте возбуждения и нормальная работа преобразователя нарушится. Поэтому самостоятельного применения рассматриваемая базовая схема преобразователя неравенства практически не нашла.

Введение магнитного экрана [2] в преобразователь по схеме рис. 1 в значительной степени увеличивает индуктивность компенсационной обмотки W_k , что обеспечивает некоторое ослабление переменного тока, возникающего в цепи компенсации из-за трансформаторной связи между обмотками W_k и W_e . Такой преобразователь неравновесия ампер-витков (с одним рабочим магнитопроводом и с магнитным экраном) может быть использован на практике в тех случаях, когда его измерительная и компенсационная обмотки будут включаться в цепи, содержащие относительно большие индуктивные сопротивления. Например, в стабилизаторах постоянного тока, нагрузки которых имеют большую индуктивность, а также в тех случаях, когда в соответствующих цепях стабилизаторов имеются дроссели или их транзисторные аналоги.

Техническое решение по стабилизатору постоянного тока, содержащему преобразователь неравновесия ампер-витков с магнитным экраном, предложено в [2]. Варианты реализации стабилизаторов тока этого типа обсуждаются в [3—5].

В рассматриваемом здесь режиме работы преобразователя неравновесия ампер-витков (амплитуда намагничивающего тока соответствует условию (2), в цепи возбуждения включен конденсатор C_p) возможны искажения его выходной статической характеристики, которые проявляются в уменьшении крутизны или в появлении ложных нулей в окрестности истинного нуля ($F = 0$), а также в появлении провалов при относительно больших значениях F . В [6—10] предложены технические решения, с помощью которых достигается уменьшение искажений выходных статических характеристик преобразователей неравновесия ампер-витков, показаны различные варианты выполнения детекторов асимметрии намагничивающего тока, представлены варианты выполнения генераторов возбуждения.

В [11] предложен преобразователь неравновесия ампер-витков, принципиальная схема которого представлена на рис. 3. Преобразователь неравновесия ампер-витков содержит тороидальные магнитопроводы $T1$ и $T2$ (рабочие магнитопроводы, на каждом из которых соответственно намотаны обмотки возбуждения W_{e1} и W_{e2}), магнитный экран $T3$, измерительную обмотку W , компенсационную обмотку W_k , генератор возбуждения G , первый C_{f1} и второй C_{f2} формирующие конденсаторы, резисторы $R1$, $R2$ и $R3$, пиковые детекторы $PD1$ и $PD2$. Как и в предыдущем устройстве, пиковые детекторы $PD1$, $PD2$ и резисторы $R1$, $R2$ образуют детектор асимметрии намагничивающего тока.

Как и в базовой схеме, намагничивающие токи магнитопроводов $T1$ и $T2$ имеют симметрию при $F = 0$, которая нарушается при $F \neq 0$. В преобразователе неравновесия ампер-витков по схеме рис. 3 имеется один детектор

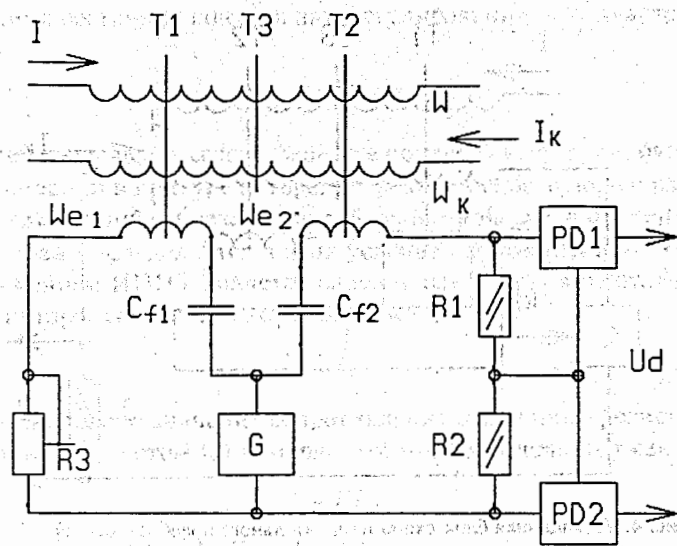


Рис. 3. Принципиальная схема преобразователя неравновесия ампер-витков с высоким уровнем возбуждения

асимметрии намагничивающего тока, включенный в цепь намагничивающего тока магнитопровода $T2$. В цепь намагничивающего тока магнитопровода $T1$ можно также включить второй детектор асимметрии, а выходные напряжения обоих детекторов подать на блок суммирования напряжений, выходное напряжение которого будет выходным напряжением преобразователя неравновесия ампер-витков. Такое усложнение преобразователя ампер-витков позволяет уменьшить пульсации его выходного напряжения, что в ряде случаев может быть весьма полезно.

Обмотки возбуждения W_{e1} и W_{e2} соединены параллельно таким образом, чтобы суммарный переменный поток $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ на частоте возбуждения относительно обмоток измерительной W и компенсационной W_k равнялся нулю; здесь Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки в магнитопроводах $T1$ и $T2$ соответственно. При этом напряжение возбуждения в идеальном случае не будет индуцироваться в обмотки W и W_k (при идентичных магнитопроводах $T1$, $T2$ и других элементах в цепях возбуждения).

На практике введением магнитопровода $T2$ с обмоткой W_{e2} полностью исключить передачу напряжения возбуждения в обмотку компенсации W_k не удастся, но существенное ослабление уровня помех на частоте возбуждения достигается. Благодаря этому для нормального функционирования

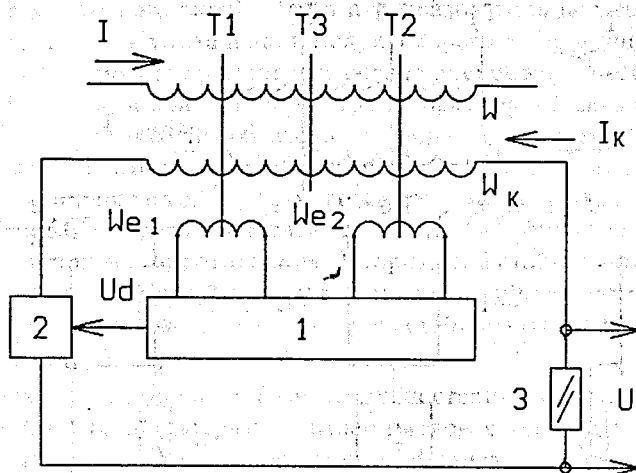


Рис. 4. Упрощенная блок-схема измерительного преобразователя постоянного тока

преобразователя неравновесия ампер-витков с двумя рабочими магнитопроводами и магнитным экраном не требуется создания дополнительных условий, подобных изложенным выше, для обеспечения работоспособности преобразователя с одним рабочим магнитопроводом.

На рис. 4 показана упрощенная блок-схема измерительного преобразователя постоянного тока (ИППТ), которая реализуется на основе обсуждаемого варианта выполнения преобразователя неравновесия ампер-витков. Измерительный преобразователь постоянного тока, в котором осуществляется преобразование измеряемого тока в адекватное ему напряжение U , является необходимым узлом измерительной или стабилизационной системы постоянного тока большой силы. ИППТ содержит тороидальные магнитопроводы $T1$ и $T2$ (рабочие магнитопроводы), магнитный экран $T3$, обмотки возбуждения W_{e1} , W_{e2} , измерительную обмотку W , компенсационную обмотку W_k , а также блок возбуждения и детектирования асимметрии намагничивающего тока магнитопровода I (или магнитопроводов). Все эти узлы в совокупности образуют собственно преобразователь неравновесия ампер-витков. Кроме того, ИППТ содержит регулятор постоянного тока 2 и эталонный резистор 3.

ИППТ представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования следящего типа. Действие контура авторегулирования направлено на поддержание баланса н.с. постоянных токов, действующих на магнитопроводы преобразователя неравновесия ампер-витков. В установив-

шемся режиме состояние контура авторегулирования описывается соотношением

$$IN - I_k N_k = \Delta F,$$

где ΔF — действующее рассогласование в контуре авторегулирования. При большом усилении в контуре авторегулирования действующее рассогласование ΔF является пренебрежимо малой величиной ($\Delta F = 0$). Величина измеряемого тока I определяется в этих условиях соотношением (1). Выходным напряжением ИППТ является падение напряжения на эталонном резисторе 3, которое создается током компенсации I_k

$$U = I_k R, \quad (3)$$

где R — номинальное значение сопротивления эталонного резистора 3. Из соотношения (1) с учетом (3) измеряемый ток I определяется как

$$I = KU,$$

где K — постоянная ИППТ, $K = N_k / NR$.

Через массивный магнитный экран осуществляется прямая магнитная (трансформаторная) связь между обмотками измерительной W и компенсационной W_k [11]. Поэтому при относительно небольшом суммарном активном сопротивлении R_Σ в цепи компенсационной обмотки происходит трансформация (практически без искажений) переменной составляющей измеряемого тока в цепь компенсационной обмотки ($R_\Sigma = R + R_k + R_{\text{вых}}$, где R — номинальная величина сопротивления эталонного резистора 3, R_k — активное сопротивление компенсационной обмотки W_k , $R_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление регулятора постоянного тока 2), благодаря чему ИППТ имеет широкую полосу пропускания.

Следует отметить, что в ИППТ, преобразователь неравновесия ампер-витков которого содержит один рабочий магнитопровод и магнитный экран [2], получить широкую полосу пропускания за счет трансформаторной связи (через магнитный экран) между измерительной и компенсационной обмотками практически не удастся. Это обусловлено относительно высоким уровнем помех на частоте возбуждения, появляющихся в цепи компенсационной обмотки за счет трансформаторной связи через рабочий магнитопровод между этой обмоткой и обмоткой возбуждения. Средства, вводимые в ИППТ для подавления этих помех, приводят к сужению полосы пропускания ИППТ.

Магнитопроводы и обмотки, входящие в ИППТ, образуют в сборе так называемый магнитомодуляционный узел (ММУ). На рис. 5 представлена конструктивная схема ММУ обсуждаемого ИППТ (рис. 4). Здесь 1 и 2 —

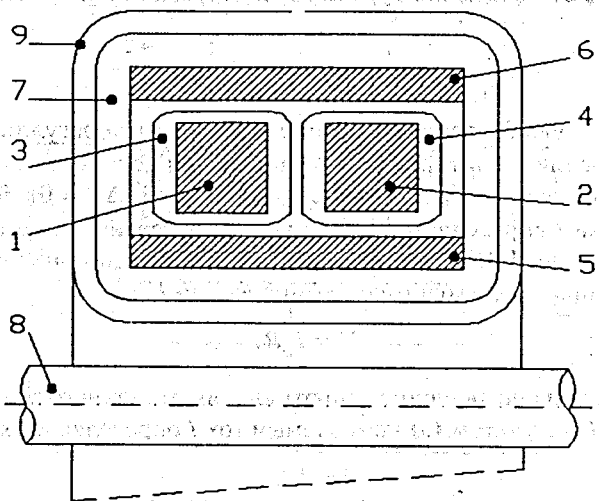


Рис. 5. Конструктивная схема магнитомодуляционного узла

соответственно тороидальные магнитопроводы $T1$ и $T2$; 3 и 4 — соответственно обмотки возбуждения W_{e1} и W_{e2} ; 5 и 6 — внутренний и внешний тороидальные магнитопроводы, образующие магнитный экран $T3$; 7 — компенсационная обмотка W_k , 8 — измерительная обмотка W , 9 — электростатический экран (на блок-схеме ИППТ не показан). Магнитный экран в целом ослабляет влияние внешних магнитных полей на преобразователь неравновесия ампер-витков. Внутренний магнитопровод 5 магнитного экрана, кроме того, уменьшает искажения рабочего магнитного поля, создаваемого обмоткой 8.

Технические решения по преобразователю неравновесия ампер-витков (схема рис. 3) и по ИППТ (схема рис. 4) были созданы в процессе разработки системы питания магнитных элементов циклотрона У-120К (технический проект циклотрона У-120К был разработан для Республики Куба в 1989 г.). Эти решения являются базой для рабочего проектирования соответствующих устройств.

Литература

1. Зевеке Г.В. и др. — Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975.
2. Калиниченко В.В. — А. с. 1180862 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1985, №35, с. 193.

3. Батманова Э.К. и др. — Сообщение ОИЯИ 13-87-781, Дубна, 1987.
4. Ахманов В.В. и др. — Сообщение ОИЯИ Р13-90-532, Дубна, 1990.
5. Батманова Э.К. и др. — Сообщение ОИЯИ Р13-91-406, Дубна, 1991.
6. Калиниченко В.В., Крживанек М. — А. с. 1288665 (СССР). Опубликовано в ОИ; 1987, №5, с.191.
7. Калиниченко В.В. — А. с. 1451612 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1989, №2, с.181.
8. Калиниченко В.В. — А. с. 1647439 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1991, №17, с.149.
9. Калиниченко В.В. — А. с. 1645947 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1991, №16, с.185.
10. Батманова Э.К. и др. — А. с. 1652973 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1991, №20, с.181.
11. Батманова Э.К., Калиниченко В.В. — А. с. 1467545 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1989, №11, с.191.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 сентября 1993 года.