

К-937

914916

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

9 - 6524

И.А.Курсков

**ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ
И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СИНХРОФАЗОТРОНА
НА 10 ГЭВ**

**Специальность 05.280 - электрофизические установки
и ускорители**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1972

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Л.Н. Беляев

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

А.М. Столов

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Б.И. Замолодчиков

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Институт физики высоких энергий (г. Серпухов).

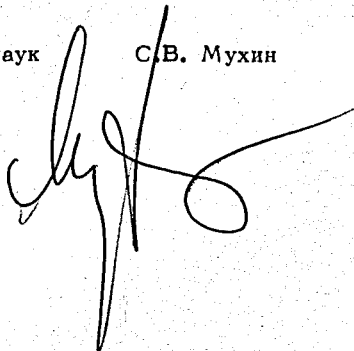
Автореферат разослан *9 августа* 1972 г.

Защита диссертации состоится *11 сентября* 1972 г.
на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований (ЛВЭ ОИЯИ).

Адрес: г. Дубна, Московской обл., ОИЯИ, конференц-зал
Лаборатории высоких энергий.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

С.В. Мухин



9 - 6524

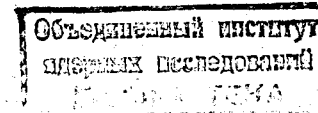
И.А.Курсков

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ
И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СИНХРОФАЗОТРОНА
НА 10 ГЭВ

Специальность 05.280 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с усовершенствованием защитных устройств системы электропитания синхροфазотрона.

Одним из путей увеличения эффективного использования ускорителей и организации экономичного режима эксплуатации является повышение надежности энергетических систем, что связано с изучением аварийных режимов, разработкой автоматических систем контроля и защиты.

Мощность системы электропитания ускорителя определяется объемом создаваемого ею магнитного поля и в целом эта система является дорогим элементом установки.

В мировой практике эксплуатации ускорителей известны случаи, когда из-за несовершенства защитных устройств развивались аварийные ситуации, что приводило к непроизводительным простоям, а в ряде случаев - к серьезным разрушениям.

Вопросы усовершенствования защитных устройств являются постоянной заботой службы эксплуатации энергетических комплексов синхροфазотрона и разработчиков систем питания новых строящихся мощных ускорителей на высокие энергии.

Система питания синхрофазотрона, включающая обмотку возбуждения электромагнита, ионный преобразователь, синхронные генераторы, приводимые во вращение асинхронными двигателями с маховиками весом по 56 т, представляет собой сложную электротехническую установку, работающую в выпрямительно-инверторном режиме. Максимальная эксплуатационная импульсная мощность преобразователя составляет около 140000 квт.

Бесперебойность работы синхрофазотрона достигнута прежде всего за счет надежности электромагнита и гибкости главной схемы преобразователя, разработанных НИИЭФА им. Д.В.Ефремова.

Со времени наладки и пуска ускорителя росла культура эксплуатации, изучались аварийные режимы, на основе чего создавались специальные схемы управления и защиты, что еще более увеличило надежность работы системы питания. Общий процент простоя и потерь рабочего времени ускорителя из-за неполадок в системе питания в настоящее время не превосходит 1,5%.

Диссертация состоит из введения и четырех глав и является обобщением работ автора по наладке и усовершенствованию электрических защит за период с 1955 по 1969 год.

Во введении отмечается, что в основе построения защитных устройств советских и зарубежных ускорителей используются приемы и методы техники релейной защиты промышленных энергосистем с учетом особенностей работы ускорителей.

Глава первая посвящена исследованию аварийных режимов в трехфазных мостовых выпрямительных схемах, из которых скомпонована главная схема преобразователя синхрофазотрона; исследованию схемы гашения поля, определению реактансов и

перенапряжений в роторе одного из главных синхронных генераторов, расчету ударного тока короткого замыкания на полюсах преобразователя.

Задачей исследования являлось:

а) расчет токов замыкания на землю, определение влияния режимов работы преобразователя на величину и закон изменения токов замыкания на землю, вызывающих изменение азимутальной асимметрии магнитного поля синхрофазотрона;

б) рассмотрение причин ложной работы проектных земляных защит при обратных зажиганиях, прорывах и пропусках в поджигании вентилях преобразователя;

в) определение надежности работы оборудования в аварийных режимах.

Электромагнитные процессы в трехфазной мостовой выпрямительной схеме рассмотрены без учета емкостных и активных утечек (см., например, /1/). На основании анализа процессов коммутации с применением метода наложения и теоремы об эквивалентном генераторе разработана методика расчета малых токов замыкания на землю, амплитудное значение которых меньше токов нагрузки, протекающих через вентиль. Показано, что для этого случая нелинейную схему с вентилями можно заменить линейной (таблица 1). Методика проверена экспериментально на маломощном преобразователе. С учетом двенадцатифазной схемы выпрямления рассчитаны токи в системе питания синхрофазотрона и получены следующие результаты:

Таблица 1

№	Режим работы преобразователя	Расчетная схема	Преобразованная схема	Напряжение аварийного замыкания при $\omega t = 0$	Расчетное сопротивление	
1	Нормальный режим			$U_{\Sigma} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{\text{ф}} \text{ф} \left(\frac{2 \cos 3\beta}{2.4} + \frac{2 \cos 9\beta}{8.10} + \frac{2 \cos 15\beta}{14.16} + \dots \right) + \frac{2 \cos 21\beta}{20.22} + \dots$ $\beta = \omega t$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j(X'_{\text{ф}} + X_{\text{с}})(n)$ $X'_{\text{ф}}(n) = \frac{X_{\text{ф}}(n)}{3}$	
2	Замыкание на стороне переменного тока			$U_{\Sigma} = U_{\text{ф}} \text{ф} \cos \beta + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{\text{ф}} \text{ф} \left(\frac{2 \cos 3\beta}{2.4} + \frac{2 \cos 9\beta}{8.10} + \frac{2 \cos 15\beta}{14.16} + \dots \right) + \frac{2 \cos 21\beta}{20.22} + \dots$ $\beta = \frac{U_{\Sigma}}{U_{\text{ф}}}$	а) Ток $I_{\text{с}} = \frac{R_{\Sigma}}{4} - j(X'_{\text{ф}} + X_{\text{с}})(n) + 3U_{\Sigma}$ б) ток $I_{\Sigma} = \frac{2\pi(n) + jX_{\text{ф}}(n)}{2\pi(n) - jX_{\text{ф}}(n)}$ $Z_{\Sigma}(n) = \frac{R_{\Sigma}}{4} - j(X'_{\text{ф}}(n) + X_{\text{с}}(n))$ $n = 3.813 \frac{\omega t}{\pi}$	
3	Замыкание на стороне постоянного тока			$U_{\Sigma} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{\text{ф}} \text{ф} \left(1 - \frac{2 \cos 6\beta}{5.7} - \frac{2 \cos 12\beta}{11.13} - \frac{2 \cos 18\beta}{17.19} - \dots \right)$ при замыкании на полюсе	Ток I_{Σ} при замыкании на полюсе $\frac{R_{\Sigma}}{4} - jX_{\text{с}}$	
4	Прорыв вентилей			$U_{\Sigma} = U_{\text{ф}}$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j(X'_{\text{ф}} + X_{\text{с}})(n)$	
5	Обратная задержка			$U_{\Sigma} = 0.08 U_{\text{ф}} \text{ф} + U_{\text{ф}} \text{ф} (-0.012 \cos \beta - 0.164 \cos 3\beta + 0.07 \cos 5\beta - 0.022 \cos 7\beta + \dots)$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j(X'_{\text{ф}} + X_{\text{с}})(n)$	
6	Отключен вентиль 2	п. 5, вентиль 2 отключен	п. 5	$U_{\Sigma} = U_{\text{ф}} \text{ф} (0.08 - 0.25 \sin(\omega t - 225^\circ) + 0.18 \sin(3\omega t - 330^\circ) + 0.09 \sin(5\omega t - 225^\circ) - 0.037 \sin(7\omega t - 225^\circ) - 0.008 \cos 6\beta + \dots)$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j(X'_{\text{ф}} + X_{\text{с}})(n)$	

1. Ток замыкания на землю на выводах генераторов равен 70 а, в нуле - 19 а; из этого следует, что земляная защита генераторов не должна иметь зоны нечувствительности, потому что опасным для генераторов током считается ток 5 а и более.

2. Величина и гармонический состав токов, протекающих через среднюю точку нагрузки преобразователя при его аварийных режимах, отличаются от токов замыкания на землю; это отличие использовано при разработке новых земляных защит и схемы контроля азимутальной асимметрии поля синхростатора вследствие утечек через распределенные емкости и сопротивления.

3. Причина ложной работы земляных защит заключается в том, что при работе преобразователя появляется неравенство проводимостей фаз на землю, в результате чего происходит смещение нейтрали генераторов, которое зависит также от режима работы преобразователя.

4. Получен спектр гармоник напряжения между полюсами преобразователя, что позволило определить частотную характеристику срабатывания пускового органа защиты от двухфазного опрокидывания инвертора.

Во второй части первой главы расчетно-экспериментальным путем определено:

а) постоянная времени гашения поля генераторов при междуполюсном коротком замыкании равна - 0,21 сек, при холостом ходе - 1,34 сек;

б) напряжение на кольцах ротора не превосходит - 3500 в;

в) ударный ток междуполюсного короткого замыкания в преобразователе равен по расчету - 134000 а, по осциллограмме - 120000 а.

Во второй главе решаются вопросы создания земляной защиты всей системы главного тока синхροфазотрона; контроль изоляции генераторов, максимальная токовая защита стороны постоянного тока преобразователя и предложенные диссертантом новые схемы защиты.

Новая схема земляной защиты стороны переменного тока преобразователя, в отличие от типовых схем, реагирует на ток, протекающий через заземляющую емкость средней точки вспомогательного активного сопротивления, подключенного параллельно обмотке электромагнита, и служащего для ограничения перенапряжений на ней. Такое решение обеспечивает защиту стороны переменного тока преобразователя без мертвой зоны, потому что в нормальном режиме величина тока через заземляющую емкость определяется последовательным соединением с емкостью стороны переменного тока преобразователя, которая в режиме замыкания на землю шунтируется.

В новой схеме земляной защиты стороны постоянного тока преобразователя /2/, работающей с максимальной чувствительностью при замыканиях в области средней точки обмотки возбуждения синхροфазотрона, когда типовая защита не срабатывает, применено включение напряжения частотой 25 гц на силовую схему преобразователя.

В качестве вспомогательного источника частотой 25 гц предложен магнитный делитель частоты 50 гц с коэффициентом деления 2, основанный на явлении параметрического резонанса. Выходная обмотка делителя включена последовательно с заземляющей емкостью C_0' (рис. 1).

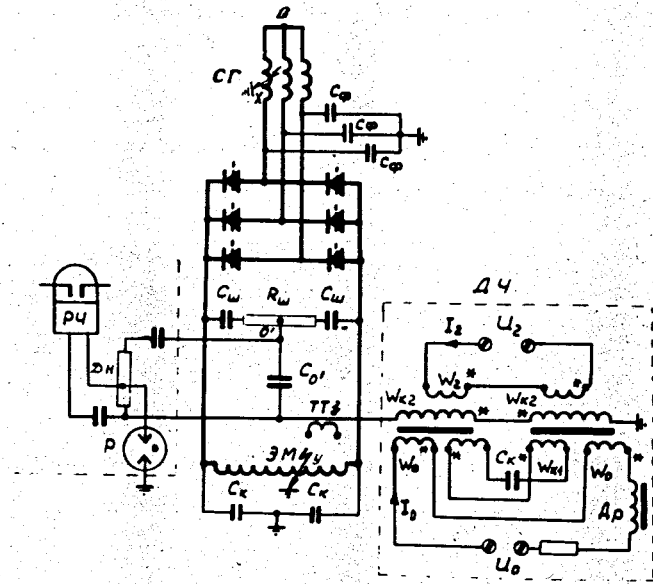


Рис. 1. Схема земляной защиты преобразователя с использованием параметрического делителя частоты.

Реагирующее частотно-избирательное реле подключено к делителю напряжения на емкости C_0' . Максимальная чувствительность обеспечивается за счет резонансного повышения напряжения частоты 25 гц на емкости C_0' при замыканиях в области средней точки обмотки. Предложен экспериментальный метод определения внешней характеристики напряжения делителя в зависимости от нагрузки и гармоник тока, протекающих по выходной обмотке. Разработана конструкция полупроводникового частотно-избирательного реле с применением простейшей схемы избирательного усилителя и нуль-индикатора.

При усовершенствовании рассмотренных защитных устройств в системе питания синхροфазотрона получены следующие результаты:

1) защита стороны переменного тока преобразователя работает без выдержки времени, вследствие чего размеры повреждений минимальны (рис. 2).

2) осуществлен контроль токов утечек, вызывающих изменение азимутальной асимметрии магнитного поля синхροфазотрона.

3) защита от замыканий на землю обмотки возбуждения ускорителя не имеет зоны нечувствительности.

Третья глава посвящена конструированию контактных и бесконтактных пусковых органов с комбинированной характеристикой срабатывания защиты от однофазного опрокидывания инвертора; разработке бесконтактного пускового органа защиты от двухфазного опрокидывания инвертора. На основании работы /3/ и анализа опыта эксплуатации /11/ показано, что вентиль определяет основные требования к защите; автором совместно с коллективом сотрудников предложен ее новый принцип, заключающийся в закорачивании обмотки возбуждения синхροфазотрона через две параллельные цепи с замыкателем и сопротивлением в одной из цепей и с замыкателем без сопротивления (короткозамыкателем) - в другой. Управление замыкателем с сопротивлением предложено производить от пускового органа защиты от двухфазного опрокидывания инвертора, а управление короткозамыкателем - от пускового органа защиты от однофазного опрокидывания инвертора /4/. На основании ана-



Рис. 2. Снимок места замыкания на землю обмотки статора генератора 1СГ-1. Замыкание произошло приблизительно в середине фазы. Расчетный ток замыкания на землю, протекавший в месте повреждения, был равен 39 а.

лиза изменения напряжения на обмотке возбуждения электромагнита в зависимости от тока в ней при однофазном опрокидывании инвертора обоснована оптимальная характеристика срабатывания трех разработанных пусковых органов защиты от однофазного опрокидывания инвертора.

Показано, что использование устройства, имеющего комбинированную характеристику (напряжение срабатывания в зависимости от тока) исключает блокировочные реле и тем самым повышает надежность защиты.

Предложено применить максимальную токовую защиту с комбинированной характеристикой. Характеристика срабатывания защиты подобна вольт-амперной характеристике обмотки возбуждения при однофазном опрокидывании. Использование бесконтактных элементов: трансформатора постоянного тока и промежуточного насыщающегося трансформатора, питающих рабочие обмотки усилителя с внутренней обратной связью, обмотка управления которого подключена к датчику напряжения, позволило разработать устройство для максимальной токовой защиты с вольтметровой блокировкой (бесконтактно) электрических систем питания установок, работающих в импульсном режиме /5/ и, в частности, для защиты от однофазного опрокидывания инвертора системы электропитания синхροфазотрона.

На рис. 3 приведена схема бесконтактного пускового органа. Предложен метод расчета уставок срабатывания и разработана конструкция релейной схемы максимальной токовой защиты с вольтметровой блокировкой, позволяющая определять неисправную преобразовательную цепочку, что вместе с имеющейся индикацией прорывов вентилей упрощает отыскивание неисправного вентилей.

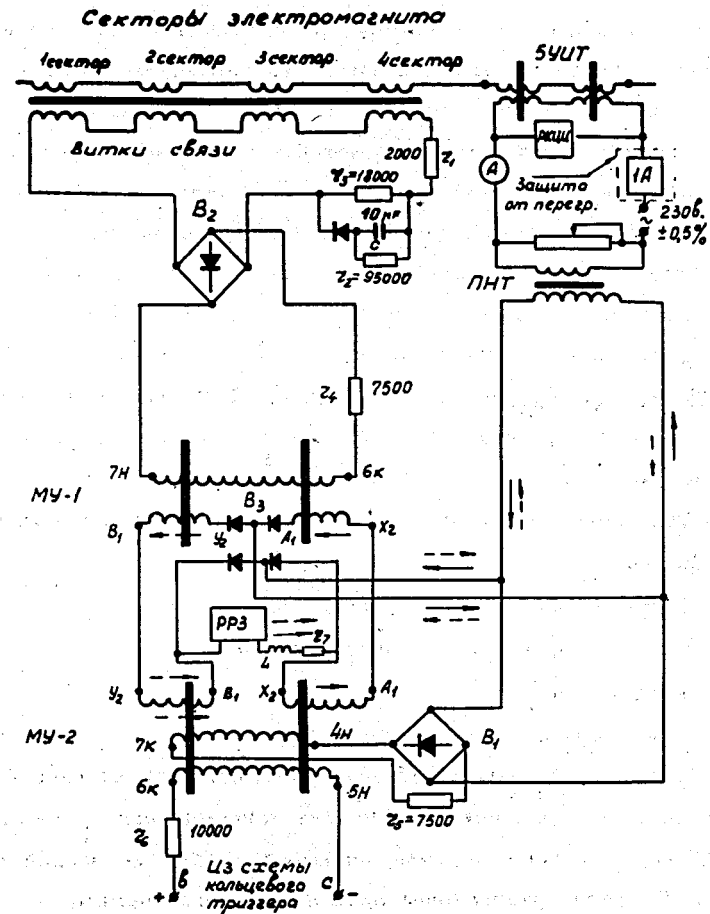


Рис. 3. Схема пускового органа защита от однофазного опрокидывания инвертора преобразования синхροфазотрона.

На основе гармонического анализа напряжения преобразователя в аварийных режимах и при двухфазном опрокидывании инвертора определена характеристика срабатывания и разработана конструкция бесконтактного пускового органа защиты от двухфазного опрокидывания инвертора, позволяющая селективно индцировать двухфазные опрокидывания при различном напряжении генераторов /7/. Путем экспериментального рассмотрения работы вторичных обмоток трансформаторов постоянного тока доказано, что при протекании по их первичной обмотке переменного тока во вторичных обмотках возникают перенапряжения (как в трансформаторах переменного тока с разомкнутой вторичной обмоткой), что приводит к витковым замыканиям. Если обмотки нагружены, то перенапряжения значительно уменьшаются /8-10/.

В четвертой главе обобщен опыт работы автора по реконструкции и развитию блок-схемы воздействий пусковых органов, а также логической части электрических защит системы питания синхροфазотрона на органы управления, в качестве которых использованы:

- а) схемы гашения поля генераторов;
- б) схема управления преобразователя;
- в) короткозамыкатель;
- г) замыкатель с сопротивлением.

Указанные органы управления работают избирательно в зависимости от вида повреждений или ненормального режима.

Избирательная программа включает следующие воздействия:

1. Перевод преобразователя в инверторный режим.
2. Перевод преобразователя в инверторный режим и включение короткозамыкателя, отключение контакторов гашения поля.

3. Перевод преобразователя в инверторный режим, включение замыкателя с сопротивлением, отключение контакторов гашения поля.

4. Отключение цепей управления преобразователя, включение замыкателя с сопротивлением, отключение контакторов гашения поля, а в случае медленного спада тока через вентили - включение короткозамыкателя.

На рис. 4 приведена описываемая блок-схема. В результате внедрения схемы с указанной программой, как показывает многолетний опыт эксплуатации, аварийные и ненормальные режимы с большими перегрузками вентиля устранились без аварийных разрушений, что исключило простои ускорителя.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Произведен развернутый анализ процессов коммутации в трехфазной мостовой выпрямительной схеме для эксплуатационного и аварийных режимов. На основании результатов анализа предложена методика расчета малых токов замыкания на землю для систем питания синхροфазотрона и аналогичных установок, что позволило:

а) предложить простую схему измерения и контроля токов замыкания на землю, вызывающих появление и изменение асимметрии ведущего магнитного поля синхροфазотрона;

б) предложить и разработать усовершенствованные схемы земляных защит, надежно работающих, в том числе и в зонах, в которых типовые защитные устройства не работают.

2. В отличие от известных схем предложено использовать магнитный делитель частоты, работающий на принципе параметрического резонанса, что позволяет создать земляную защиту обмотки возбуждения синхροфазотрона, обладающую повышенной чувствительностью.

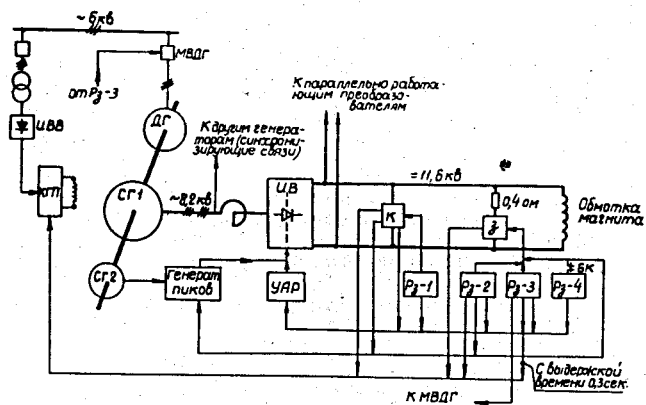


Рис. 4. Блок-схема воздействия защит системы питания обмотки возбуждения дубненского синхροфазотрона.

Условные обозначения защитных устройств и аппаратов:

1. Рз 1 - от однофазного срыва инвертора, витковых замыканий обмотки электромагнита и др.
2. Рз 2 - от двухфазного срыва инвертора, перегрузки и перенапряжения магнита, генератора СГ-2, аварийного снятия возбуждения генераторов СГ-1 и др.
3. Рз 3 - от главных двигателей и генераторов СГ-1; выключатели прямого тока ИВ; 4. Рз-4 - от перегрева обмотки электромагнита, при отсутствии охлаждающей воды, понижении давления азота и др.
5. КПП - контактор гашения поля СГ-1; 6. Генератор пиков; 7. УАР - кольцевой триггер; 8. К - короткозамыкатель; 9. z - замыкатель на сопротивление 0,4 ом.
10. БК-блок-контакт контактора УАР.

3. Из расчетно-экспериментального анализа аварийных режимов выявлены термически и динамически неустойчивые звенья главной схемы преобразователя.

4. Для улучшения пусковых характеристик схемы защиты предложено использовать падение напряжения на обмотке электромагнита от протекающего тока в режиме однофазного опрокидывания инвертора. Применение схемы пускового органа, обладающего комбинированной характеристикой срабатывания (напряжение срабатывания в функции тока магнита) исключает блокировочные реле и повышает надежность защиты.

5. В отличие от известных схем релейной защиты для импульсных электрических систем разработано устройство для максимальной токовой защиты с вольтметровой блокировкой на бесконтактных элементах: насыщающемся трансформаторе и магнитном усилителе с внутренней обратной связью.

6. Разработана конструкция пускового органа защиты от двухфазного опрокидывания инвертора на магнитном элементе, обеспечивающем селективность и надежность работы.

7. Предложена блок-схема воздействия электрических защит, отличающаяся программной работой органов управления при различных режимах работы преобразователя. Применение этой схемы обеспечило высокий коэффициент использования энергетического оборудования синхροфазотрона и современный технический уровень его обслуживания.

Литература

1. А.И. Боровой. Токи при внутреннем коротком замыкании выпрямителя. Электричество № 1, 1969.
2. И.А. Курсков. Защита от замыканий на землю мощного управляемого преобразователя. Препринт ОИЯИ 9-5376, 1970.
3. Т.А. Суетин, А.А. Сакович. Исследования запаянных игнитронов типа ИВС-100/15. Электричество, № 1, 1959.
4. Л.Н. Беляев, В.Г. Глушенко, И.А. Курсков, А.А. Смирнов, Н.И. Павлов. Защита блока питания электромагнита. Авторское свидетельство № 261581, Бюлл. изобр., № 5, 1970.
5. И.А. Курсков. Устройство для максимальной токовой защиты с вольтметровой блокировкой. Авторское свидетельство № 178888. Бюлл. изобр. № 4, 1966.
6. И.А. Курсков. Устройство для максимальной токовой защиты с вольтметровой блокировкой. Авторское свидетельство № 275208. Бюлл. изобр. № 22, 1970.
7. И.А. Курсков. Устройство для защиты от двухфазного срыва инвертора. Авторское свидетельство № 203049. Бюлл. изобр. № 20, 1970.
8. И.А. Курсков. Защита от перенапряжений вторичных обмоток трансформаторов постоянного тока при наличии переменной составляющей в измеряемом токе. Электричество № 5, 1969.
9. И.А. Курсков. Об определении витковых замыканий во вторичных обмотках трансформаторов тока по вольт-амперным характеристикам. Электрические станции № 11, 1962.
10. И.А. Курсков. Максимальная токовая импульсная защита. Препринт ОИЯИ, 9-5154, Дубна, 1970; Электротехника № 1, 1972.
11. Л.Н. Беляев, В.Г. Глушенко, Н.И. Павлов, А.А. Смирнов, И.А. Курсков. Защита от срыва инвертора системы электропитания магнита синхрофазотрона. Депонированное сообщение ОИЯИ, Б2-1732, 1960.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 июня 1972 года.