

УДК 62-83

Е. А.Смотров, канд. техн. наук

РЕКУПЕРАТОР БОРТОВОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Аннотация. Предложена структура и алгоритмы управления рекуператором, вместе с батареей суперконденсаторов, являющимся основой энергонакопительной системы электротранспортного средства. При анализе системы стабилизации тока аккумуляторной батареи рекуператор представлен в виде управляемого источника тока. Для ограничения уровня тока аккумуляторной батареи при пуске предложена величина, пропорциональная току потребления, определенного по моменту трогания электротранспортного средства.

Є. О.Смотров, канд. техн. наук

РЕКУПЕРАТОР БОРТОВОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО КОШТИ

Анотація. Запропоновано структуру і алгоритми керування рекуператором, який разом з батареєю суперконденсаторів є основою енергонакопичувальної системи електротранспортного засобу. При аналізі системи стабілізації струму акумуляторної батареї рекуператор представлено у вигляді керованого джерела струму. Для обмеження струму акумуляторної батареї під час пуску запропоновано величину, пропорційну струму споживання, визначеного за моментом рушення електротранспорту.

E. A. Smotrov, PhD

RECUPERATOR-BOARD POWER SUPPLY ELECTRIC VEHICLES

Abstract. A structure and algorithms of management a recuperator is offered, together with the battery of supercondensers being basis of the energystory system of elektrotro mobil. At the analysis of the system of stabilizing of current of storage battery a recuperator is presented as the guided source of current. For limitation of level of current of storage battery at starting a size, proportional the current of consumption, certain on the moment of touching of elektrotro mobil, is offered.

Составной частью современного электротранспортного средства (ЭТС) является энергонакопительная система (ЭС), состоящая из преобразователя (рекуператора (РЕ)), блока суперконденсаторов (БСК) и разрядного ключа с балластным резистором [4]. Энергонакопительная система предназначена для накопления кинетической энергии тормозящегося ЭТС, преобразованной электроприводами в электрическую, в виде электрического заряда в накопителях – БСК – с последующим использованием при разгоне. Наличие БСК на борту позволяет использовать указанную энергию с целью уменьшения амплитуды пусковых токов аккумуляторной батареи (АБ) для сохранения максимальной длительности ее жизненного цикла. По данным AFS Trinity Power Corporation, использование БСК в шесть раз увеличивает время жизни источников питания по сравнению с теми системами, в которых используются только литиевые батареи [6].

Энергонакопительная система может эффективно использоваться не только в ЭТС

с автономным источником питания на борту, но и с внешним необратимым источником – в трамвае, троллейбусе, метро.

Проведенное в [3] сравнение вариантов сочетания БСК и АБ показало, что уменьшения массы/объема БСК можно добиться увеличением коэффициента использования энергии ($K_{и}$) БСК, определяемого соотношением величин максимального и минимального напряжений на зажимах БСК.

Анализ результатов математического моделирования предварительной схемы бортового источника питания (БИП) [1], расчета энергетического баланса ЭТС на базе «городского цикла НАМИ» и предельных динамических режимов [2] и ходовых испытаний макетного образца электромобиля позволил сформулировать следующие требования к силовой и функциональной схемам ЭС и алгоритмам управления:

отсутствие силовых элементов (разделительных диодов и т.п.) в силовых шинах между БИП и электроприводами (ЭП) для исключения дополнительных потерь в системе;

© Смотров Е.А., 2011

подключение БСК к указанным шинам через реверсивный (повышающий / понижающий DC-DC – PE) преобразователь, позволяющий увеличить $K_{и}$ и управлять током PE;

ограничение тока заряда АБ при рекуперации на допустимом (рекомендуемом производителем АБ) уровне, а также перенапряжения на силовых шинах на допустимом уровне;

тока PE на допустимом для силовых элементов уровне, минимального и максимального напряжения на зажимах БСК на уровнях, рекомендуемых производителем БСК;

обеспечение возможности: принять/отдать необходимый ток в требуемый момент времени – в начале торможения / в конце процесса разгона ТС; при движении ТС с промежуточной, не максимальной скоростью принять в БСК количество энергии, соответствующей данной, промежуточной скорости при торможении и облегчить режим АБ при разгоне от промежуточной скорости до максимальной.

Описанные требования были реализованы четырехключевым рекуператором, включенным в схему электрооборудования ЭТС согласно схеме на рис.1.

Основной канал PE (ЭС) предназначен для стабилизации тока АБ на заданном уровне. Так как режим работы АБ определяется режимом работы ЭП, то динамическая стабилизация тока АБ осуществляется за счет соответствующей коммутации БСК. При торможении ЭП и возврате энергии в источник ограничение зарядного тока АБ осуще-

ствляется путем шунтирования АБ с помощью БСК.

При разгоне ТС ограничение разрядного тока АБ производится путем «токодобавки» («амперодобавки») в силовую шину за счет энергии, запасенной в БСК. Величины токов АБ и PE определяются с помощью датчиков тока ДТ2 и ДТ3 соответственно.

Структурная (функциональная) схема системы управления PE, обеспечивающая требуемые режимы работы, приведена на рис.2 [5].

Задающий сигнал $I_{зад}$ для PE формируется управляемым нелинейным элементом (УНЭ). При торможении ЭТС

$$I_{зад} = I_{АБ} - \Delta I_2,$$

где $\Delta I_2 = I_{зар}$ – величина тока заряда АБ, рекомендованная производителем АБ. Величина зоны нечувствительности ΔI_1 , соответствующая режиму разгона ЭТС определяется из следующих соображений. Предлагается при установившемся режиме движения ЭТС использовать энергию АБ для преодоления момента сопротивления дороги и воздуха, а при разгоне добавлять энергию, запасенную в БСК.

Такое разделение весьма условно, так как требуемая энергия при установившемся движении зависит от дорожного покрытия и профиля дороги, загрузки ЭТС, встречного или попутного ветра и т.д. Поэтому предложено формировать величину ΔI_1 пропорциональной величине тока потребления ЭТС при трогании.

Указанная величина является косвенной оценкой загрузки ЭТС в данный момент, дорожного покрытия и профиля дороги.

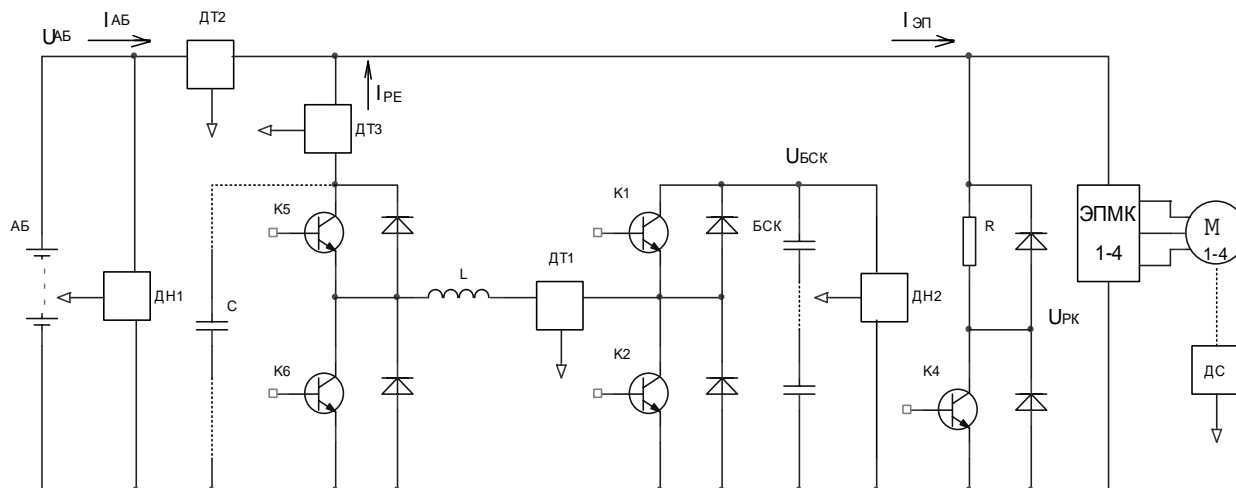


Рис.1. Схема включения рекуператора

В структуре (рис.2) положительное значение I_{AB} , соответствующее разгону ЭТС (определяется выпрямителем В1) через устройство выборки-хранения (УВХ), поступает на вход УНЭ. В режиме выборки на выходе УВХ сигнал ΔI_1 равен текущему значению I_{AB} , поэтому на выходе УНЭ $I_{зад} = I_{AB} - \Delta I_1 = 0$. При трогании ЭТС нуль-орган НО1 формирует команду перевода УВХ в режим хранения, при этом на выходе УВХ фиксируется сигнал ΔI_1 , пропорциональный величине тока потребления при трогании, а на выходе УНЭ текущее значение $I_{зад} = I_{AB} - \Delta I_1$, пропорциональное требуемой величине добавки тока потребления при разгоне.

Ограничение тока РЕ на допустимом для силовых элементов уровне осуществляется внутренним контуром токоограничения на основе измерения тока дросселя датчиком ДТ1. Сигнал последнего через нелинейный узел токоограничения (ТО), задающий величину максимального тока $I_{макс}$ поступает на вход регулятора тока (РТ).

На вход РТ поступает также через нормально закрытый контакт реле Р3 результи-

рующий сигнал с выхода дополнительного контура стабилизации напряжения БСК в соответствии с промежуточным значением скорости на уровне, задаваемом нелинейным преобразователем НП в функции модуля сигнала (выпрямитель В2) датчика скорости $U_{дс}$ и внутренней обратной связи по напряжению $U_{БСК}$. Система стабилизации напряжения $U_{БСК}$ является вспомогательной, дополнительной по отношению к системе стабилизации тока I_{AB} на уровне, задаваемом УНЭ.

С учетом того, что работа системы стабилизации напряжения может в определенных режимах противоречить работе системы стабилизации тока, в структуру заложено преобладание системы стабилизации тока над системой стабилизации напряжения БСК. Разделение осуществляется с помощью нуль-органа НО2, управляющего реле Р3.

Система стабилизации напряжения обеспечивает также предварительный заряд БСК и подготовку ЭС к работе при включении ключа зажигания в ЭТС.

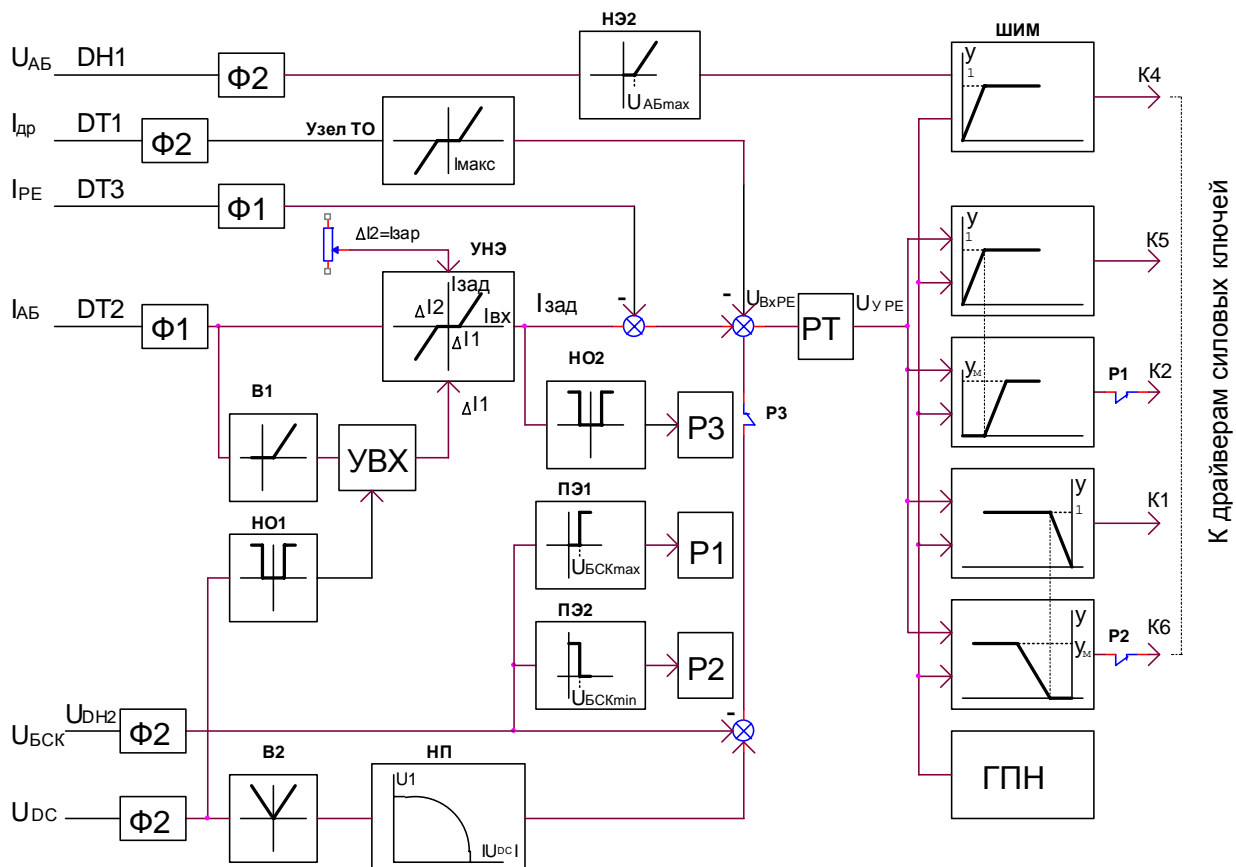


Рис.2. Функциональная схема системы управления рекуператором

В схеме предусмотрено также ограничение максимального и минимального напряжения $U_{\text{БСКмакс}}$ и $U_{\text{БСКмин}}$ на зажимах БСК, осуществляемое с помощью пороговых элементов ПЭ1, ПЭ2 и реле Р1, Р2, отключающих коммутацию силовых ключей К2 и К6.

Ограничение перенапряжения на силовых шинах на допустимом уровне $U_{\text{АБмакс}}$ производится с помощью нелинейного элемента НЭ2, управляющего скважностью разрядного ключа К4 посредством ШИМ. Указанный режим может возникнуть при полном заряде БСК и продолжении режима рекуперации – например, спуск ЭТС с горы.

Выходное напряжение РТ управляет коммутацией силовых ключей РЕ (К1; К2; К5; К6) в соответствии с полярностью и величиной $U_{\text{РЕ}}$ и характеристикой соответствующего ШИМ. Регулировочные характеристики ШИМ «сшиты» таким образом, что при изменении $U_{\text{РЕ}}$ один режим работы РЕ автоматически переходит в другой.

Система управления РЕ изображена и описана в аналоговом исполнении для удобства восприятия и анализа. В разработанном опытном образце ЭС указанная структура реализована программным обеспечением микропроцессора. Для стыковки аналоговых датчиков тока ДТ и напряжения ДН с микропроцессорной системой управления применены фильтрующие цепи Ф.

Вследствие импульсного характера преобразования энергии в РЕ токи $I_{\text{АБ}}$ и $I_{\text{РЕ}}$ имеют значительную импульсную составляющую. Поэтому для измерения в указанных каналах применены специальные фильтры – усреднители, выделяющие действующее значение измеряемого сигнала с минимальным запаздыванием.

При раздельном управлении ключами РЕ, т.е. когда в произвольный момент времени со скважностью γ ($0 \leq \gamma \leq 1(\gamma_{\text{макс}})$) управляется только один из ключей РЕ (в двух режимах должен быть постоянно включен еще один ключ ($\gamma = 1$)), работа РЕ описывается 4-я режимами:

I – заряд БСК от $U_{\text{БСКмин}}$ до напряжения, близкого к напряжению $U_{\text{АБ}}$. Осуществляется коммутацией ключа К5 (рис.1).

II – заряд БСК от $U_{\text{АБ}}$ до $U_{\text{БСКмакс}}$. Осуществляется коммутацией ключа К2 (рис.1) при постоянно включенном ключе К5.

III – разряд БСК от $U_{\text{БСКмакс}}$ до напряжения, близкого к напряжению $U_{\text{АБ}}$. Осуществляется коммутацией ключа К1.

IV – разряд БСК от $U_{\text{АБ}}$ до $U_{\text{БСКмин}}$. Осуществляется коммутацией ключа К6 (рис.1) при постоянно включенном ключе К1.

Анализ работы РЕ показывает, что в режимах I и IV ток рекуператора $I_{\text{РЕ}}$ имеет прерывистый характер, усложняя измерение действующего значения датчиками тока, а также вносит значительную импульсную составляющую в ток $I_{\text{АБ}}$. Поэтому возникает необходимость установки дополнительной емкости С на входе РЕ для замыкания импульсной составляющей $I_{\text{РЕ}}$ (рис.1).

В [1] проведен анализ работы РЕ в двух режимах и рассмотрена система регулирования тока дросселя (тока заряда БСК). При этом РЕ представлялся как DC-DC преобразователь напряжения. Вместе с тем в системе электрооборудования ЭТС ток дросселя, как и напряжение БСК являются промежуточными координатами и целесообразней рассматривать РЕ как управляемый источник динамического тока, а в качестве объекта регулирования – ток $I_{\text{АБ}}$.

Рассмотрим работу системы стабилизации тока заряда-разряда АБ (рис.3) в предположении, что РЕ – линейное звено с коэффициентом передачи К – источник тока без энергетических ограничений, управляемый входным сигналом $U_{\text{вхРЕ}}$ через регулятор тока РТ посредством ШИМ, формирующих скважность силовых ключей

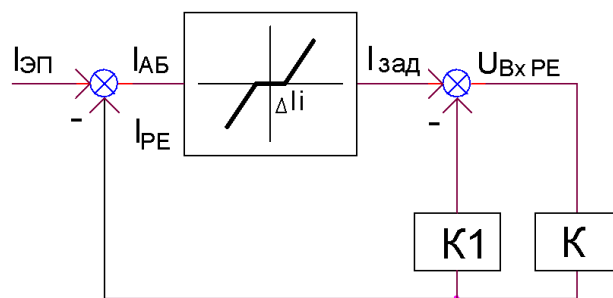


Рис.3. Структурная схема системы стабилизации тока аккумуляторной батареи

Входным сигналом является ток потребления электроприводов $I_{ЭП}$, сигналом обратной связи – ток рекуператора $I_{РЕ}$. Из структуры (рис.3) можно записать:

$$I_{АБ} = I_{ЭП} - I_{РЕ}, \quad (1)$$

$$I_{зад} = I_{АБ} - \Delta I_i, \quad (2)$$

при $I_{АБ} \geq \Delta I_i$

$$I_{РЕ} = K \cdot I_{зад} / (1 + K \cdot K1), \quad (3)$$

где $K1$ – коэффициент внутренней обратной связи.

После несложных преобразований получим

$$I_{АБ} = K2 \cdot I_{ЭП} + K3 \cdot \Delta I_i, \quad (4)$$

где

$$K2 = (1 + K \cdot K1) / (1 + K + K \cdot K1), \quad (5)$$

$$K3 = K / (1 + K + K \cdot K1). \quad (6)$$

На основании численного анализа исследуем влияние величин коэффициентов K и $K1$ на $K2$ и $K3$.

Как видно из представленных на рис.4 зависимостей, с увеличением значения ко-

эффициента внутренней обратной связи $K1$ уменьшается стабилизирующее действие рассматриваемого контура и значение $I_{АБ}$ приближается к значению $I_{ЭП}$.

Рекуператор содержит две инерционности – индуктивность L дросселя и емкость БСК и в общем случае представляет собой звено второго порядка. Вывод эквивалентной передаточной функции PE , с учетом переключения силовых ключей, является не простой задачей и не является целью данной работы. Так как основная инерционность PE определяется емкостью БСК, то в первом приближении можно принять передаточную функцию PE как реальное дифференцирующее звено, т.е.

$$W_{(P)} = I_{PE(P)} / U_{вхPE} = K_{PE} p / (T p + 1). \quad (7)$$

Опытный образец ЭС успешно прошел стендовые испытания и предварительные испытания в составе макетного образца ЭТС [4]. Предложенная структура может быть полезна специалистам при разработке и модернизации электротранспорта.

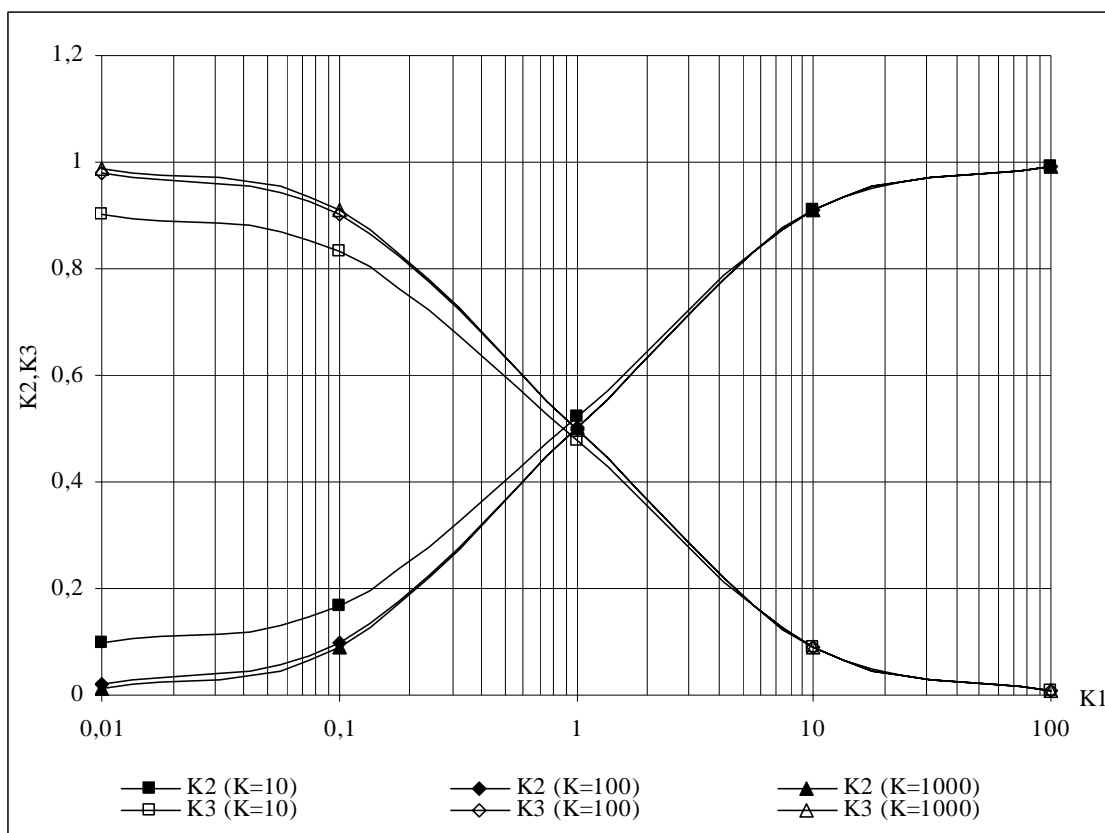


Рис.4. Зависимость коэффициентов $K2$ и $K3$ от $K1$

Список использованной литературы

1. Вершинин Д.В. Система регулирования тока батареи конденсаторов бортового источника питания электротранспортного средства / Д.В.Вершинин, В.А.Войтенко, Е.А.Смотров // *Электромашиностроение и электрооборудование*. – К.: Техника. – 2009. – Вып. 73. – С. 43-49.

2. Вершинин Д.В. Определение параметров основных узлов электрической схемы электробуса / Д.В.Вершинин, В.А.Войтенко, Е.А.Смотров // *Электромашиностроение и электрооборудование*. – К.: Техника. – 2009. – Вып. 74. – С. 10-17.

3. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства / Д.В.Вершинин, В.А.Войтенко, В.А.Войтенко, Е.А.Смотров // *Электромашиностроение и электрооборудование*. – К.: Техника. – 2008. – Вып. 71. – С. 5-11.

4. Структура электрооборудования многодвигательного электротранспортного средства / Д.В.Вершинин, О.Г.Дашко, С.Б.Зенин, Е.А.Смотров // *Приводная техника*. – № 5 (81). – 2010. – С.32-36.

5. Пат. 2405686 Российская Федерация, МПК В60L 11/00. Электротранспортное средство / Д.В.Вершинин, О.Г.Дашко, Е.А.Смотров: заявитель и патентообладатель. Закрытое акционерное общество научно-производственное предприятие «ИнкарМ». №2009125452/11; заявл.3.07.2009; опубл. 10.01.2010. Бюл. № 34.

6. AFS Power corporation. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://afstrinity.com>.

Получено 07.02.2011



Смотров
Евгений Александрович,
канд. техн. наук, вед. инженер
ГП НТЦ «Станкосерт»
тел. 048-728-85-05