

УДК 622.33: 624.131.5

С. М. Простов, В. В. Демьянов, А. В. Покатилов

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Закрепление грунтов электрохимическим способом (ЭХЗ) основано на комплексе электродинамических, электрокинетических и физико-химических процессов, происходящих в массиве влагонасыщенных глинистых пород при пропускании по нему электрического тока с одновременной подачей укрепляющего раствора и откачки сдренированной влаги [1, 2].

Основным используемым оборудованием является источник постоянного электрического тока, подбираемый в зависимости от потребляемой мощности, силы тока, напряжения, причем диапазон регулирования напряжения составляет от 20 до 200 В, а максимальный ток нагрузки может превышать 200 А. Технология закрепления грунтов предусматривает необходимость перемещения оборудования и размещения его на площадке ограниченных размеров, поэтому очень важным техническим параметром оборудования являются также его габаритные размеры.

Ранее для получения постоянного электрического тока использовались вращающиеся электрические машины, а также преобразователи электромашинного типа или на основе ионных (главным образом, ртутных) вентиляй. В последние годы их заменяют полупроводниковыми выпрямителями с высокими энергетическими характеристиками, малыми размерами, большой эксплуатационной надежностью и высоким КПД, они просты по конструкции и обслуживанию. Выпрямители с полупроводниковыми управляемыми вентилями (тиристоры) кроме выпрямления электрического тока обеспечивают простое и удобное регулирование выпрямленного напря-

жения в широких пределах.

В ГУ КузГТУ по заказу ОАО "КузНИИшахтострой" разработана электросиловая установка, предназначенная для ЭХЗ неустойчивых грунтов на строящихся и действующих горнодобывающих предприятиях Кузбасса.

Основные технические характеристики установки следующие:

- напряжение и частота питающей сети – 380 В, 50 Гц;
- число фаз – 3;
- величина регулируемого выпрямленного напряжения в режиме стабилизации – 0–265 В при нагрузке 80 А; 0–380 В при нагрузке 40 А;
- постоянство установленного выпрямленного напряжения с точностью  $\pm 2\%$  при изменении нагрузки от 4 до 40 А в диапазоне напряжений от 260 до 380 В и от 4 до 80 А в диапазоне напряжений от 220 до 260 В при одновременных колебаниях напряжения питающей сети в пределах от минус 5 до плюс 10 % от номинального значения;

- номинальный ударный ток короткого замыкания не более 8 кА;

- номинальный кратковременно выдерживаемый ток короткого замыкания не более 6,3 кА;

- номинальный условный ток короткого замыкания, при котором должна сработать защита аппарата, 1,6 кА;

- агрегат допускает длительную работу на холостом ходу и параллельную работу с таким же агрегатом на общую нагрузку;

- КПД не менее 92 %;

- коэффициент мощности не менее 0,86.

Схема агрегата включает следующие основные конструктивные модули: силовой трансформатор; модуль тиристорного

выпрямителя состоящий из трех пар тиристоров, образующих трехфазную мостовую схему выпрямления, и блока управления тиристорами (рис. 1).

Силовой трансформатор, магнитопровод которого собран из электротехнической стали 3413 (сечение магнитопровода 53,2 см<sup>2</sup>), имеет три катушки, каждая из которых состоит из трех обмоток. Сетевая обмотка на напряжение 380 В содержит 122 витка провода марки ПСДК 3,15×7,1, вторичная – 70 витков провода марки ПСКД 3,35×9 и 29 витков провода марки ПСДК 3,15×7,1.

Блок управления конструктивно выполнен на одной панели, на которой расположены следующие функциональные узлы: система импульсно-фазового управления СИФУ; регулятор напряжения РН; блок питания БП; датчик напряжения ДН; узел защиты УЗ. Структурная схема блока управления приведена на рис. 2.

Принцип работы агрегата основан на свойстве тиристоров изменять в широких пределах среднее значение выходного напряжения путем задержки момента открывания тиристоров по отношению к началу положительной полуволны питающего напряжения [3–5].

Работа схемы тиристорного выпрямителя с момента подключения к нему питающей сети происходит следующим образом. После подключения к электрической сети получает питание силовой выпрямительный блок, включающий по два тиристора в каждой фазе питающей сети. Для защиты тиристоров от перенапряжений, возникающих при переходных процессах, в схеме использованы RC цепи, шунтирующие тиристоры.

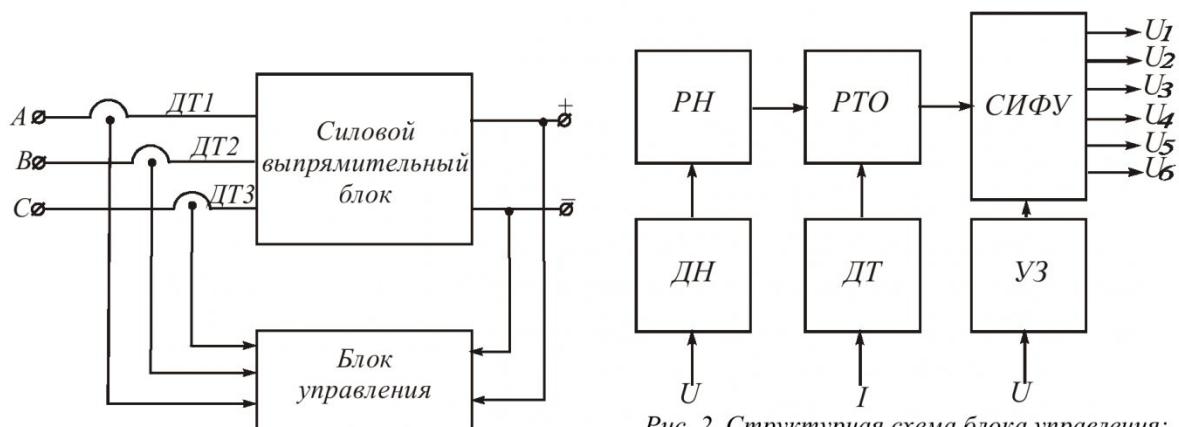


Рис. 1. Структурная схема тиристорного выпрямителя:

*A, B, C – фазы питающей сети от трансформатора; ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики тока*

После включения автоматического выключателя питания блока управления получает питание система импульсно-фазового управления тиристорами, входящая в блок управления [6, 7].

Для управления СИФУ в блок управления поступают сигналы с датчиков тока ДТ и напряжения ДН. Эти сигналы через регуляторы напряжения РН и токовой отсечки РТО управляют работой СИФУ. Схемы датчиков тока и напряжения настроены так, что сигнал с датчика напряжения в рабочем диапазоне токов нагрузки (до 90 А в режиме 220–260 В и до 44 А в режиме 260–380 В) больше, чем сигнал с датчика тока, и выпрямитель работает

как стабилизатор напряжения. При токах 1,05–1,15 от номинальных сигнал с датчика тока становится больше сигнала датчика напряжения. При этом управляющий орган СИФУ начинает реагировать на сигнал датчика тока, выпрямитель работает как стабилизатор тока, и напряжение на выходе резко падает на глубину не менее 50 % от установленной ранее величины. Защита от понижения или повышения напряжения питающей сети осуществляется узлом защиты УЗ путем запрещения выдачи на тиристоры управляющих импульсов системой СИФУ.

Тиристорный выпрямитель выполнен в виде металлического шкафа. Снизу расположены

кламмы для подключения нагрузки и питающей сети. Далее снизу вверх расположены: блок силовой с блоком управления, блок возбуждения для дополнительного применения тиристорного выпрямителя. На одном уровне с блоком возбуждения расположены кламмы для подключения цепей управления, регулятор для подстройки выходного напряжения, автоматический выключатель собственных нужд (для защиты цепей управления), автоматический выключатель силовой цепи.

При электрохимическом закреплении грунтов электросиловая установка включается в общую схему расположения оборудования на строительной площадке. Схема установки для

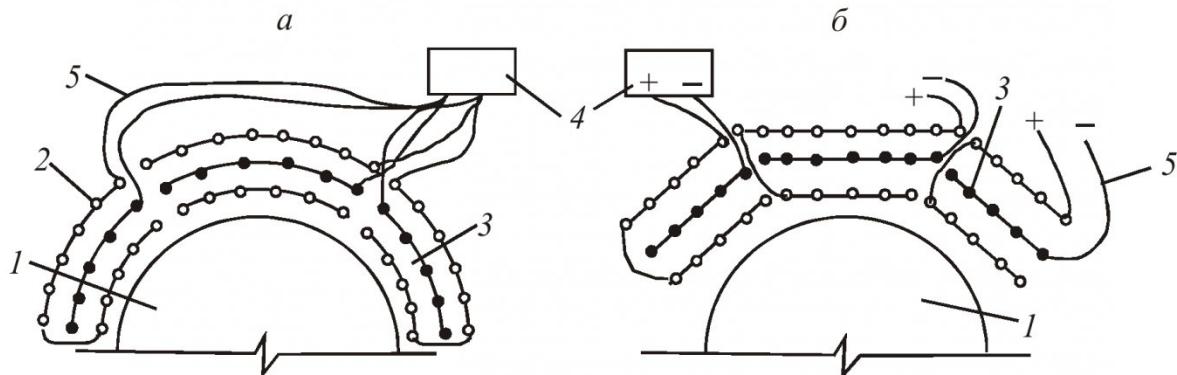


Рис. 3. Схемы расположения электросиловой установки, электродов-инъекторов и подключения электросиловой установки при ЭХЗ глинистых грунтов, порядной вдоль окружности (а), порядной восьмигранной (б):

*1 – разрабатываемый грунт; 2 – анодные электроды (инъекторы); 3 – катодные электроды; 4 – электросиловая установка; 5 – кабель*

Таблица 1  
Составы силикатных растворов

| Коэффициент фильтрации грунта, $K_{\phi}$ , м/сут | Компоненты гелеобразующей смеси               | Плотность раствора, г/см <sup>3</sup> | Соотношение компонентов, мас. ч | Время гелеобразования, ч |
|---|---|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 0,5-0,1   | Жидкое стекло $\text{Na}_2\text{SiO}_3$       | 1,2                                   | 1                               | -                        |
|   | Хлористый кальций $\text{CaCl}_2$             | 1,08                                  | 1                               |                          |
| 0,3-0,1   | Фосфорная кислота $\text{H}_3\text{PO}_4$     | 1,025                                 | 2                               | 15-20                    |
|   | Жидкое стекло $\text{Na}_2\text{SiO}_3$       | 1,2                                   | 1                               |                          |
| 0,2-0,1   | Серная кислота $\text{H}_2\text{SO}_4$        | 1,06                                  | 3,5                             | 20-25                    |
|   | Сернокислый алюминий $\text{Al}_2\text{SO}_4$ | 1,06                                  | 2,5                             |                          |
|   | Жидкое стекло $\text{Na}_2\text{SiO}_3$       | 1,18                                  | 4                               |                          |
| 0,1-0,005   | Серная кислота $\text{H}_2\text{SO}_4$        | 1,06                                  | 3,5                             | 30-40                    |
|   | Сернокислый алюминий $\text{Al}_2\text{SO}_4$ | 1,06                                  | 2,6                             |                          |
|   | Жидкое стекло $\text{Na}_2\text{SiO}_3$       | 1,18                                  | 3,8                             |                          |

ЭХЗ при строительстве шахтного ствола приведена на рис. 3.

Для ЭХЗ грунтов используются двухрастворная и однорас-творная рецептуры силикатных растворов, предложенные ЛИ-ИЖТом [1], приведенные в табл. 1. Учитывая, что ЭХЗ применяется для упрочнения малопроницаемых грунтов и время электроинъекции занимает от 25 до 80 ч, растворы подбирают с меньшей концентрацией жидкого стекла, а однорас-творные смеси составляют с таким расчетом, чтобы время их гелеобразования составляло не меньше времени электроинъекции растворов в грунт.

При использовании двухрастворной рецептуры для электрохимического закрепления грунтов последовательно под действием электрического тока инъектируют сначала раствор жидкого стекла, а затем раствор хлористого кальция. Образование геля кремневой кислоты в порах грунта происходит сразу же после введения хлористого

кальция.

В начальный период после обработки образуется рыхлый гель, который способен пропускать через себя раствор хлористого кальция, потом в течение нескольких десятков часов гель уплотняется и покрывает прочной пленкой частицы грунта, склеивая их.

Рациональное расстояние между анодами и катодами необходимо принимать равным 10 диаметрам труб, из которых выполнены электроды-инъекторы. В производственной практике распространение получили трубы диаметром 100 мм, но также используются и трубы диаметром 50 мм. Всю глубину закрепления разбивают на заходки. Высота одной заходки может, как правило, изменяться от 0,8 до 1,2 м. При ведении работ по специальным проектам высота заходки может быть увеличена.

ЭХЗ грунтов применяют для создания ограждений при проходке стволов шахт. Самой

распространенной схемой расположения электродов-инъекторов является порядная вдоль окружности или восьмигранная (рис. 3). Анодные электроды располагают по радиусу, ближнему к центру ствола. расстояние между ними принимается в зависимости от необходимого радиуса закрепления. При диаметре 50 мм они должны отстоять друг от друга на расстояние 50–75 см.

При использовании ЭХЗ для борьбы с обрушениями откосов бортов карьеров, дамб, насыпей используют рядовое расположение электродов (рис. 4). В качестве электродов-инъекторов используются перфорированные трубы диаметром 50 мм. Глубина их погружения зависит от высоты оплывающего слоя и изменяется в пределах от 1 м до 3 м. При использовании труб диаметром 50 мм расстояние между электродами в ряду и между рядами 50–75 см.

При закреплении грунтов оснований сооружений используют схему, представленную на рис. 5. Закрепление осуществляют заходками глубиной  $h = 0,8-1,2$  м. При использовании труб диаметром 50 мм в качестве электродов-инъекторов расстояние между анодами (катодами)-инъекторами 35–45 см, а между рядами инъекторов – 55–75 см.

В качестве основных компонентов укрепляющих электролитов используют растворы жидкого стекла и хлористого

Значение параметров  $a$  и  $R$

| Коэффициент фильтрации, м/сут | Двухрастворная рецептура |          | Однорастворная рецептура |          |
|-------------------------------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|
|                               | $a$                      | $R$ , см | $a$                      | $R$ , см |
| 0,005                         | –                        | –        | 6                        | 25       |
| 0,01                          | –                        | –        | 7                        | 30       |
| 0,05                          | –                        | –        | 7                        | 35       |
| 0,1                           | –                        | –        | 8                        | 40       |
| 0,2                           | 6                        | 30       | 9                        | 40       |
| 0,3                           | 7                        | 35       | 10                       | 45       |
| 0,5                           | 8                        | 40       | 10                       | 50       |

Таблица 2

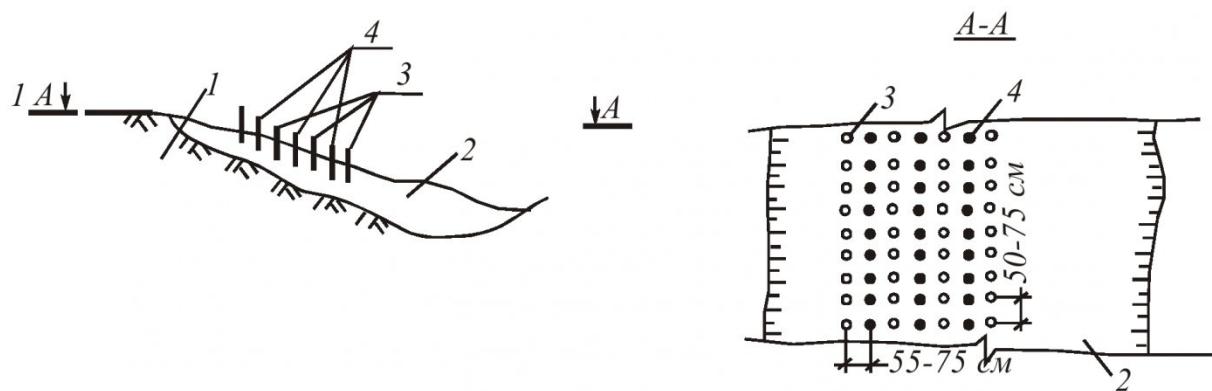


Рис. 4. Размещение электродов-инъекторов при закреплении откоса:  
1 – коренные породы; 2 – оплавляющие рыхлые породы; 3 – аноды; 4 – катоды

кальция. Общий расход растворов, необходимый для упрочнения грунта, определяют по формуле [1] (в л/м<sup>3</sup>)

$$g = a\pi R^2 lm, \quad (1)$$

где  $m$  – пористость грунта;  $l$  – длина перфорированной части инъектора, м;  $a$  – коэффициент, учитывающий фильтрационные свойства грунта и степень заполнения пор раствором (табл. 2);  $R$  – средний радиус закрепления, см.

Для определения расхода материалов необходимо задаться плотностью растворов жидкого стекла и хлористого кальция. Расход составляющих компонентов при ЭХЗ будет зависеть от пористости пород, а диапазон изменения расхода можно принять равными от 20 до 350 л/м<sup>3</sup> для каждого компонента.

В промышленности жидкое стекло имеет плотность 1,4–1,52 г/см<sup>3</sup>. Для получения рабочего раствора силиката натрия с плотностью 1,05 г/см<sup>3</sup> его разбавляют горячей водой, температура которой составляет  $t^\circ = 55\text{--}65^\circ\text{C}$ . Количество воды определяют по формуле:

$$B = \frac{M(B_1 - B_2)}{B_2 - 1}, \quad (2)$$

где  $B$  – количество добавляемой воды, л;  $B_1$  – плотность исходного раствора, г/см<sup>3</sup>;  $B_2$  – плотность раствора рабочей концентрации, г/см<sup>3</sup>;  $M$  – количество исходного раствора, л.

Хлористый кальций существует в кристаллическом и жидкоком состоянии. В обоих

случаях для получения рабочего раствора требуемой плотности его разбавляют горячей водой.

Чтобы получить однородный раствор с заданным временем гелеобразования, необходимо четко соблюдать пропорции компонентов и порядок

В/см, а суглинков 1,2–1,5 В/см.

Плотность тока по грунту в течение всего времени закрепления постоянно меняется и зависит от электрического сопротивления грунтовой воды, а также от рецептуры растворов электролитов. В начальный пе-

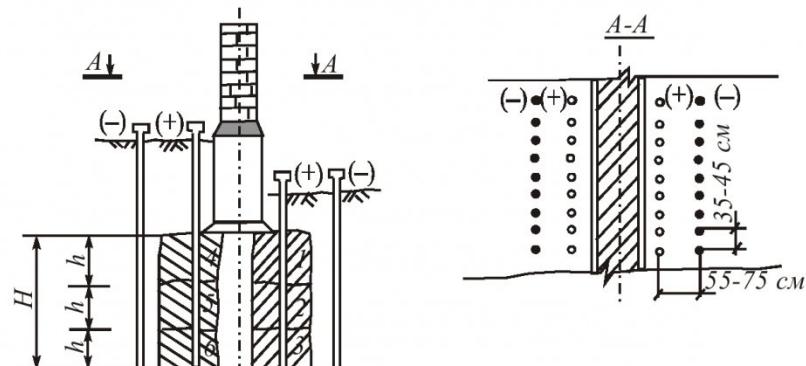


Рис. 5. Расположение электродов-инъекторов при закреплении грунта под фундаментом:  $H$  – глубина обработки;  $h$  – глубина заходки; 1–6 – порядок обработки

приготовления смеси. Раствор жидкого стекла всегда вливают в раствор отвердителя (при однорасстворной рецептуре) тонкой струей при интенсивном перемешивании в смесителях механического действия.

Режим ЭХЗ зависит от трех основных параметров: градиента напряжения между электродами, плотности тока по грунту, времени обработки массива [2].

Для получения удовлетворительных результатов закрепления грунтов с коэффициентом фильтрации  $K_\phi = 0,005 \text{ м/сут}$  и менее необходимо, чтобы между электродами-инъекторами действовало сильное электрическое поле. Поэтому при ЭХЗ глин градиент падения напряжения назначается  $E = 0,7\text{--}1,2$

период ЭХЗ, когда влажность грунта достаточно большая, при использовании однорасстворной рецептуры для получения требуемой скорости фильтрации раствора-электролита плотность тока по грунту необходимо принимать  $j = 20\text{--}25 \text{ А/м}^2$ , а при использовании двухрасстворной рецептуры  $j = 6\text{--}10 \text{ А/м}^2$ . К концу обработки грунта плотность тока уменьшается в обоих случаях в 50–65 раз. Электрический ток необходимо пропускать через грунт в течение всего периода инъекции растворов-электролитов, а также в течение 20–40 ч после инъекции для подсушки грунта и ускорения набора прочности.

Расход электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> обрабатываемого грунта

принимается в пределах от 20 до 50 кВт·ч. На значение расхода электроэнергии влияет целый ряд факторов, поэтому целесообразно оптимальные его значения устанавливать на основе контроля процессов обработки на всех стадиях.

Средняя длительность обработки при двухрастворном способе ЭХЗ составляет 125 ч. Основные этапы при двухрастворном способе ЭХЗ состоят в следующем: инъекция жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  – 40 ч; инъекция хлористого кальция  $\text{CaCl}_2$  – 40 ч; подсушка грунта – 45 ч. При однорастворном способе ЭХЗ время обработки с учетом подсушки составляет до 60–75 ч.

Искусственное закрепление грунтов требует применения химических реагентов (щелочей, кислот, солей) и связано с пропуском электрического тока. Это вызывает особые требования к технике безопасности, обязывает неукоснительно выполнять все правила безопасности и поведения людей на рабочем месте. Безопасность работ обеспечивается главным образом за счет рационального размещения оборудования и материалов, точного выполнения

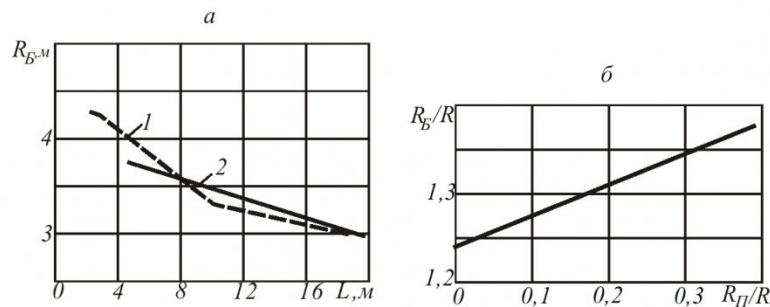


Рис. 6. Зависимость безопасного расстояния  $R_B$  от расстояния до бровки уступа  $L$  при рядовом расположении электродов (а), отношения радиуса полости  $R_P$  к радиусу установки  $R$  при кольцевом расположении электродов (б):  
1 – со стороны уступа; 2 – с противоположной стороны

всех технологических операций, наличия спецодежды, ограждений, освещения, подробного инструктажа персонала о правилах безопасности [8].

Шаговое напряжение при электрохимическом закреплении грунтов обычно не превышает 30–40 В, поэтому для выполнения мелких операций разрешается входить в зону пропуска тока, но обязательно в резиновых сапогах и перчатках, при заливке электролита и откачке воды электрическую сеть необходимо отключать. Зависимости безопасных расстояний  $R_B$  от геометрических параметров установки при рядовом рас-

положении электродов-инъекторов на укрепляемом уступе и кольцевом вокруг строящегося устья ствола приведены на рис. 6 [9].

Разработанные методики и электросиловая аппаратура имеют широкий диапазон применения. Использование разработок при ведении горно-строительных работ в Кузбассе будет способствовать обеспечению эффективных режимов воздействия на массив, экономии материальных и трудовых затрат, достижению требуемого качества укрепительных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жинкин, Г. Н. Электрохимическая обработка грунтов в основаниях сооружений / Г. Н. Жинкин, В. Ф. Калганов. – М. : Стройиздат, 1980. – 164 с.
2. Должиков, П. Н. Электрохимический тампонаж обводненных неустойчивых пород при строительстве устьев шахтных стволов / Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Днепропетровск: ДГИ им. Артема, 1989. – 16 с.
3. Электротехнический справочник. Использование электрической энергии / Под общ. ред. проф. И. Н. Орлова. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 616 с.
4. Руденко, В. С. Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов. – 2 изд., перераб. и доп. / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко. – М. : Высшая школа, 1980. – 424 с.
5. Тиристоры: Справочник / О. П. Григорьев, В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1155).
6. Башарин, А. В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / А. В. Башарин, Ф. Н. Голубев, В. Т. Кепперман. – М. : Энергия, 1979. – 696 с.
7. Руденко, В. С. Основы промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1985. – 400 с.
8. Смирнов, А. Д. Справочная книжка энергетика / А. Д. Смирнов, К. Н. Антипов. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
9. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С. М. Простов, В. А. Хямляйнен, М. В. Гуцал, С. П. Бахаева; РАЕН. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 127 с.

□ Авторы статьи:

Простов  
Сергей Михайлович  
– докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Демьянов  
Владимир Васильевич  
– канд. физ.-мат. наук, доц.  
каф. электропривода и автоматики

Покатилов  
Андрей Владимирович  
– аспирант каф. теоретической и геотехнической механики