

УДК 62-83

Е.А. Смотров, канд. техн. наук, Д.В. Вершинин, В.В. Субботин, А.Ю. Сусленко

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ РЕКУПЕРАТОРА В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Рассматриваются особенности использования суперконденсаторов в динамических режимах, выполняется аналитическая оценка их характеристик на основе математической модели. Произведена оценка влияния различных факторов на энергоэффективность этих конденсаторов, сформулированы критерии выбора параметров для проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: суперконденсатор, рекуперация, электротранспорт.

E.A.Smotrov, Ph.D., D.V. Vershinin, V.V. Subbotin, A.Y. Suslenko

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF ULTRACAPACITOR'S EXCHANGER IN DINAMIC CONDITIONS

The paper considers features of ultracapacitors use in dynamic modes and the analytical evaluation of their performance based on mathematical models were made. Also the evaluation of the effect made by their parameters on total energy efficiency has been produced. As result the criteria for selecting these parameters for further research in the synthesis of an efficient energystore recuperative power stage was formulated.

Keywords: ultracapacitor, recuperation, electric transport.

Є.О.Смотров, канд. техн. наук, Д.В. Вершинін, В.В.Субботін, О.Ю.Сусленко

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ РЕКУПЕРАТОРА В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ

Розглядаються особливості використання суперконденсаторів у динамічних режимах, виконується аналітична оцінка їх характеристик на основі математичної моделі. Оцінено вплив різноманітних факторів на енергоефективність цих конденсаторів, сформульовано критерії вибору цих параметрів для проведення подальших досліджень.

Ключові слова: суперконденсатор, рекуперация, электротранспорт.

О различных топологиях построения электротранспортных средств (ЭТС) уже написано довольно много, в том числе и силами «Станкосерт» НТЦ. В частности, в [1, 2] уже упоминалась проблема ограниченности динамических способностей бортовых источников энергии и предлагалось решение этого недостатка с помощью введения в состав силовой подсистемы энергонакопительной рекуперационной установки, использующей в качестве буферной емкости суперконденсаторы. Данное решение основывается как на соображениях о давно известных различиях в динамике накопления энергии аккумуляторной батареей (АБ) и суперконденсатором (СК), так и на современных исследованиях в области гибридных энергоустановок [5], позволяющих говорить о значительной выгоде такого тандема. Проведенные экспериментальные исследования при движении ЭТС показали, что выбор буферной емкости СК, исходя только из статической оценки накапливаемой энергии не-

достаточен. Важную роль играют также динамические процессы и паразитные параметры СК, исследованию влияния которых и посвящена данная работа.

В литературе можно встретить общие заявления о том, что «КПД СК очень высок», или «КПД СК более 90 %» [4], но при этом такая характеристика не сопровождается исчерпывающим обоснованием, которое могло бы помочь разработчикам более эффективно использовать СК в каждом конкретном случае применения. Как упоминалось выше, во время продвижения работ при практической реализации рекуперационной установки было замечено выявлено значительное влияние паразитных параметров СК на их энергетические возможности. В частности, достаточно большое внутреннее сопротивление (порядка 0,35 Ом для СК с номинальным напряжением 300 В и емкостью 1,5 Ф) усложняет измерение ограничения напряжения (рис.1), что приводит к недоиспользованию емкости СК при работе в динамическом режиме движения ЭТС.

© Смотров Е.А., Вершинин Д.В.,
Субботин В.В., Сусленко А.Ю., 2011

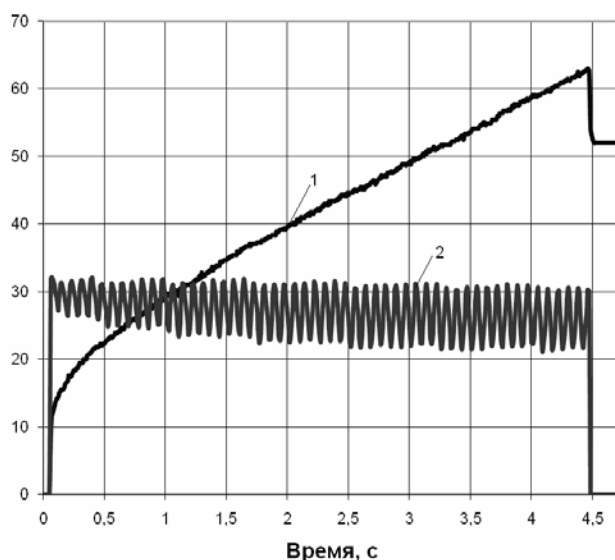


Рис. 1. График изменения напряжения (1) на клеммах СК при протекании зарядного тока (2)

Во время проведения экспериментов также было замечена значительная зависимость КПД цикла заряда-разряда конденсатора от начального напряжения на зажимах СК. Поэтому было принято решение более детально изучить свойства СК в различных режимах заряда-разряда и при разных начальных условиях и параметрах СК.

Для решения поставленных задач использовался метод математического моделирования с задействованием САПР *MathCAD* и *MatLAB*. За основу была взята модель СК с сосредоточенными параметрами (рис.2), адекватность которой проверялась по реальному СК с номинальным напряжением 100 В и емкостью 7 Ф.

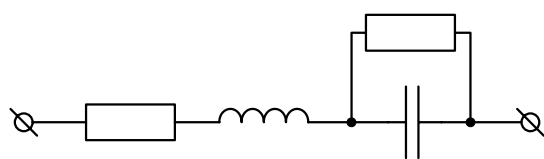


Рис. 2. Базовая модель СК с сосредоточенными параметрами

После оценки величины R утечки, которое составило приблизительно 2 Мом, было решено им пренебречь в конечной модели, так как существенного влияния в пределах быстротекущих процессов она не оказывает. Та же участь постигла и эквивалентную индуктивность, значение которой было определено экспериментально на резонансной час-

тоте и составило порядка 400 нГн. Такая индуктивность, обоснованная конструктивными особенностями СК, является несущественной по сравнению с индуктивностью дросселя рекуператора [1] порядка 100 мкГн и может быть исключена из модели для упрощения математического анализа. В результате была получена следующая модель, приведенная на рис. 3.

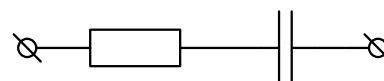


Рис. 3. Упрощенная модель СК с сосредоточенными параметрами

Для изучения энергетической эффективности было рассмотрено три различных режима заряда: заряд СК от источника постоянной ЭДС, источника постоянного тока и источника с линейно падающим значением тока.

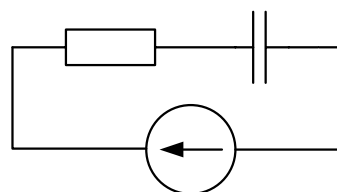


Рис. 4. Схема включения СК на источник постоянной ЭДС

Начальное напряжение на конденсаторе обозначим $u_c(0)$, внутреннее сопротивление источника r_0 , ЭДС источника E . Ток и напряжение подчиняются следующим законам:

$$i = \frac{E - u_c(0)}{r + r_0} e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}}, \quad (1)$$

$$u_c = E + (u_c(0) - E) e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}}. \quad (2)$$

Определим мощность, выделяемую на активном сопротивлении, запасаемую в конденсаторе и отдаваемую источником:

$$p_r = i^2 r = r \left(\frac{E - u_c(0)}{r + r_0} e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} \right)^2 = r \left(\frac{E - u_c(0)}{r + r_0} \right)^2 e^{\frac{-2t}{C(r+r_0)}}, \quad (3)$$

$$p_C = iu_C = \frac{E - u_C(0)}{r + r_0} e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} \cdot \left(E + (u_C(0) - E) e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} \right), \quad (4)$$

$$p_E = iE = E \frac{E - u_C(0)}{r + r_0} e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}}. \quad (5)$$

Проинтегрировав полученные выражения, получим энергию, выделяемую на активном сопротивлении, запасаемую в конденсаторе и отдаваемую источником:

$$W_r = \int p_r dt = \int r \left(\frac{E - u_C(0)}{r + r_0} \right)^2 e^{\frac{-2t}{C(r+r_0)}} dt = \frac{(E - u_C(0))^2}{2} \frac{rC}{r + r_0} \left(1 - e^{\frac{-2t}{C(r+r_0)}} \right), \quad (6)$$

$$W_C = \int p_C dt = \int E \frac{E - u_C(0)}{r + r_0} e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} dt - \int \frac{(E - u_C(0))^2}{r + r_0} e^{\frac{-2t}{C(r+r_0)}} dt = C(E - u_C(0)) \cdot \left(E \left(1 - e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} \right) + \frac{E - u_C(0)}{2} \left(e^{\frac{-2t}{C(r+r_0)}} - 1 \right) \right)$$

$$W_E = \int_0^{t_i} p_E dt = \int_0^{t_i} E \frac{E - u_C(0)}{r + r_0} e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} dt = EC(E - u_C(0)) \left(1 - e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} \right). \quad (8)$$

По отношению энергии, запасенной в конденсаторе, к энергии, отданной источником, можно определить зависимость КПД заряда от времени для конденсаторов с различными значениями параметров и начальных условий:

$$\eta = \frac{W_C}{W_E} = 1 - \frac{E - u_C(0)}{2E} \frac{\left(1 - e^{\frac{-2t}{C(r+r_0)}} \right)}{\left(1 - e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} \right)} = 1 - \frac{E - u_C(0)}{2E} \left(1 + e^{\frac{-t}{C(r+r_0)}} \right) \quad (9)$$

Для приведения уравнений к обобщенному виду (в относительных единицах) введем обозначения: $u_C(0) = kE$, где $0 \leq k < 1$, $rC = T$, $r_0 = 0$. Тогда формула (9) примет вид:

дем обозначения: $u_C(0) = kE$, где $0 \leq k < 1$, $rC = T$, $r_0 = 0$. Тогда формула (9) примет вид:

$$\eta = 1 - \frac{1-k}{2} \left(1 + e^{\frac{-t}{T}} \right). \quad (10)$$

На рис. 5 изображена зависимость КПД заряда СК от относительного времени t/T для различных начальных условий $u_C(0)$.

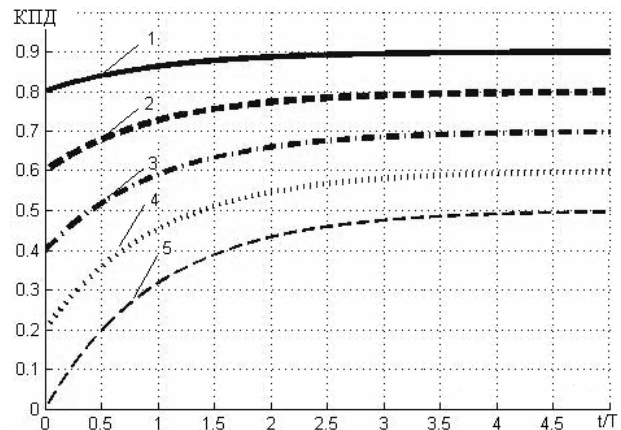


Рис. 5. График зависимости КПД заряда СК под воздействием постоянной ЭДС: 1 – $\kappa = 0,8$; 2 – $\kappa = 0,6$; 3 – $\kappa = 0,4$; 4 – $\kappa = 0,2$; 5 – $\kappa = 0$

Как видно из рис. 5, от начального уровня напряжения на зажимах СК $u_C(0)$ зависит как значение КПД в конце заряда, так и границы его варьирования в течение всего процесса, т.е. $u_C(0)$ является основным параметром, определяющим КПД заряда СК от источника постоянной ЭДС. Данный режим имитирует включение СК без вспомогательной электроники непосредственно на клеммы АБВ. В таком случае напряжения СК и АБ близки ($k \rightarrow 1$), при этом показатель КПД заряда-разряда – достаточно высокий, но используется лишь малая часть энергии СК, что подтверждают более ранние исследования [3].

Так как СК рассматриваются нами в контексте энергонакопительной рекуперационной установки, которая по своей сути является управляемым источником тока, особый интерес представляет рассмотрение зависимости энергетической эффективности заряда-разряда от источника тока. В процессе движения ЭТС диаграмма тока состоит из участков с постоянными и почти линейно

изменяющимися значениями во времени. Поэтому были проанализированы закономерности изменения характеристик СК под воздействием идеального источника постоянного тока. Схема включения элементов которого изображена на рис. 6.

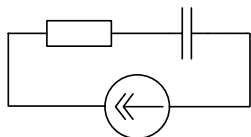


Рис. 6. Схема включения СК на идеальный источник постоянного тока

Если обозначить ток идеального источника $i_c = J$, тогда напряжения на элементах цепи могут быть описаны следующими выражениями:

$$u_c = \frac{J}{C}t + u_c(0), \quad (11)$$

$$u_r = Jr, \quad (12)$$

$$u_J = J \left(r + \frac{t}{C} \right) + u_c(0). \quad (13)$$

Определим мощность, выделяемую на активном сопротивлении, запасаемую в конденсаторе и отдаваемую источником:

$$p_r = J^2 r, \quad (14)$$

$$p_C = \frac{J^2}{C}t + J \cdot u_c(0), \quad (15)$$

$$p_J = J^2 \left(r + \frac{t}{C} \right) + J \cdot u_c(0). \quad (16)$$

Проинтегрировав мощности, получим формулы для энергии, выделяемой каждым элементом цепи:

$$W_r = J^2 r t, \quad (17)$$

$$W_C = Jt \left(u_c(0) + \frac{Jt}{2C} \right), \quad (18)$$

$$W_J = Jt \left[u_c(0) + J \left(r + \frac{t}{2C} \right) \right]. \quad (19)$$

Далее, записав отношение энергии, запасенной в емкости, к энергии, отданной источником, и упростив выражение, получим

$$\eta = \frac{1}{1+a}, \quad (20)$$

$$\text{где } a = \frac{2JrC}{Jt + 2Cu_c(0)}.$$

Для приведения уравнений к обобщен-

ному виду (в относительных единицах) введем обозначения: $u_c(0) = kJr$, где $0 \leq k < \infty$, $rC = T$. Итак, формула (20) примет вид:

$$a = \frac{2T}{t + 2kT},$$

$$\eta = \frac{1 + \frac{2Tk}{t}}{1 + 2T \frac{k+1}{t}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k + \frac{t}{2T}}}. \quad (21)$$

Построим графическое отображение зависимости КПД от времени и начальных условий, в соответствии с (21).

Как видно из рис. 7 тенденция зависимости от начального напряжения $u_c(0)$, как и на рис.5, сохраняется, но асимптотой всех графиков является КПД = 1, что качественно отличается от предыдущего режима, при котором конечное значение КПД < 1 определялось начальным напряжением СК $u_c(0)$.

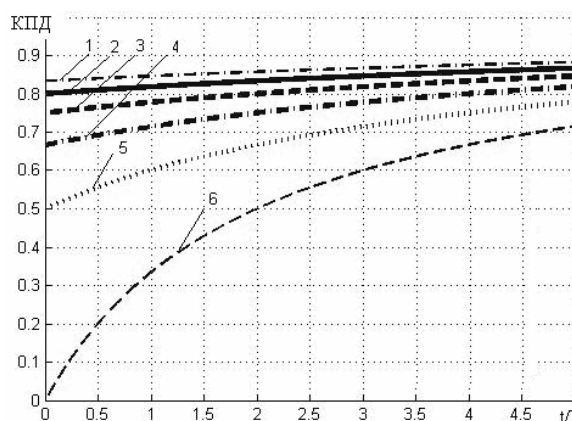


Рис. 7. График зависимости КПД от времени и начальных условий в процессе заряда постоянным током:

$$1 - \kappa = 5; 2 - \kappa = 4; 3 - \kappa = 3;$$

$$4 - \kappa = 2; 5 - \kappa = 1; 6 - \kappa = 0$$

Следующий этап исследования – подключение СК к идеальному источнику с линейно падающим значением тока. Обозначим ток идеального источника

$$i_c = J \left(1 - \frac{t}{\tau} \right),$$

где τ – время, за которое ток уменьшится до нуля. Напряжения на элементах цепи могут быть представлены следующими выражениями:

$$u_r = Jr \left(1 - \frac{t}{\tau} \right), \quad (22)$$

$$u_c = \frac{Jt}{C} \left(1 - \frac{t}{2\tau}\right) + u_c(0), \quad (23)$$

$$u_J = u_r + u_c = J \left[\frac{t}{C} \left(1 - \frac{t}{2\tau}\right) + r \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \right] + u_c(0). \quad (24)$$

Запишем уравнения мощностей:

$$p_r = i^2 r = rJ^2 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^2, \quad (25)$$

$$p_c = J \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \left(\frac{Jt}{C} \left(1 - \frac{t}{2\tau}\right) + u_c(0) \right), \quad (26)$$

$$p_J = J \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \left[\frac{Jt}{C} \left(1 - \frac{t}{2\tau}\right) + u_c(0) \right] + J^2 r \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^2. \quad (27)$$

Проинтегрировав полученные выражения, получим формулы для вычисления энергетических показателей:

$$W_c = \frac{J^2 t^4}{8C\tau^2} - \frac{t^3 J^2}{2C\tau} + J \frac{t^2}{2C} - J \frac{t^2}{2} \frac{u_c(0)}{\tau} + u_c(0) Jt, \quad (28)$$

$$W_E = \frac{J^2}{8C\tau^2} t^4 + \frac{J^2}{3} t^3 \left(\frac{1}{\tau} \left(\frac{r}{\tau} - \frac{1}{C} \right) - \frac{1}{2C\tau} \right) + \frac{t^2}{2} \left(J^2 \left(\frac{1}{C} - \frac{r}{\tau} \right) - \frac{J}{\tau} (Jr + u_c(0)) \right) + Jt (Jr + u_c(0)). \quad (29)$$

Для приведения уравнений к обобщенному виду (в относительных единицах), введем обозначения: $u_c(0) = kJr$, где $0 \leq k \leq \infty$, $rC = T$.

$$\eta = \frac{A}{D},$$

$$A = 3(t - 2\tau) (Jt^2 - 2J\tau t - 4\tau C u_c(0)),$$

$$D = 3Jt^3 + 4Jt^2(2T - 3\tau) + 12t(-2JT\tau - \tau C u_c(0)) + J\tau^2 + 24C\tau^2(u_c(0) + Jr). \quad (30)$$

На рис.8 представлено графическое отображение зависимости КПД от времени и начальных условий, определяемых выражением (30). На нем наблюдается тенденция зависимости КПД от начального напряжения $u_c(0)$, асимптотой которых является

КПД, равный 1, как и в предыдущем режиме.

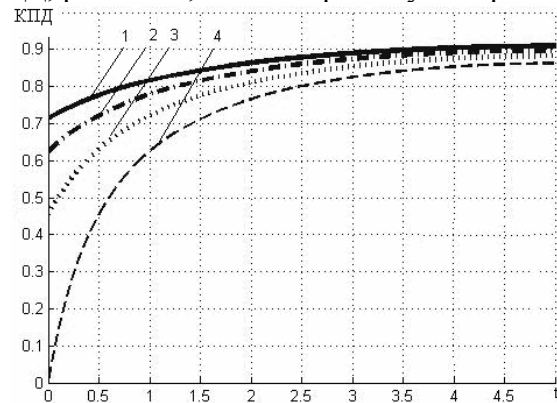


Рис. 8. График зависимости КПД от времени и начальных условий процесса заряда в процессе заряда линейно убывающим током:

1 – $\kappa = 3$; 2 – $\kappa = 2$; 3 – $\kappa = 1$; 4 – $\kappa = 0$

Выводы

Проведена аналитическая оценка энергоэффективности СК в динамических режимах на основе математической модели, учитывающей особенности реальных суперконденсаторов – большое внутреннее сопротивление. С учетом полученных результатов были сделаны следующие выводы:

КПД цикла заряда-разряда являются функцией параметров конкретного исполнения СК, т.е. постоянной времени его rC -цепи и не зависит от параллельного и/или последовательного соединения СК;

большое влияние на текущее значение КПД, а значит и потери в цепи СК, оказывает начальный уровень напряжения на клеммах СК;

непосредственное подключение СК к зажимам АБ, без специальной силовой электроники, отмечается определенными осложнениями при включении СК и характеризуется очень низким коэффициентом использования энергии, накопленной в СК, чем обуславливается необходимость значительного увеличения требуемой емкости СК;

при определении требуемой емкости СК для рекуперационной установки ЭТС необходимо учитывать как ограничение «сверху» на величину максимального напряжения СК при заряде вследствие падения на внутреннем сопротивлении, что приводит к недоиспользованию возможностей СК в динамических режимах, так и увеличение потерь в

цепи СК вследствие снижения КПД при уменьшении минимального напряжения СК. С одной стороны, уменьшение $U_{СК\min}$ позволяет более полно использовать энергию, запасенную в СК [3], с другой – как показал проведенный анализ, повышает уровень потерь в рекуперационной установке. Эти обстоятельства требуют доработки методики выбора емкости СК для применения на ЭТС в составе энергонакопительной рекуперационной установки.

Список использованной литературы

1. . Вершинин Д.В. Некоторые аспекты работы автономного источника питания электротранспортного средства / Д.В Вершинин, В.А. Войтенко, Е.А. Смотров // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. – Вип. 77. – С.6–12.

2. Вершинин Д.В. Определение параметров основных узлов электрической схемы электробуса / Д.В. Вершинин, В.А.Войтенко, Е.А.Смотров // Электромашинобуд. та електрообладн. – 2009. – Вип. 74. – С.10–17.

3. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства /Д.В. Вершинин, В.А. Водичев, В.А.Войтенко, Е.А.Смотров // Электромашинобуд. та електрообладн. – К.: Техника. – 2008. – Вып. 71. – С.43–50.

4. Экономичный экологический городской гибридный автобус / С. Флоренцев, Л.Макаров, В.Менухов, И.Варакин //Электронные компоненты. – 2008. – № 12. – С.24–36.

5. AFS Trinity Reports Its Battery/Ultracap Plug In Hybrid System Is 6 Times More Durable Than Lithium Batteries Alone – Режим доступа к материалам :<http://afstrinity.com/press/releases/press-release-11-17-08.html.com>

Получено 28.10.2011

References

1. Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov E.A. Determining the parameters of the basic units of electrical circuits of elektrobusa / Elektromashinobuduvannya that electro-leading supplier. – 2009. – VIP. 74. – P.10-17 [in Russian].

2. Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov

E.A. Some aspects of the autonomous power source vehicles / Elektrotehnični that komp'yuterni system. – 2010. – VIP.77. – P.6–12 [in Russian].

3. Vershinin D.V., Vodichev V.A., Voitenko V.A., Smotrov E.A. Features of the options on-board power source vehicles / Electric-building and electrical equipment. – Kiev: Technology. – 2008. –Is. – 71. – P.43–50 [in Russian].

4. Florence S., Makarov I., Menuhov V., Varakin I. Ecological Economy City hybrid bus / Electronic Components. – 2008.– № 12. – P.24–36 [in English].

5. AFS Trinity Reports Its Battery/Ultracap Plug In Hybrid System Is 6 Times More Durable Than Lithium Batteries Alone. –Mode of access to materials: <http://afstrinity.com/press/releases/press-release-11-17-08.html.com> [in Russian].



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



Вершинин
Дмитрий Вениаминович,
инж.-исследователь ОСКБ
спец. станков,
тел. 048-728-85-05



Сусленко
Александр Юрьевич,
магистр Одесск. нац. по-
литехн. ун-та, каф. КСУ



Субботин
Виктор Владимирович,
студент Одесск. нац. по-
литехн. ун-та, каф.
ЭМС КУ