

УДК 629.5.064.5:621.313.3

Н. И. Муха, канд. техн. наук,
С. С. Павленко

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Аннотация. Приведены результаты исследования переходных режимов судовой электроэнергетической системы при пусках мощных асинхронных электродвигателей. Рассмотрено влияние эксплуатационных параметров электроприводов судовых механизмов на динамические свойства систем стабилизации напряжения и частоты судового дизель-генератора в процессе пуска асинхронного двигателя.

Ключевые слова: дизель-генератор, асинхронный электродвигатель, эксплуатационные параметры, система стабилизации напряжения

N. Y. Mukha, Ph.D.,
S. S. Pavlenko

DYNAMIC PROPERTIES OF VOLTAGE STABILIZING SYSTEM IN STARTING MODE OF ASYNCHRONOUS MOTOR FROM SHIP POWER-STATION

Abstract. Results of the ship electrical energy system transient analysis are brought at starting of powerful asynchronous electric motors. The influence of electric drives of ship mechanisms operating parameters are considered on dynamic properties of the voltage stabilization system and frequency of ship dieselgenerator in the starting process of asynchronous motor.

Keywords: diesel-generator, asynchronous electric motor, operating parameters, voltage stabilization system

М. Й. Муха, канд. техн. наук,
С. С. Павленко

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ В РЕЖИМІ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ВІД СУДОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Анотація. Наведено результати дослідження перехідних режимів судової електроенергетичної системи під час пусків потужних асинхронних електродвигунів. Розглянуто вплив експлуатаційних параметрів електроприводів судових механізмів на динамічні властивості систем стабілізації напруги і частоти судового дизель-генератора в процесі пуску асинхронного двигуна.

Ключові слова: дизель-генератор, асинхронний електродвигун, експлуатаційні параметри, система стабілізації напруги

Введение. Электропривод с асинхронным двигателем является самым распространенным видом электрической нагрузки судовой электростанции. Наибольшие воздействия на судовую сеть возникают во время пусковых режимов электроприводов. Этот режим является типовым эксплуатационным процессом и должен учитываться при проектировании и настройке систем автоматического регулирования напряжения и частоты судовой электростанции, [1; 5; 6].

Задачей данной работы является проведение исследований переходных режимов судовой электроэнергетической системы при пусках мощных асинхронных электродвигателей на разработанной компьютерной модели синхронного дизель-генератора и асинхронного электропривода, [2 – 4]. Моделируемая установка включает также системы

автоматического регулирования напряжения синхронного генератора и частоты вращения приводного дизеля.

Цель. Оценка влияния эксплуатационных параметров электроприводов судовых механизмов на динамические свойства систем стабилизации напряжения и частоты судового дизель-генератора в процессе пуска асинхронного двигателя.

Результаты исследований. В качестве регулятора напряжения рассмотрим типовой стабилизирующий ПИ-регулятор возбуждения синхронного генератора. Систему усиления и преобразования тока возбуждения синхронного генератора упрощенно представим апериодическим инерционным звеном первого порядка [7 – 8; 10]. Тогда в законе регулирования напряжения синхронного генератора

© Муха Н.И., Павленко С.С., 2013

$$W_r(p) = \frac{K_a}{T_a p + 1} \left(K_p + \frac{1}{T_i p} \right)$$

будут присутствовать настроечные параметры ПИ-регулятора K_p и T_i , а также коэффициенты, характеризующие инерционный возбудитель K_a и T_a .

Такое представление системы стабилизации напряжения охватывает как генераторы с контактными кольцами на роторе, так и бесконтактные синхронные генераторы, в которых подвозбудитель с вращающимися диодами описывается инерционным звеном.

Система стабилизации частоты вращения в модели описывается инерционно-пропорциональным законом управления [9], т.е. передаточная функция регулятора частоты вращения дизеля рассматривается как апериодическое звено:

$$W_\omega(p) = \frac{K_\omega}{T_\omega p + 1}$$

Как показали исследования переходных процессов пуска электродвигателя на этой модели (рис. 1), наибольшее возмущение электромагнитного момента генератора M_g , вызывающее значительные колебания напряжения и частоты дизель-генератора, возникает в момент достижения пускаемым двигателем частоты вращения ω_m , большей половины номинального значения. При этом индуктивное сопротивление асинхронного двигателя резко увеличивается, что приводит к всплеску электромагнитного момента двигателя M_m .

Всплеск электромагнитного момента пускаемого электродвигателя M_m приводит к возрастанию момента генератора M_g и движущего момента дизеля M_d (рис. 1). В результате этого возникают динамические забросы частоты вращения ω_g и напряжения U_m синхронного генератора.

Как показали исследования, характер переходных процессов в системах стабилизации частоты вращения и напряжения дизель-генератора существенно зависит от электрической нагрузки генератора перед пуском. При малой начальной нагрузке электроагрегата (рис. 1, а) окончание пуска вызывает существенные колебания в канале

стабилизации напряжения, при этом колебания частоты вращения дизель-генератора остаются незначительными.

При увеличении начальной нагрузки автономного генератора до 50 % от номинальной (рис. 1, б) колебания в канале регулирования напряжения практически исчезают, а в контуре стабилизации частоты – увеличиваются.

Противоположный характер влияния загрузки генератора во время пуска электродвигателя на колебательность контуров регулирования напряжения и частоты вращения объясняется разной физической природой генерирования напряжения и стабилизации частоты вращения дизель-генератора.

При увеличении активного тока синхронного генератора пропорционально возрастает угол нагрузки $\Theta(t)$ между вектором электромагнитного поля и магнитной осью генератора. Известно, что с увеличением этого угла устойчивость синхронного генератора снижается, что объясняет возрастание колебательности в контуре регулирования частоты вращения при увеличении нагрузки.

Уменьшение колебательных свойств системы возбуждения синхронного генератора под нагрузкой можно объяснить изменением параметров системы вследствие насыщения.

Рассмотрим подробнее влияние загрузки дизель-генератора g_n перед пуском электродвигателя на характеристики переходного процесса в канале регулирования напряжения. Здесь g_n – проводимость активной нагрузки генератора в относительных единицах.

При моделировании будем изменять нагрузку генератора g_n и соотношение номинальных мощностей пускаемого асинхронного двигателя P_m и синхронного генератора P_g , выражаемое коэффициентом $K_m = P_m / P_g$. Переходной процесс пуска электродвигателя будем оценивать по следующим показателям:

I_p – максимальной величине пускового тока асинхронного двигателя;

Ψ – степени затухания колебаний переходного процесса по напряжению;

I_U – интегральному показателю качества переходного процесса, равному площади

под кривой отклонения напряжения от заданного значения

$$I_U = \int_0^{T_\delta} |U_m - U_{i11}| dt \approx \sum_{n=1}^{T_\delta/\Delta t} |U_{mn} - U_{i11}| \Delta t.$$

Расчет площади под кривой переходного отклонения напряжения I_U производится в процессе моделирования и зависит от шага интегрирования Δt (рис. 2). Тем не менее, его величина позволяет сравнивать между собой процессы, вычисленные по одной программе.

Анализ колебательных свойств контура регулирования напряжения показывает, что удовлетворительными свойствами обладает система, у которой площадь под переходным процессом I_U не превышает 50 о.е.

На рис. 3 приведены зависимости показателей I_p , Ψ и I_U переходного процесса пуска электродвигателя при различных нагрузках дизель-генератора от соотношения мощностей K_m двигателя и генератора. Максимальный пусковой ток двигателя I_p линейно возрастает с ростом мощности пускаемого двигателя K_m и смещается вверх на величину начальной загрузки генератора g_n . Номинального значения ток генератора достигает при мощности пускаемого двигателя 17–20 % от мощности генератора.

Степень затухания Ψ колебаний напряжения синхронного генератора во время пуска электродвигателя оценивалась по максимальным динамическим отклонениям в первый и во второй периоды наиболее интенсивных колебаний, ΔU_{m1} и ΔU_{m2}

$$\Psi = \frac{\Delta U_{m1} - \Delta U_{m2}}{\Delta U_{m1}}.$$

Из рисунков 1 и 2 видно, что наиболее интенсивные колебания возникают в момент завершения разгона асинхронного двигателя.

На рис. 3 показано слабое затухание колебаний напряжения при малой нагрузке дизель-генератора при $g_n = 0,1$. Увеличение нагрузки генератора резко снижает колебательность системы, см. график Ψ при $g_n = 0,4$ и $K_m < 0,15$. Это же явление наблюдается на графиках интегрального пока-

зателя качества I_U . Так, при $g_n = 0,1$ и $K_m > 0,15$ функционал $I_U > 50$, т.е. колебательность системы стабилизации напряжения становится недопустимо большой.

Другим фактором, существенно влияющим на динамические свойства системы стабилизации частоты, является момент сопротивления на валу пускаемого электродвигателя. Рассмотрим случай «вентиляторной» нагрузки электропривода

$$M_{\text{aa}}(t) = M_{\text{aa max}} \omega_m^2$$

На рис. 4 приведены результаты влияния максимального значения момента $M_{\text{дв max}}$ на колебательные свойства системы регулирования напряжения генератора во время пуска электродвигателя.

При малых нагрузках генератора, до 50 % ($g_n = 0,1 \dots 0,4$) от его мощности, увеличение момента сопротивления $M_{\text{aa max}}$ приводит к росту колебательности системы регулирования напряжения (рис. 4). Если нагрузка дизель-генератора перед пуском электропривода превышает 50 % его номинальной мощности, то момент сопротивления электродвигателя не влияет на динамические свойства системы.

Выводы. Начальные условия пуска и эксплуатационные параметры электроприводов судовых механизмов влияют на динамические свойства систем стабилизации напряжения и частоты судового дизель-генератора в процессе пуска асинхронного двигателя.

Прямой пуск электропривода соизмеримой мощности, составляющей 20–25 % от номинальной мощности дизель-генератора, вызывает динамический всплеск пускового тока, близкого к максимально допустимому поэтому такой пуск следует производить при недогруженном генераторе.

С другой стороны, разгрузка дизель-генератора перед пуском приводит к значительному ухудшению колебательных свойств системы стабилизации напряжения.

При нагрузке дизель-генератора до 50 % целесообразно пускать электродвигатель соизмеримой мощности на холостом ходу или с малой нагрузкой.

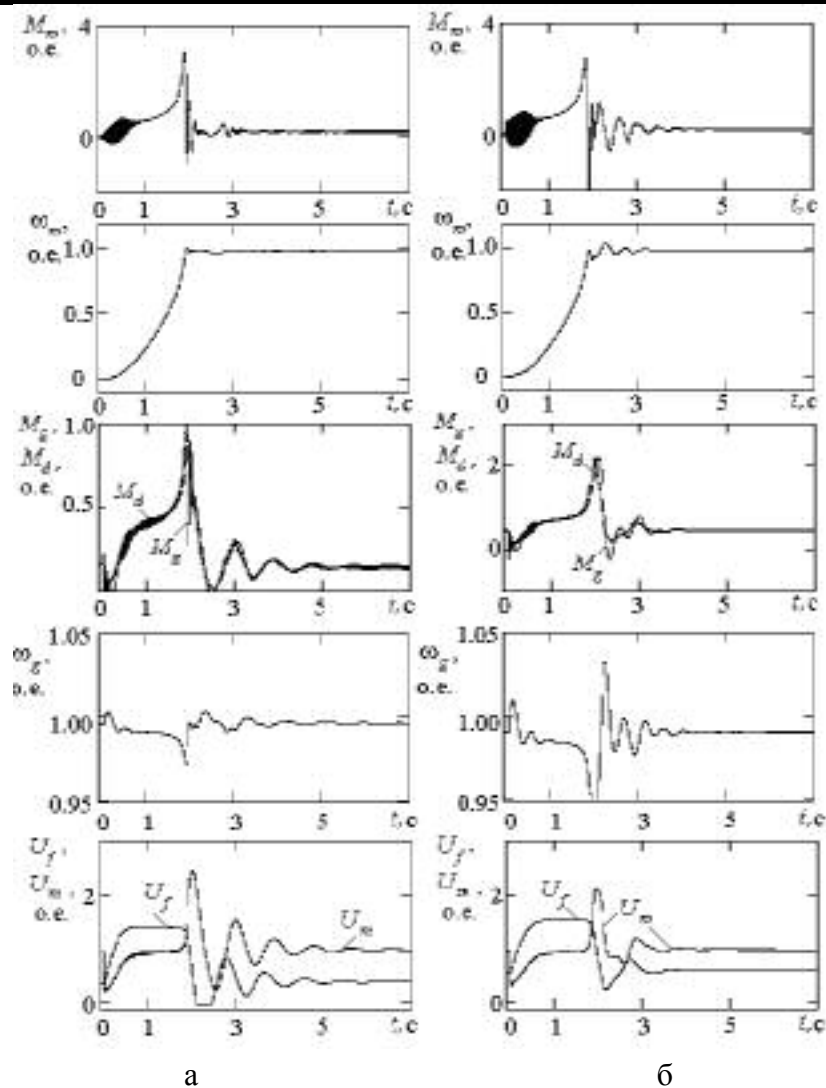


Рис. 1. Переходные процессы пуска асинхронного электродвигателя мощностью 20 % от номинальной мощности дизельного электроагрегата с синхронным генератором при начальной нагрузке дизель-генератора в 12,5 % (а) и 50 % (б)

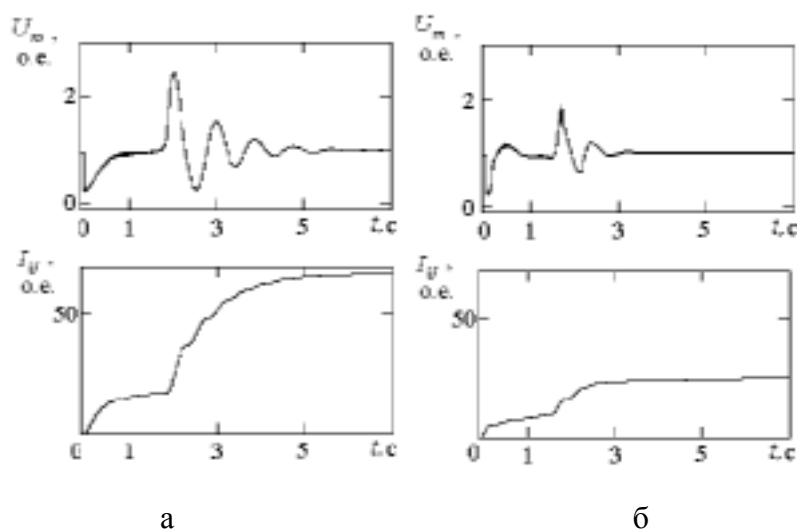


Рис. 2. Расчет площади отклонения напряжения генератора I_U в процессе пуска двигателя с различной нагрузкой: а – $g_n = 0,1$ или 12,5 %; б – $g_n = 0,4$ или 50 %

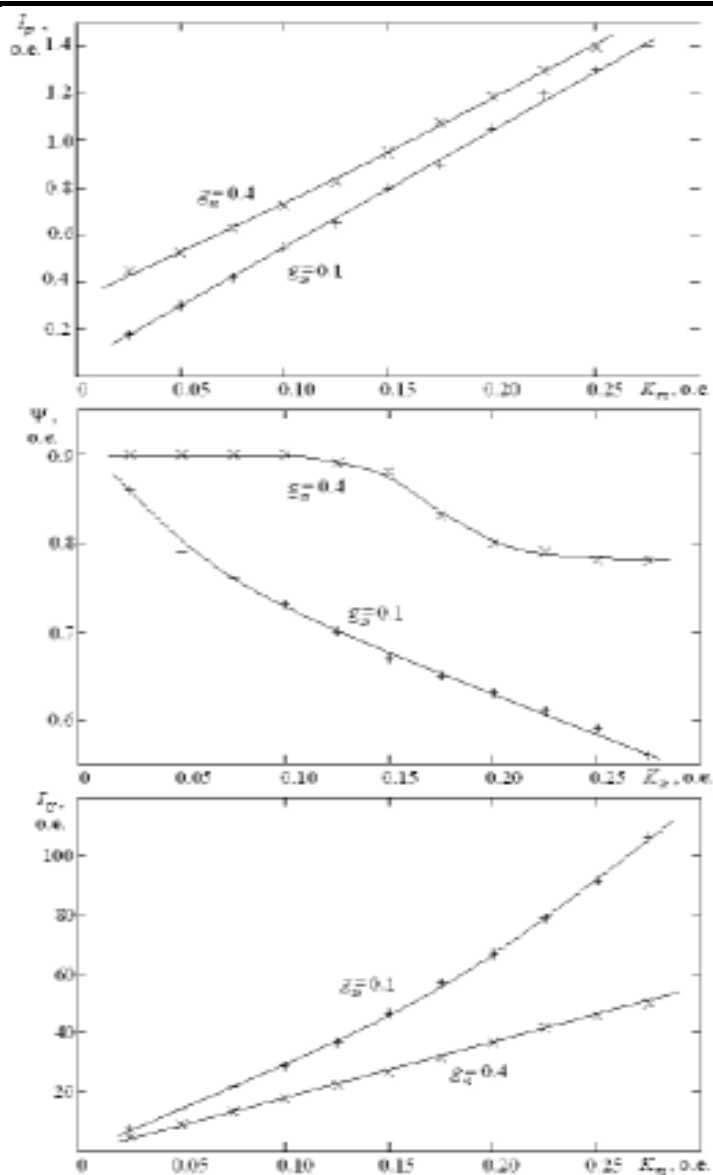


Рис. 3. Показатели переходного процесса пуска электродвигателя

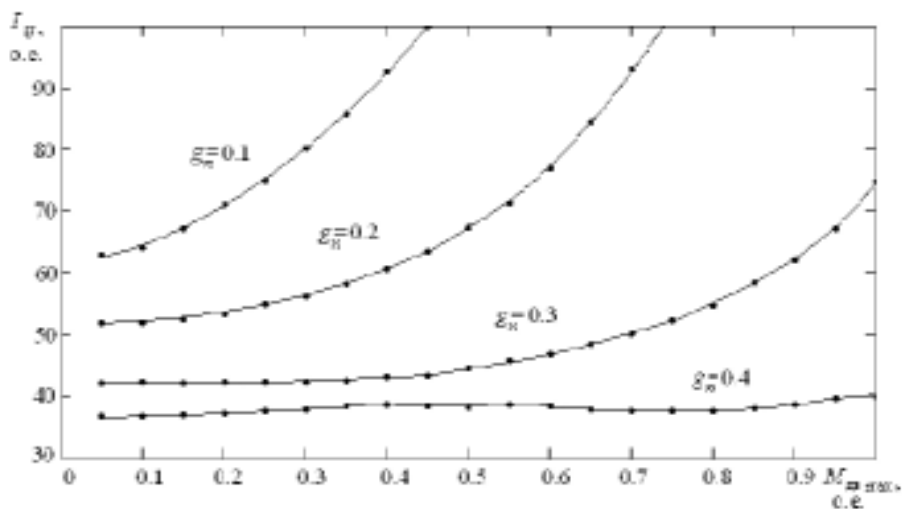


Рис. 4. Зависимости интегрального показателя качества стабилизации напряжения генератора от момента сопротивления двигателя

Список использованной литературы

1. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы / А. П. Баранов – М. : Транспорт, 1988. – 328 с.
2. Вишневский Л. В. Компьютерное моделирование судовых вспомогательных электроустановок / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, А. М. Веретенник // Судовые энергетические установки. – Одесса : ОГМА. – 2001. – № 6. – С.23 – 30.
3. Вишневский Л. В. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть / Л. В., Вишневский, А. М., Веретенник, Н. И. Муха, И. П. Козырев // Электромашинобудування та електрообладнання. – К. : Техніка. – 2006. – Вип. 66. – С.201 – 204.
4. Агунов А. В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки / А. В. Агунов // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 47 – 50.
5. Беляев В. Н. Рабочие режимы судовых вспомогательных энергетических установок с асинхронными дизель-генераторами [Текст] дис ... канд. техн. наук, защищена апрель 1990 г. / Беляев Василий Николаевич. – Одесса, 1990. – 148 с.
6. Бурбело М. Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 65 – 68.
7. Веретенник А.М. Моделирование процессов стабилизации напряжения синхронного генератора в режиме компенсации реактивной мощности / А. М Веретенник // Электромашинобудування та електрообладнання. – К. : Техніка, 2003. – Вип. 61. – С. 29 – 32.
8. Вишневский Л. В. Универсальная математическая модель генератора переменного тока / Л. В. Вишневский, В. П Мироненко // Изв. Вузов Электромеханика. – 1986. – № 3. – С. 33 – 40.
9. Петухов М. В. Інтегральні показники енергетичного процесу тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх

живлені від мережі обмеженої потужності / М. В. Петухов, Ю. В. Грицюк, А. В. Гадай // Вісник Приазовського державного технічного університету – Маріуполь : ПДТУ. – 2005. – С. 100 – 104.

10. Salameh Z.M., (1987), Analysis of a double output induction generator using direct three-phase model - I. Comutation angle analysis / Z. M., Salameh, L. F. Kazda // *IEEE Trans. Energy Convers.* – V.EC-2. – No. 2. – Pp.175 – 181.

Получено 10.02.2013

References

1. Baranov A.P., (1988), Ship's automated electroenergy systems / A. P. Baranov – Moscow: *Transport*, – 328 p. [in Russian].
2. Vishnevskiy L.V., (2001), Computing modeling of ship's axillary plants / L.V. Vishnevskiy N.Y. Mukha, A.M. Veretennik // *Ship's power plants* – Odessa: *OSMA*. – No. 6. – Pp. 23 – 30 [in Russian].
3. Vishnevskiy L.V., (2006), Modelling of switching the synhronus generator to ship's power / L. V. Vishnevskiy, A. M. Veretennik, N. Y. Mukha, I. P. Kozyrev // *Electromachinebuilding and electrical equipment* – Kiev: *Technics*. – No. 66. – Pp. 201 – 204 [in Russian].
4. Agunov A.V., (2003), Static compensator inactive component of power with full compensation load current harmonic components / A. V. Agunov // *Electrotechnics* — No. 2. – Pp. 47 – 50 [in Russian].
5. Belyaev V.N., (1990), Operational modes of ship's axillary power plants with asynchronous diesel generators; PhD thesis / V.N. Belyaev – Odessa: 148 p. [in Russian].
6. Burbelo M.Y., (2008), Reactive power compensation of asynchronous motor with sharply variable loading modes / M. Y. Burbelo, A. V. Gaday // *Messenger of Vinnytsia polytechnical university*. – No. 1. – Pp. 65 – 68 [in Russian].
7. Veretennik A.M., (2003), Voltage stabilization processes modeling of synchronous generator in reactive power compensation mode / A. M. Veretennik // *Electromachine*

building and electrical equipment – Kiev: Technics. – V.61. – Pp. 33 – 40 [in Russian].

8. Vishnevskiy L.V., (1986), Universal mathematical model of alternate current generator / L. V Vishnevskiy, V. P. Mironenko // *News of higher institutes Electromechanics.* – No. 3. – Pp. 33 – 40 [in Russian].

9. Petuhov M.V., (2005), Energy processes integral indexes reactive power thyristor compensation supplied from limit power network / M. V. Petuhov, Y. V. Gritsyuk, A. V. Gaday// *Messenger of Priazov state technical university.* Mariupol : PSTU, – Pp. 100 – 104 [in Russian].

10. Salameh Z.M., (1987), Analysis of a double output induction generator using direct three-phase model - I. Comutation angle analysis / Z. M. Salameh, L. F Kazda // *IEEE Trans. Energy Convers.* – V. EC-2. – No. 2. – Pp. 175 – 181 [in English].



Муха
Николай Иосифович, канд. техн. наук, доцент каф. СЭМ и ЭТ Одесской нац. морской академии



Павленко
Сергей Сергеевич, аспирант каф. СЭМ и ЭТ Одесской нац. морской академии