

УДК 621.313.04

Христо П. Е.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ГЛАВНЫХ НАСОСОВ СУХОГО ДОКА НА БАЗЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО КАСКАДА

Аннотация. Предложена система для регулирования мощности главных насосов сухого дока на базе дифференциального каскада, в которой процесс преобразования энергии протекает аналогично асинхронной электрической машине, чем обеспечивается существенное снижение габаритной мощности регулируемого преобразователя по сравнению с основным двигателем. Поставлена и получена численное решение вариационная задача по минимизации эксплуатационных расходов на электроэнергию, потребляемую дифференциально-каскадной электромеханической системой управления мощностью главных насосов при опорожнении камеры дока за установленное время.

Ключевые слова: энергосбережение, асинхронная машина, симметричный дифференциал, машина постоянного тока, ведомый сетью инвертор, двухзонный электропривод, центробежный насос, камера сухого дока, вариационная задача, критерий оптимальности, временные затраты, финансовые затраты.

Христо П. Є.

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ГОЛОВНИХ НАСОСІВ СУХОГО ДОКА НА БАЗІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО КАСКАДУ

Анотація. Запропоновано систему для регулювання потужності головних насосів сухого доку на базі диференціального каскаду, в якій процес перетворення енергії протікає аналогічно до асинхронної електричної машини, чим забезпечується істотне зниження габаритної потужності регульованого перетворювача у порівнянні із основним двигуном. Поставлено і отримала чисельний розв'язок варіаційна задача з мінімізації експлуатаційних витрат на електроенергію, яка споживається диференційно-каскадною електромеханічною системою управління потужністю головних насосів під час спорожнення камери дока за встановлений час.

Ключові слова: енергозбереження, асинхронна машина, симетричний диференціал, машина постійного струму, ведений мережею інвертор, двозонний електропривод, відцентровий насос, камера сухого доку, варіаційна задача, критерій оптимальності, витрати часу, фінансові витрати.

Khristo P.

ENERGY-SAVING ELECTRIC DRIVE OF A DRY DOCK DEWATERING PUMPS BASED DIFFERENTIAL CASCADE

Annotation. The system is offered for adjusting of a dry dock dewatering pumps power on the base of differential cascade, in which the process of energy flows transformation like an asynchronous electric machine, what is provide the substantial decline of the controlled converter overall power as compared to a basic engine. Put and a variation task got a numeral decision on minimization of running expenses on electric power, consumed by differentially-cascade electromechanic control system by power of dewatering pumps, at emptying of dock chamber for the set time.

Keywords: energy-savings, asynchronous machine, symmetric differential, dc machine, slave a network inverter, two-zone electric drive, centrifugal pump, chamber of dry dock, variation task, criterion of optimality, temporal expenses, financial expenses, cascade.

Введение. Известно, что практически все судостроительные и судоремонтные сухие доки, как старой, так и новой постройки, оборудованы собственными насосными станциями, предназначенными для выполнения ряда ответственных технологических операций, одной из которых обязательно является периодическое опорожнение камеры. Для этой цели служат главные насосы [1].

Электроприводы главных насосов являются наиболее мощными потребителями

электроэнергии на насосных станциях сухих доков и в большинстве случаев работают напрямую от сети 6 кВ. В связи с тем, что для главных насосов характерна работа в условиях значительного изменения напора на протяжении всего времени работы, КПД электронасосных агрегатов также изменяется в широких пределах, отклоняясь от номинального значения в меньшую сторону. При опорожнении сухого дока полезная работа насосной станции выражается в изменении

потенциальной энергии массы остатка воды в камере и зависит только от начального и конечного уровня водного горизонта (не зависит от времени опорожнения камеры). Поэтому, в частности, путем поддержания постоянного КПД главных насосов на номинальном уровне, можно заметно сократить потребление электроэнергии. Но это становится возможным лишь в случае перехода к регулируемому электроприводу главных насосов и сопряжено с затягиванием процесса опорожнения камеры по сравнению с базовым режимом [2]. В качестве базового режима по правилам эксплуатации оборудования доковой насосной станции принимается такой режим работы, при котором положение рабочей точки на расходных характеристиках насосов путем прикрытия регулирующей задвижки поддерживается вблизи правой границы рабочего интервала, а подача остается примерно постоянной и несколько превышает номинальное значение.

Постановка задачи. В [2] были проведены предварительные расчеты по технико-экономическому обоснованию перехода к системе оптимального управления регулируемым электроприводом главных насосов сухого дока судостроительного завода «Океан», однако в качестве критерия оптимальности был принят минимум полезной работы электродвигателей, производимой за цикл. Используемая при этом модель не учитывает влияние на процесс преобразования энергии потерь мощности приводного электродвигателя, системы электропитания, передаточного устройства. Поэтому возникает необходимость в решении более общей задачи с критерием оптимальности, учитывающим энергетическую эффективность всей электромеханической системы в целом. Конечно, решение такой задачи возможно лишь в том случае, если известна структура электромеханической системы, а также энергетические характеристики ее отдельных компонентов. Однако сама задача технической реализации регулируемого электропривода главных насосов сухого дока встречает на своем пути трудности вследствие значительной мощности электродвигателей и невозможности их замены по материально-финансовым соображениям. В рассматриваемом случае из-за

большого срока окупаемости оказывается нецелесообразной установка преобразователь частоты. Применение механических силовых вариаторов осложняется проблемой балансировки при относительно больших частотах вращения выходного вала. Применение коробок передач большой мощности может привести к снижению КПД и надежности системы наряду с ее существенным удорожением. Другим известным недостатком коробок передач является ступенчатое регулирование скорости. Применение вентильного каскада является наиболее рациональным с точки зрения предельной мощности преобразователя, включаемого в роторную цепь, но требует замены штатного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на двигатель с фазным ротором и в общем случае – дополнительной установки преобразователя для регулирования напряжения обмотки статора, рассчитанного на передачу номинальной мощности двигателя. Применение двухскоростных двигателей тоже противоречит указанным требованиям. Принимая во внимание вышесказанное, можно предложить для реализации регулируемого электропривода главных насосов сухого дока применить электромеханическую систему на базе дифференциального каскада, которая по сравнению с другими вариантами обладает рядом преимуществ.

Цель работы. Найти оптимальный закон управления электроприводом главных насосов сухого дока завода «Океан» на базе дифференциального каскада, обеспечивающий опорожнение камеры дока за установленное время при условии минимального потребления электроэнергии, сравнить основные показатели системы с регулируемым и нерегулируемым электроприводом главных насосов доковой насосной станции.

Материалы работы. Функциональная схема электромеханической системы на базе дифференциального каскада, предназначенной для регулирования мощности главных насосов сухого дока, представлена на рис. 1. На этой схеме обозначены основные элементы системы: ГН СД – главный насос сухого дока; АД – асинхронный двигатель привода главного насоса; Д – симметричный конический дифференциал; ГПТ НВ – генератор

постоянного тока независимого возбуждения;

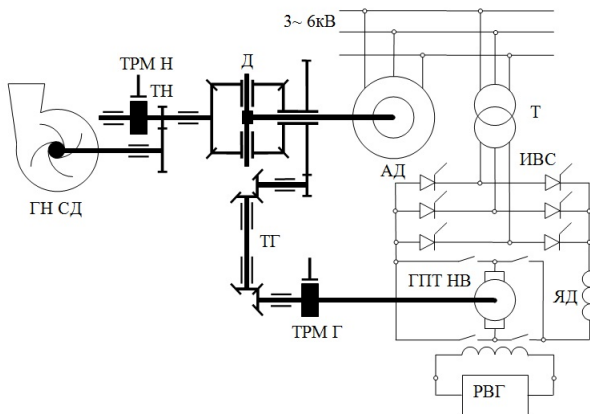


Рис. 1. Функциональная схема электромеханической системы для регулирования мощности главных насосов сухого дока на базе дифференциального каскада

ТН – механическая трансмиссия насоса, выполненная в виде зубчатой передачи с двукратным понижением скорости; ТГ – механическая трансмиссия генератора, выполненная в виде зубчатой передачи с одной или несколькими ступенями и служащая для согласования частоты вращения генераторной полуоси дифференциала и вала якоря генератора; РВГ – регулятор напряжения возбуждения генератора; ЯД – якорный дроссель; ИВС – инвертор, ведомый сетью, выполненный по трехфазной мостовой схеме; Т – трансформатор, служащий для согласования напряжения якоря генератора и питающей сети; ТРМ Н и ТРМ Г – механический тормоз насосной и генераторной полуоси дифференциала.

Пуск системы, схема которой изображена на рис. 1, целесообразно производить в следующей последовательности: 1. генераторная полуось дифференциала растормаживается, насосная полуось остается под воздействием механического тормоза; 2. машина постоянного тока запускается, питаясь от тиристорного преобразователя, который в пусковом режиме работает в качестве управляемого выпрямителя и, работая как двигатель, разгоняет ротор асинхронной машины до скорости, близкой к синхронной, с заданным токоограничением; 3. асинхронная машина, вращающаяся с достаточно малым скольжением, включается в сеть; 4. контакторный реверсор якорной цепи машины по-

стоянного тока переключается, и она переходит в генераторный режим, причем тиристорный преобразователь продолжает свою работу уже в качестве инвертора, ведомого сетью; 5. насосная полуось дифференциала растормаживается и начинает работу главный насос. Требуемое увеличение скорости рабочего колеса насоса обеспечивается полным или частичным торможением вала якоря генератора. Как видно, достоинством рассматриваемой схемы является пуск асинхронной машины от сети при весьма малом скольжении, чем обеспечивается значительное снижение пусковых токов, неблагоприятно влияющих на работу других потребителей электроэнергии предприятия ввиду значительной мощности главных электронасосных агрегатов доковой насосной станции. Расчеты показали, что для лучшего использования машины постоянного тока по мощности, тиристорный электропривод должен быть двухзонным, причем наивысшая угловая скорость машины постоянного тока должна соответствовать скорости вращения генераторной полуоси дифференциала, приблизительно равной удвоенной синхронной скорости асинхронного двигателя. В связи с этим при разгоне асинхронного двигателя машина постоянного тока вначале работает с номинальным потоком при напряжении на якоре ниже номинального, а когда ЭДС якоря достигает номинального значения, напряжение тиристорного преобразователя стабилизируется, и дальнейшее увеличение скорости достигается путем ослабления поля машины постоянного тока.

Другое, не менее важное, достоинство такой системы заключается в том, что отпадает необходимость в регулировании напряжения питания основного двигателя, а габаритная мощность электропривода генератора, как показывают расчеты, оказывается в четыре и более раз ниже номинальной мощности основного двигателя. Это можно объяснить единообразием процессов преобразования энергии в дифференциальном каскаде и асинхронном двигателе, когда есть механическая передача, понижающая скорость выходного вала вдвое по сравнению с нагрузочной полуосью симметричного дифференциала. По аналогии с асинхронным

двигателем дифференциальный каскад тоже можно характеризовать скольжением выходного вала относительно ротора приводного двигателя, а роль потерь скольжения здесь играет мощность, передаваемая генератору. Результаты анализа соотношения пиковой мощности асинхронного двигателя и потерь скольжения при регулировании скорости механизма вентиляторного типа даются в [3].

Задача оптимального управления электроприводом главных насосов сухого дока при некоторых допущениях в отношении условных ограничений, сводится к общей вариационной задаче Лагранжа с одним дифференциальным и восемью алгебраическими уравнениями связи [4]. Решение задачи Лагранжа производилось классическим методом, причем вспомогательная краевая задача решалась численно. Для интегрирования системы дифференциальных уравнений использовался метод Эйлера, а для установления неизвестных начальных условий – метод деления пополам. Критерий оптимальности поставленной задачи выражается в минимизации интегрального функционала:

$$M = m_p \int_0^T c_w(t) p_c(t) dt, \quad (1)$$

причем M – это стоимость электроэнергии, потребленной за рабочий цикл; m_p – это число главных насосов, используемых в работе (от одного до четырех); c_w – удельная стоимость электроэнергии, которая при двух- или трехставочном тарифе переменна, аппроксимируется непрерывной функцией времени; p_c – мощность дифференциального каскада, определяемая суммой мощности, отдаваемой на вал рабочего колеса насоса и всех потерь в электромеханической системе

$$p_c = \tau_p p + \tau_g p_g + p_{gc} + p_{gv} + p_{mc} + p_{mv} + p_{tc} + p_d, \quad (2)$$

где p , p_g – механическая мощность насоса и генератора; p_{gc} , p_{gv} – условно постоянные и переменные потери генератора; p_{mc} , p_{mv} – постоянные и переменные потери асинхрон-

ного двигателя; p_{tc} – постоянные потери трансформатора; p_d – потери мощности в дифференциале; τ_p , τ_g – коэффициенты, учитывающие механические потери в трансмиссии насоса и генератора; T – время опорожнения камеры дока. Расчетные выражения потерь мощности электрических машин были взяты из [5, 6]. Хотя переменные потери трансформатора в формулу (2) не входят явно, они учитываются в переменных потерях генератора посредством приведения активного сопротивления обмоток трансформатора к якорной цепи генератора и расчета эквивалентного сопротивления.

Система уравнений для нахождения экстремалей получается достаточно громоздкая, поэтому ее удобнее представить в виде совокупности подсистем, решаемых совместно. Для случая работы с ослабленным полем генератора при неизменном значении средневыпрямленной ЭДС инвертора:

$$\left. \begin{aligned} z &= d_h n^{-1} q^3 + a_e q^2 + b_h q n + c_h n^2; \\ u_z &= 3d_h n^{-1} q^2 + 2a_e q + b_h n; \\ v_z &= -d_h n^{-2} q^3 + b_h q + 2c_h n; \\ p &= a_p q^3 + (b_p q^2 + p_{sn}) n + \\ &+ (c_p q + p_{bn}) n^2 + d_p n^3; \\ u_p &= 3a_p q^2 + 2b_p q n + c_p n^2; \\ v_p &= b_p q^2 + p_{sn} + \\ &+ 2(c_p q + p_{bn}) n + 3d_p n^2; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{m0} &= \alpha_0 p n^{-1}; u_{p_{m0}} = \alpha_0 u_p n^{-1}; \\ v_{p_{m0}} &= \alpha_0 n^{-1} (v_p - p n^{-1}); n_m = n_{m0} - \alpha_1 p_{m0}; \\ u_{n_m} &= -\alpha_1 u_{p_{m0}}; v_{n_m} = -\alpha_1 v_{p_{m0}}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} p_g &= \gamma_0 (n_m - n) p_{m0}; \\ u_{p_g} &= \gamma_0 [u_{n_m} p_{m0} + u_{p_{m0}} (n_m - n)]; \\ v_{p_g} &= \gamma_0 [(v_{n_m} - 1) p_{m0} + v_{p_{m0}} (n_m - n)]; \\ n_g &= \gamma_1 (n_m - n); \\ u_{n_g} &= \gamma_1 u_{n_m}; v_{n_g} = \gamma_1 (v_{n_m} - 1); \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_v &= \gamma_2 n_g^{-2} + \gamma_3 n_g^{-0,7}; \\ u_{\gamma_v} &= -u_{n_g} (2\gamma_2 n_g^{-3} + 0,7\gamma_3 n_g^{-1,7}); \\ v_{\gamma_v} &= -v_{n_g} (2\gamma_2 n_g^{-3} + 0,7\gamma_3 n_g^{-1,7}); \\ (\gamma_a + \gamma_v) e_g^2 - \gamma_a e_i e_g - (p_g - \gamma_4 n_g) &= 0; \\ u_{e_g} &= \frac{u_{p_g} - \gamma_4 u_{n_g} - u_{\gamma_v} e_g^2}{2(\gamma_a + \gamma_v) e_g - \gamma_a e_i}; \\ v_{e_g} &= \frac{v_{p_g} - \gamma_4 v_{n_g} - v_{\gamma_v} e_g^2}{2(\gamma_a + \gamma_v) e_g - \gamma_a e_i}, \end{aligned} \right\} (6)$$

где z – уровень водного горизонта в доковой камере, отсчитываемый от зеркала акватории; q, n – подача и относительная частота вращения рабочего колеса насоса; $a_e = a_h - a_s$ – приведенный коэффициент динамических потерь напора, причем a_s – коэффициент гидравлического сопротивления сети, изображенной на рис. 2, рассчитываемый с учетом потерь напора на трение в водоводах и в местных сопротивлениях и зависящий от числа работающих насосов из-за наличия разветвления сети; $d_h, a_e, b_h, c_h, a_p, b_p, c_p, d_p$ – коэффициенты полиномиальной аппроксимации кривых напора и мощности насоса, пересчитанных на базовую частоту вращения рабочего колеса, [7]; P_{sn}, P_{bn} – мощности потерь в сальниках и подшипниках насоса, имеющие место при базовой частоте вращения; P_{m0} – приведенная электромагнитная мощность асинхронного двигателя, равная электромагнитной мощности за вычетом мощности P_{mm} , равной произведению момента механических потерь m_{mm} и синхронной угловой скорости ω_0 ; n_m, n_{m0} – относительная частота вращения ротора двигателя, рабочая и соответствующая реальному холостому ходу; n_g – относительная частота вращения вала якоря генератора; γ_v – переменный параметр генератора, имеющий размерность проводимости; e_g, e_i – ЭДС якоря и эквивалентная ЭДС инвертора, получаемая сложением дей-

ствительной средневыпрямленной ЭДС инвертора и суммы падений напряжения на щетках генератора и в силовых ключах, обозначенной e_Δ .

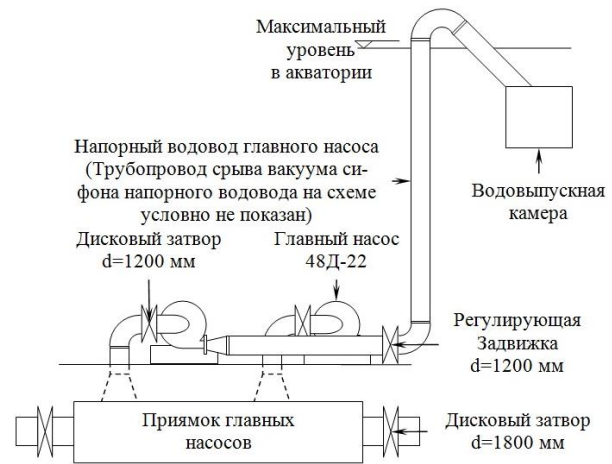


Рис. 2. Схема гидравлической сети главных насосов сухого дока

При подсчете ЭДС генератора путем решения квадратного уравнения меньший из корней отбрасывается вследствие неположительности, а в расчетной формуле перед радикалом берется знак плюс.

В качестве базовой принята синхронная частота вращения двигателя. Кроме того здесь и далее под параметрами u_i, v_i, y_i понимаются переменные коэффициенты при производных \dot{q}, \dot{n} и \dot{c}_w , которые получают-ся при дифференцировании уравнения i -ой переменной по времени.

Потери мощности определяются:

$$\left. \begin{aligned} p_{gc} &= \gamma_v e_g^2 + \gamma_4 n_g; \\ p_{gv} &= \gamma_a (e_g - e_i)^2 + \gamma_a (e_g - e_i) e_\Delta; \\ p_{mv} &= \alpha_2 (p_{m0} + p_{mm}) (1 - n_m); \\ p_d &= k_b p_{m0} (n_m - 2n), \end{aligned} \right\} (7)$$

где k_b – это коэффициент блокировки дифференциала, знакопеременная величина, знак которой зависит от соотношения скоростей полуосей дифференциала, то есть

$$k_b = k_{ba} \operatorname{sgn}(n_m - 2n), \quad (8)$$

причем k_{ba} – абсолютная величина коэффициента блокировки.

Рассчитаем параметры двигателя:

$$\left. \begin{aligned} p_{mm} &= m_{mm} \omega_0; \\ n_{m0} &= 1 - p_{mm} s_{mnom} (p_{m0nom} + p_{mm})^{-1}; \\ \alpha_0 &= \eta_{ip}^{-1} (1 + k_b)^{-1}; \\ \alpha_1 &= s_{mnom} (p_{m0nom} + p_{mm})^{-1}; \\ \alpha_2 &= p_{mvnom} p_{msnom}^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где s_{mnom} , p_{m0nom} – номинальное скольжение и приведенная электромагнитная мощность; η_{ip} – КПД трансмиссии насоса; p_{mvnom} , p_{msnom} – номинальные переменные потери и потери скольжения двигателя.

Параметры генератора:

$$\left. \begin{aligned} e_{g0} &= k_g \Phi_{gnom} \omega_0; \\ \gamma_0 &= \eta_{ig} (1 - k_b); \gamma_1 = 2i_{ig}; \\ \gamma_2 &= e_{g0}^{-2} p_{gfnom}; \gamma_3 = e_{g0}^{-2} p_{gsnom} n_{gnom}^{-1,3}; \\ \gamma_4 &= p_{gmmom} n_{gnom}^{-1}; \gamma_a = r_a^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где e_{g0} – ЭДС генератора при базовой частоте вращения вала якоря и номинальном магнитном потоке Φ_{gnom} ; k_g – конструктивный коэффициент генератора; η_{ig} , i_{ig} – КПД и передаточное число трансмиссии генератора; p_{gfnom} , p_{gsnom} , p_{gmmom} – номинальные потери в обмотке возбуждения, в стали и механические потери мощности генератора; n_{gnom} – номинальная относительная частота вращения вала якоря; r_a – сумма активного сопротивления обмотки якоря, компенсационной и добавочных полюсов генератора, якорного дросселя, приведенного активного сопротивления обмоток трансформатора и сопротивления коммутации [8, 9].

Если несколько электронасосных агрегатов имеют общий якорный дроссель и питают один инвертор, то приведенное к цепи выпрямленного тока активное сопротивление обмоток дросселя, трансформатора и сопротивление коммутации при подсчете r_a

следует умножить, а постоянные потери трансформатора, входящие в (2), – разделить на число насосов m_p .

Также отметим, что в выражении условно постоянных потерь генератора потери в обмотке возбуждения учтены приближенно, в предположении, что они пропорциональны квадрату магнитного потока. В действительности потери на возбуждение из-за нелинейности кривой намагничивания генератора при ослаблении поля должны быть меньше. Помимо этого, для машины постоянного тока с внешней принудительной вентиляцией следует учитывать постоянные потери, равные мощности привода вентилятора. Хотя эти потери в формуле (2) специально не учитываются, их можно условно отнести к постоянным потерям асинхронного двигателя или трансформатора.

Параметры трансмиссии:

$$\left. \begin{aligned} \tau_p &= 1 + (1 - \eta_{ip}) \eta_{ip}^{-1}; \\ \tau_g &= (1 - \eta_{ig}) \eta_{ig}^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Множители Лагранжа вариационной задачи и соответствующие им переменные коэффициенты u_i , v_i , y_i рассчитываются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_8 &= -2c_w [(\gamma_v + \gamma_a) e_g - \gamma_a (e_i - 0,5e_\Delta)] \times \\ &\times [2(\gamma_a + \gamma_v) e_g - \gamma_a e_i]^{-1}; \\ u_{\lambda_8} &= -2(\lambda_8 + c_w) [u_{\gamma_v} e_g + u_{e_g} (\gamma_a + \gamma_v)] \times \\ &\times [2(\gamma_a + \gamma_v) e_g - \gamma_a e_i]^{-1}; \\ v_{\lambda_8} &= -2(\lambda_8 + c_w) [v_{\gamma_v} e_g + v_{e_g} (\gamma_a + \gamma_v)] \times \\ &\times [2(\gamma_a + \gamma_v) e_g - \gamma_a e_i]^{-1}; \\ y_{\lambda_8} &= -2[(\gamma_a + \gamma_v) e_g - \gamma_a (e_i - 0,5e_\Delta)] \times \\ &\times [2(\gamma_a + \gamma_v) e_g - \gamma_a e_i]^{-1}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_7 &= (\lambda_8 + c_w) e_g^2; \\ u_{\lambda_7} &= e_g [u_{\lambda_8} e_g + 2u_{e_g} (\lambda_8 + c_w)]; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{\lambda_7} &= e_g \left[v_{\lambda_8} e_g + 2v_{e_g} (\lambda_8 + c_w) \right]; \\ y_{\lambda_7} &= e_g^2 (y_{\lambda_8} + 1); \end{aligned} \right\} (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_6 &= -\lambda_7 (2\gamma_2 n_g^{-3} + 0,7\gamma_3 n_g^{-1,7}) + \gamma_4 (\lambda_8 + c_w); \\ u_{\lambda_6} &= -u_{\lambda_7} (2\gamma_2 n_g^{-3} + 0,7\gamma_3 n_g^{-1,7}) + \lambda_7 u_{n_g} (6\gamma_2 n_g^{-4} + 1,19\gamma_3 n_g^{-2,7}) + \gamma_4 u_{\lambda_8}; \\ v_{\lambda_6} &= -v_{\lambda_7} (2\gamma_2 n_g^{-3} + 0,7\gamma_3 n_g^{-1,7}) + \lambda_7 v_{n_g} (6\gamma_2 n_g^{-4} + 1,19\gamma_3 n_g^{-2,7}) + \gamma_4 v_{\lambda_8}; \\ y_{\lambda_6} &= -y_{\lambda_7} (2\gamma_2 n_g^{-3} + 0,7\gamma_3 n_g^{-1,7}) + \gamma_4 (y_{\lambda_8} + 1); \end{aligned} \right\} (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_5 &= \tau_g c_w - \lambda_8; u_{\lambda_5} = -u_{\lambda_8}; \\ v_{\lambda_5} &= -v_{\lambda_8}; y_{\lambda_5} = \tau_g - y_{\lambda_8}; \end{aligned} \right\} (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_4 &= (\gamma_0 \lambda_5 + k_b c_w) p_{m0} + \gamma_1 \lambda_6 - \alpha_2 c_w (p_{m0} + p_{mm}); \\ u_{\lambda_4} &= \gamma_0 u_{\lambda_5} p_{m0} + \gamma_1 u_{\lambda_6} + u_{p_{m0}} [\gamma_0 \lambda_5 + (k_b - \alpha_2) c_w]; \\ v_{\lambda_4} &= \gamma_0 v_{\lambda_5} p_{m0} + \gamma_1 v_{\lambda_6} + v_{p_{m0}} [\gamma_0 \lambda_5 + (k_b - \alpha_2) c_w]; \\ y_{\lambda_4} &= \gamma_0 y_{\lambda_5} p_{m0} + \gamma_1 y_{\lambda_6} + k_b p_{m0} - \alpha_2 (p_{m0} + p_{mm}); \end{aligned} \right\} (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_3 &= -\alpha_1 \lambda_4 + \gamma_0 \lambda_5 (n_m - n) + \alpha_2 c_w (1 - n_m) + k_b c_w (n_m - 2n); \\ u_{\lambda_3} &= -\alpha_1 u_{\lambda_4} + \gamma_0 u_{\lambda_5} (n_m - n) + u_{n_m} [\gamma_0 \lambda_5 + (k_b - \alpha_2) c_w]; \\ v_{\lambda_3} &= -\alpha_1 v_{\lambda_4} + \gamma_0 v_{\lambda_5} (n_m - n) + v_{n_m} [\gamma_0 \lambda_5 + (k_b - \alpha_2) c_w] - (\gamma_0 \lambda_5 + 2k_b c_w); \\ y_{\lambda_3} &= -\alpha_1 y_{\lambda_4} + \gamma_0 y_{\lambda_5} (n_m - n) + \alpha_2 (1 - n_m) + k_b (n_m - 2n); \end{aligned} \right\} (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= (-d_h q^3 n^{-2} + b_h q + 2c_h n)^{-1} \times \\ &\times \{ \alpha_0 \lambda_3 p n^{-2} + \gamma_0 \lambda_5 p_{m0} + \gamma_1 \lambda_6 + 2k_b c_w p_{m0} - \\ &- \lambda_2 [b_p q^2 + p_{sn} + 2(c_p q + p_{bn})n + 3d_p n^2] \}; \\ u_{\lambda_1} &= (-d_h q^3 n^{-2} + b_h q + 2c_h n)^{-1} \times \{ 3d_h \lambda_1 \times \\ &\times q^2 n^{-2} - b_h \lambda_1 + \alpha_0 u_{\lambda_3} p n^{-2} + \alpha_0 \lambda_3 u_p n^{-2} + \\ &+ \gamma_0 u_{\lambda_5} p_{m0} + u_{p_{m0}} (\gamma_0 \lambda_5 + 2k_b c_w) + \gamma_1 u_{\lambda_6} - \\ &- u_{\lambda_2} [b_p q^2 + p_{sn} + 2(c_p q + p_{bn})n + 3d_p n^2] - \\ &- 2\lambda_2 (b_p q + c_p n) \}; \\ v_{\lambda_1} &= (-d_h q^3 n^{-2} + b_h q + 2c_h n)^{-1} \times \\ &\times \{ -2d_h \lambda_1 q^3 n^{-3} - 2c_h \lambda_1 + \alpha_0 v_{\lambda_3} p n^{-2} + \\ &+ \alpha_0 \lambda_3 v_p n^{-2} - 2\alpha_0 \lambda_3 p n^{-3} + \gamma_0 v_{\lambda_5} p_{m0} + \\ &+ v_{p_{m0}} (\gamma_0 \lambda_5 + 2k_b c_w) + \gamma_1 v_{\lambda_6} - \\ &- v_{\lambda_2} [b_p q^2 + p_{sn} + 2(c_p q + p_{bn})n + 3d_p n^2] - \\ &- 2\lambda_2 (c_p q + p_{bn} + 3d_p n) \}; \\ y_{\lambda_1} &= (-d_h q^3 n^{-2} + b_h q + 2c_h n)^{-1} \times \\ &\times \{ \alpha_0 y_{\lambda_3} p n^{-2} + \gamma_0 y_{\lambda_5} p_{m0} + \gamma_1 y_{\lambda_6} + 2k_b p_{m0} - \\ &- y_{\lambda_2} [b_p q^2 + p_{sn} + 2(c_p q + p_{bn})n + 3d_p n^2] \}; \end{aligned} \right\} (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &= \lambda_1 (3d_h n^{-1} q^2 + 2a_e q + b_h n) + \\ &+ \lambda_2 (3a_p q^2 + 2b_p qn + c_p n^2); \\ u_{\lambda_0} &= u_{\lambda_1} (2a_e q + b_h n + 3d_h n^{-1} q^2) + \\ &+ u_{\lambda_2} (3a_p q^2 + 2b_p qn + c_p n^2) + \\ &+ 2a_e \lambda_1 + 2\lambda_2 (3a_p q + b_p n) + 6d_h \lambda_1 q n^{-1}; \end{aligned} \right\} (22)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{\lambda_0} &= v_{\lambda_1} (2a_e q + b_h n + 3d_h n^{-1} q^2) + \\ &+ v_{\lambda_2} (3a_p q^2 + 2b_p q n + c_p n^2) + \\ &+ b_h \lambda_1 + 2\lambda_2 (b_p q + c_p n) - 3d_h \lambda_1 q^2 n^{-2}; \\ y_{\lambda_0} &= y_{\lambda_1} (2a_e q + b_h n + 3d_h n^{-1} q^2) + \\ &+ y_{\lambda_2} (3a_p q^2 + 2b_p q n + c_p n^2). \end{aligned} \right\} (23)$$

При численном интегрировании системы дифференциальных уравнений рассматриваемой вариационной задачи последовательно вычисляются все приведенные выше переменные, а затем рассчитываются приращения подачи и частоты вращения насоса в соответствии с дифференциальными уравнениями для этих величин:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q} &= \frac{s^{-1} q v_{\lambda_0} + v_z (s^{-1} \lambda_1 + y_{\lambda_0} \dot{c}_w)}{u_z v_{\lambda_0} - v_z u_{\lambda_0}}; \\ \dot{n} &= - \frac{u_z (s^{-1} \lambda_1 + y_{\lambda_0} \dot{c}_w) + s^{-1} q u_{\lambda_0}}{u_z v_{\lambda_0} - v_z u_{\lambda_0}}. \end{aligned} \right\} (24)$$

В (24) параметр s представляет собой площадь водного горизонта в доковой камере в пересчете на один электронасосный агрегат (дифференциальный каскад), которая меньше общей площади зеркала в m_p раз.

Для определения начального значения подачи q_0 используются известные начальные значения уровня z_0 и относительной частоты вращения колеса насоса n_0 . При нулевом начальном уровне $z_0 = 0$

$$q_0 = n_0 q_{n0}, \quad (25)$$

причем q_{n0} – это подача наизлив, которая имеет место при базовой частоте вращения рабочего колеса насоса.

Важно подчеркнуть, что с точки зрения минимума потерь энергии при работе во второй зоне ни поддержание постоянства ЭДС инвертора, ни поддержание постоянства ЭДС генератора не является оптимальным решением. Можно показать, что для минимизации потерь энергии ЭДС генератора должна подчиняться закону

$$e_g = \sqrt{(p_g - \gamma_4 n_g) / \sqrt{\gamma_v (\gamma_a + \gamma_v)}}, \quad (26)$$

который получен в предположении $e_\Delta = 0$.

Однако на практике зависимость (26) реализовать трудно, поскольку в этом случае ЭДС якоря генератора в пике может достигать 1,5-кратных и более значений по отношению к номинальному. А это представляет опасность для большинства серийных коллекторных машин постоянного тока вследствие ухудшения условий коммутации.

Анализ показал, что, как при стабилизации ЭДС генератора, так и инвертора, обеспечивается ограничение ЭДС генератора на требуемом уровне, результаты по всем рабочим показателям системы получаются близкие, а цикловой КПД снижается по сравнению с вариантом оптимального управления незначительно. Поэтому с позиций простоты технической реализации и повышения надежности системы предпочтение можно отдать стабилизации ЭДС инвертора.

Если работа каскада осуществляется в первой зоне, когда магнитный поток номинальный, а скорость генератора регулируется путем снижения средневыпрямленной ЭДС инвертора, то некоторые из ранее приведенных уравнений, изменятся, кроме того появятся несколько дополнительных. Не приводя здесь эти уравнения, укажем лишь, что в данном случае ЭДС якоря генератора меняется пропорционально частоте вращения, поэтому целесообразно ввести в рассмотрение дополнительное уравнение связи

$$e_g = e_{g0} n_g. \quad (27)$$

Результаты исследования были получены посредством организации автоматизированной процедуры расчета в среде VBA. В качестве генератора постоянного тока была выбрана машина 4ПФ250L, сетевой трансформатор ТСЗП-1000/10уз-6, а оценка минимального угла опережения инвертора была сделана с параметрами тиристора T253-1000. Якорный дроссель не выбирался ввиду того, что уже имеющаяся величина индуктивности оказалась достаточной, как для обеспечения

непрерывности, так и допустимого уровня пульсаций мгновенного тока в якорной цепи [10, 11, 12].

На графиках рис. 3 показаны зависимости эксплуатационных расходов, а на рис. 4 – пиковой потребляемой мощности асинхронного двигателя от времени опорожнения камеры сухого дока с учетом межсезонных колебаний уровня водного горизонта акватории в пределах от 13 до 15 м.

Графики, подписанные $n = var$, на рис. 3, 4 соответствуют оптимальному управлению, а $n = const$ – работе исходной или каскадной системы с постоянной частотой вращения рабочего колеса насоса.

Выделенные точки на графиках соответствуют базовому рабочему режиму асинхронного электропривода при введении понижающей механической передачи с таким расчетом, чтобы при уровне зеркала в акватории 14 м средняя подача пары главных насосов за цикл была равна удвоенной номинальной без прикрытия задвижек.

Выводы. По графикам на рис. 3 видно, что заметно снизить энергопотребление доковой насосной станции можно уже за счет одного только перевода главных насосов на пониженную частоту вращения, при этом выигрыш от применения системы оптимального управления сравнительно мал. Однако минимальное время опорожнения камеры сухого дока – это строго регламентированная величина, которая определяется как время, за которое док опорожняется парой насосов. Здесь следует уточнить, что, поскольку изначально насосная станция дока завода «Океан» проектировалась для обслуживания двух расположенных рядом камер, то и расчетное время опорожнения одной камеры определяется для наиболее тяжелого режима, когда два дока осушаются одновременно четырьмя главными насосами. Поскольку строительство второй камеры не было окончено, то из четырех насосов на станции два по существу являются рабочими, а два – резервными. Таким образом переводить насосы на оптимальную пониженную частоту вращения нельзя, так как каждый из них должен обеспечивать среднюю подачу за рабочий цикл, равную номинальной. Именно поэтому целесообразно применить систему

оптимального управления, которая позволит обрабатывать оптимальный режим с затягиванием процесса по сравнению с базовым режимом при использовании пары или без затягивания – при использовании четырех насосов. Важно, что при этом сохраняется возможность отработки цикла за расчетное время и с помощью пары насосов, когда два других по каким-либо причинам не готовы к работе. И хотя в этом случае будет иметь место некоторое превышение эксплуатационных расходов по сравнению с системой без регулирования мощности, в целом каскадная система должна быть выгоднее. Связано это с тем, что необходимость в ускоренном осушении одной (за время примерно вдвое меньше расчетного) или одновременном осушении двух камер за расчетное время в практике судостроения и судоремонта возникает относительно нечасто. В основном требуется осушение одной камеры за расчетное время. Конечно, при этом успешная работа (без затягивания процесса) системы оптимального управления зависит от готовности к одновременной работе четырех каскадов.

По графикам на рис. 4 видно, что на возможных режимах при прочих равных условиях наибольшая пиковая мощность двигателя имеет место при работе в каскадной системе, наименьшая – при работе асинхронного привода, но ни в одном из случаев она не превосходит номинальную потребляемую мощность двигателя. Для снижения нагрузки на сеть можно рекомендовать при отработке базового режима в каскадной системе перейти от оптимального управления к поддержанию постоянной частоты вращения, благодаря чему пиковая мощность двигателя и каскада заметно снизится. Но при этом нужно учитывать соответствующее возрастание эксплуатационных расходов, как это следует из анализа графиков на рис. 3.

В заключении добавим, что оценка экономической эффективности системы в базовом режиме работы с прикрытием регулирующей задвижки здесь не приведена, так как этот способ управления является наименее рациональным и в данном случае большая часть энергии, отбираемой от сети, рассеивается в гидравлическом сопротивлении.

Целью дальнейших исследований является, в частности, поиск оптимального передаточного числа трансмиссии насоса, которое в действительности больше двух. Целе-

сообразность такого поиска подтверждается предварительными расчетами, которые показывают, что с ростом этого параметра увеличивается цикловая КПД каскадной системы.

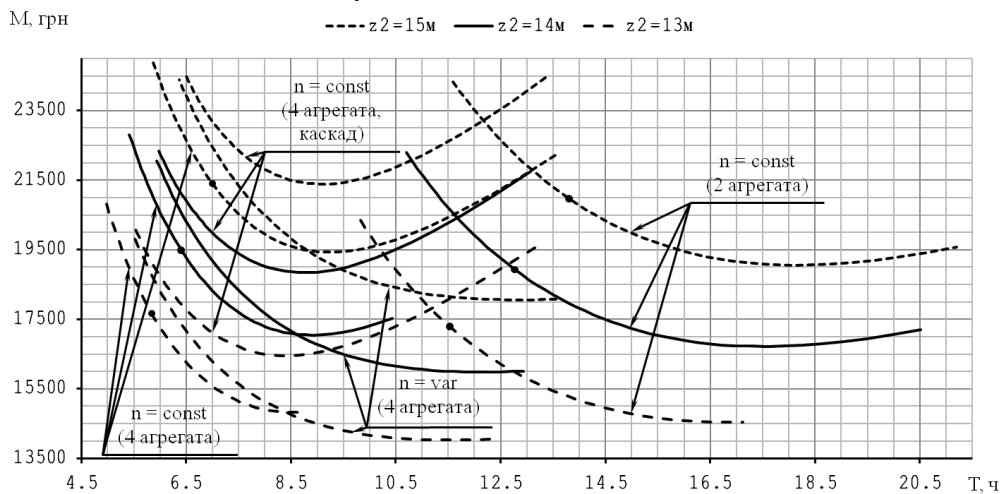


Рис. 3 Зависимость эксплуатационных расходов от времени опорожнения камеры сухого дока с учетом межсезонных колебаний уровня водного горизонта в акватории

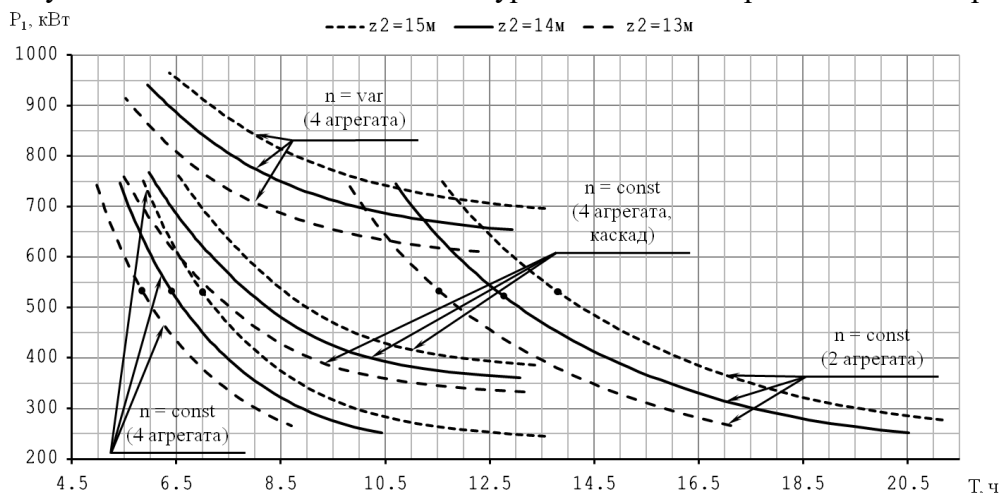


Рис. 4 Зависимость пиковой мощности двигателя главного насоса от времени опорожнения камеры сухого дока с учетом межсезонных колебаний уровня водного горизонта в акватории

Список использованной литературы

1. Григорьев В. Н. Судоспускные и судоподъемные сооружения (проектирование и строительство) [Текст] / В. Н. Григорьев, Д. В. Марченко, Г. В. Симаков, В. А. Смелов // Л. Стройиздат, Ленингр. Отд.-ние, 1976, 176 с.
2. Христо П. Е. Энергосберегающее управление главными насосами сухого дока [Текст] / П. Е. Христо // *Электротехнические и компьютерные системы*. Вид.-во "Техніка". К.: 2015. Вып. № 19 (95). С. 154 – 159.
3. Андреев В. П. Основы электропривода [Текст] / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин // М. – Л., Госэнергоиздат, 1963. 772 с. с рис.
4. Герасимьяк Р. П. Оптимальные системы управления электроприводов для студ. специальности 7.092203: Учеб. пособие [Текст] / Р. П. Герасимьяк // Одесса: ОГПУ. 1998. 72 с.
5. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. [Текст] / В. И. Ключев // М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.
6. Нейман З. Б. Крупные вертикальные электродвигатели переменного тока. [Текст] / З. Б. Нейман, В. З. Пекне, Л. С. Моз. // М., Энергия, 1974., 376 с. с ил.
7. Азарх Д. Н. Насосы. Каталог-справочник [Текст] / Азарх Д. Н., под ред. С. П. Зеленова,

- А. И. Эйфеля. // М., Гос. Науч.-тех. изд. маш.-строит. и суд.-строит. лит., 1953. 428 с.
8. Солодухо Я. Ю. Тиристорный электропривод постоянного тока [Текст] / Я. Ю. Солодухо, Р. Э. Белявский, С. Н. Плеханов, В. Я. Самойленко, А. Х. Шоруков // М., “Энергия”, 1971, 104 с. с ил.
9. Фишлер Я. Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок [Текст] / Я. Л. Фишлер, Р. Н. Урманов, Л. М. Пестряева // М.: Энергоатомиздат, 1989. 320 с.: ил.
10. Копылов И. П. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. – Т. 1. [Текст] / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. // М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.: ил.
11. Евзеров И. Х. Комплетные тиристорные электроприводы: Справочник [Текст] / И. Х. Евзеров, А. С. Горобец, Б. И. Мошкович и др.; Под ред. канд. техн. наук В. М. Перельмутера // М.: Энергоатомиздат, 1988. 319 с.: ил.
12. Тиристор низкочастотный Т253-1000 [Текст] / Открытое акционерное общество “Электровыпрямитель” // Саранск, 2010, 7 с. url: <http://www.elvpr.ru/>

Получено 08.05.2016

References

1. Grigor'ev V.N., Marchenko D.V., Simakov G.V., Smelov V.A. Sudospusknye i sudopod#emnye sooruzhenija (proektirovanie i stroitel'stvo) [Ship-lowering and ship-raising facilities (design and construction)]. (1976), L. Strojizdat, Leningrad branch, 176 p. (In Russian)
2. Hristo P.E. Energoberegayushee upravlenie glavnyimi nasosami suhogo doka [Energy-saving control of a dry dock dewatering pumps]. (2015), Scientific and Technical Journal Electrotechnic and computer systems, Publ. house “Technique”, Kyiv. no 19(95). pp. 154-159. (In Russian)
3. Andreev V.P., Sabinin Ju.A. Osnovy jelektroprivoda [Fundamentals of electric drive]. (1963), M. – L., Gosjenergoizdat, 772 p. silt. (In Russian)
4. Gerasimjak R.P. Optimal'nye sistemy upravlenija jelektroprivodov dlja studentov special'nosti 7.092203: Ucheb posobie [Optimum control system of electric drive for students of specialty 7.092203: Textbook]. (1998), Odessa: Odessa State Polytechnic University. 72 p. (In Russian)
УДК 621.313.04

5. Kljucev V.I. Teorija jelektroprivoda: Ucheb. dlja vuzov. – 2-e izd. pererab. i dop. [Electric drive theory: Textbook. for high schools. - 2nd ed. Revised. and ext.]. (2001). M.: Jenergoatomizdat, 704 p. with silt. (In Russian)
6. Neyman Z.B., Pekne V.Z., Moz L.S. Krupnyie vertikalnyie elektrodvigateli peremennogo toka. [Large vertical electric motors of alternating current.]. (1974), M., Energy, 376 p. with silt. (In Russian)
7. Azarh D.N. Pumps. Reference Catalogue-book [Nasosy. Katalog-Spravochnik]. (1953), M., State scientific and technical pub. house of machinebuilding and shipbuilding lit., 428 p. (In Russian)
8. Soloduhu Ja.Ju., Beljavskij R.Je., Plehanov S.N., Samojlenko V.Ja., Shorukov A.H. Tiristornyj jelektroprivod postojannogo toka [Thyristor electric drive of direct curent]. (1971), M., “Jenergija”, 104 p. with silt. (In Russian)
9. Fishler Ja.L., Urmanov R.N., Pestrjaeva L.M. Transformatornoe oborudovanie dlja preobrazovatel'nyh ustanovok [Transformer equipment for converting installations]. (1989), M.: Jenergoatomizdat., 320 p. with silt. (In Russian)
10. Kopyilov I.P., Klovov B.K. Spravochnik po elektricheskim mashinam: V 2 t. – T. 1. [Reference book on electric machines: In two volumes. V.1.]. (1988), M.: Jenergoatomizdat, 456 p.: silt. (In Russian)
11. Evzerov I.H., Gorobec A.S., Moshkovich B.I. and etc.; Edited by Candidate of Technical Sciences Perel'muter V.M. Kompletnye tiristornye jelektroprivody: Spravochnik [Complete thyristor electric drives: Directory]. (1988), M.: Jenergoatomizdat., 319 p. with silt. (In Russian)
12. Open Joint Stock Company “Elektrovypryamitel” Tiristor nizkochastotnyj T253-1000 [Thyristor lowpass T253-1000]. (2010), 7 p. url: <http://www.elvpr.ru/> (In Russian)



Христо Павел Евгеньевич,
специалист,
ассистент каф. ЭМС КУ,
ОНПУ; адрес: проспект
Шевченко, 1, г. Одесса; кон-
тактный телефон
0970090177