

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ СИНЕРГИИ, МАНЕВРЕННОСТИ, СЕРВИСА И МОБИЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*Докт. техн. наук, проф. МИХАЛЕВ А. С.*

*Республиканский институт высшей школы, БГУ*

Известно около пятидесяти более или менее близких понятий «система». Воспользуемся наиболее общим философским толкованием этого термина [1, с. 610]: «Система (греч. *целое, составленное из частей; соединение*) совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство». Исходя из этого определения можно сформулировать следующие основные принципы оргпроектирования искусственных (целенаправленных, в том числе и образовательных) человеко-машинных систем:

- принцип целостности (синергизма), состоящий в том, что свойства системы принципиально не сводятся к сумме свойств составляющих ее элементов;
- принцип структурности, позволяющий описать систему через установление ее структуры, т. е. сети связей и отношений между ее элементами;
- принцип иерархичности, позволяющий рассматривать исследуемую систему как элемент более сложной системы, а каждый из элементов исходной системы – как систему более низкого порядка иерархии;
- принцип множественности описания систем, утверждающий, что адекватное познание их возможно лишь на пути построения множества различных моделей, каждая из которых описывает тот или иной аспект системы.

Ниже предпринята попытка проиллюстрировать перспективность и эффективность использования таких понятий, как «синергия», «маневренность», «сервис», «мобильность» при

описании образовательных систем и в задачах кадрового менеджмента, базирующихся на так называемых компетентностных знание-деятельностных математических моделях специалистов. В качестве метода исследования выбран метод аналогий, а робототехника избрана в качестве области знаний, в которой указанные понятия доведены до количественных математических оценок.

**Синергия.** «Синергизм, синергия (греч. *сотрудничество, содружество*) – вариант реакции организма на комбинированное воздействие двух или нескольких лекарственных веществ, характеризующийся тем, что это действие превышает действие, оказываемое каждым компонентом в отдельности» [2, с. 456]. В настоящее время границы этого термина существенно расширены, приобрели общесистемный и общенаучный смысл [3].

Чтобы проиллюстрировать данное понятие, обратимся к робототехнике, а конкретнее – к классу манипуляционных роботов. Как известно из теоретической механики, тело (звено манипулятора), свободное в пространстве, имеет шесть степеней подвижности – три поступательных и три вращательных движения относительно трех ортогональных осей. Манипулятор состоит из последовательно, шарнирно соединенных в цепь  $n$  звеньев так, что соседние звенья образуют в суставах кинематические пары, класс которых определяется числом степеней подвижности, утраченных в суставах.

Таким образом, число степеней подвижности  $n$ -звенного манипулятора  $p$  определяется по формуле

$$p = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (1)$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_5$  – числа пар соответственно первого, второго–пятого классов.

В манипуляторе (рис. 1) с антропоморфной (человекоподобной) кинематикой три подвижных звена (I, II и III) и три кинематические пары – плечо (пара третьего класса), локоть (пара пятого класса) и запястье (пара третьего класса).

Таким образом, число степеней подвижности для этого манипулятора

$$p = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 1 - 3 \cdot 2 = 7, \quad (2)$$

т. е. на единицу больше, чем это требуется для перемещения и произвольного ориентирования в пространстве объекта, захваченного схватом.

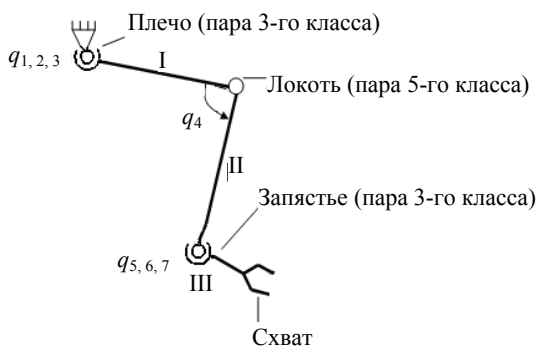


Рис. 1. Манипулятор с антропоморфной кинематикой

Итак, у манипулятора как целостной системы подвижных звеньев появилось новое системное (синергетическое) свойство перемещать и ориентировать в пространстве объекты, не присущее каждому из составляющих его звеньев (не объединенных в систему).

Однако следует подчеркнуть, что манипулятор (с электроприводами в суставах, сенсорами, микропроцессорами) представляет собой лишь исполнительный уровень робота, предназначенный для отработки сплайн-функций (угловых перемещений в суставах) –  $q_1(t); q_2(t), \dots, q_7(t)$ . Задачи тактического уровня – разложение траектории движения схвата в декартовых координатах на указанные сплайн-функции и, наконец, задача стратегического уровня – планирование траекторий движения самого схвата. Излишне, видимо, говорить о том, что на каждом из указанных уровней иерархии синергия ма-

нипуляционного робота как целостной системы существенно и нелинейно возрастает.

В образовательных учреждениях, например вузах, также вполне отчетливо выделяются: исполнительный уровень (кафедры), тактический (факультеты) и стратегический (ректорат, совет вуза). Вполне очевидно, что ни одна кафедра самостоятельно не в состоянии обеспечить подготовку специалистов – только совокупность (система) нескольких кафедр (общеобразовательных, выпускающих, гуманитарных) приобретает необходимое для этой цели системное (синергетическое) свойство и только на исполнительном уровне. Тактический уровень (факультеты) координирует действия подведомственных кафедр, студенческих групп и т. д. и, наконец, стратегический уровень (ректорат, совет вуза) принимает стратегические решения по открытию-закрытию специальностей, набору абитуриентов и т. д.

Рассматривая далее в соответствии с упомянутым принципом иерархичности кафедру как целостную систему, отметим, что ни один из ее преподавателей не в состоянии обеспечить чтение всех дисциплин, закрепленных за кафедрой. Необходимое для этого системное (синергетическое) свойство кафедры появляется лишь при их интегрированных совместных усилиях, координируемых заведующим кафедрой (тактический уровень) и заседаниями кафедры (на стратегическом уровне).

И, наконец, рассматривая образовательную систему страны как целостную, отметим, что ни одно из образовательных учреждений не в состоянии обеспечить надлежащую подготовку специалистов по всем необходимым специальностям и специализациям. Указанное системное (синергетическое) свойство возникает только у всей совокупности учреждений образования (средних, среднеспециальных, высших) и только на исполнительном уровне. На тактическом уровне деятельность родственных учреждений образования координируют соответствующие управления, на стратегическом уровне – министерство образования и правительство страны.

Перечисленные вполне очевидные аналогии позволяют сделать следующие выводы:

- понятие «синергия» как некое новое полезное свойство, появляющееся при целесоуст-

ремленном объединении элементов в систему, существенным образом зависит от числа этих элементов (числа степеней подвижности), способов их соединения в единую структуру, сложности самих элементов и т. д.;

- синергию в принципе можно оценить количественно, каждый раз исходя из сущности той или иной системы (в робототехнике, например через число степеней подвижности);

- критерием качества оргпроектирования и менеджмента в человеко-машинных, например образовательных, системах является величина получаемой положительной синергии при минимальных издержках ресурсов для ее достижения;

- синергия и ее зависимость от различных факторов является нелинейной функцией последних, т. е. малые вариации величины факторов могут приводить к непропорционально значительным вариациям синергии.

**Маневренность.** В [2, с. 292] термин «маневрировать» имеет следующие толкования: 1) производить маневр; 2) передвигаться в обход препятствий, лавировать; 3) действовать обходным путем, прибегать к уловкам, изворачиваться; 4) умело распоряжаться, искусно пользоваться чем-либо, производя перераспределения, переброску; и т. п.

В робототехнике маневренность как системное свойство манипуляционного робота имеет вполне четкое количественное определение. Маневренностью  $m$  называется число степеней подвижности манипулятора при закреплённом схвате

$$m = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1. \quad (2)$$

На рис. 2 понятие «маневренность» проиллюстрировано на примере того же антропоморфного манипулятора, схват которого захватил неподвижное тело так, что звено III – запястье – стало также неподвижным.

Из формулы (2) следует:

$$m = 6(3 - 1) - 5 \cdot 1 - 3 \cdot 2 = 1, \quad (3)$$

т. е. маневренность рассматриваемого манипулятора  $m = 1$ .

Это означает, что при закреплённом схвате (неподвижном звене III) манипулятор все же сохраняет некоторую возможность двигаться.

Действительно, локоть, как это следует из рис. 2, еще можно поворачивать по окружности, плоскость которой перпендикулярна оси, соединяющей центры шаровых шарниров в плече и запястье.

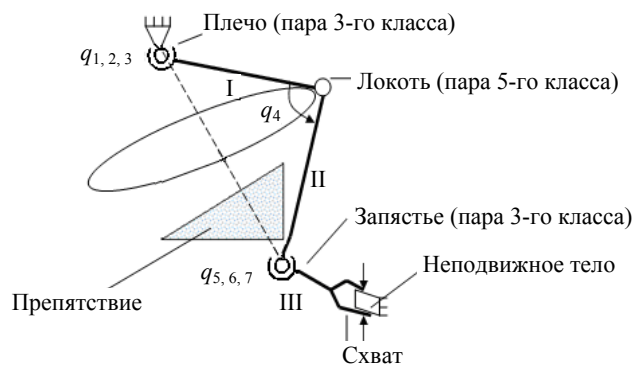


Рис. 2. Иллюстрация понятия «маневренность» манипулятора

Маневренность – достаточно полезное системное свойство, поскольку позволяет «обойти» препятствие между «плечом» и объектом манипулирования (рис. 2), соответствующим образом выбрав положение «локтя» на указанной окружности. Наличие же маневренности серьезно затрудняет программирование движений манипулятора – ведь при одном и том же положении схвата возможно бесчисленное множество положений «локтя» на окружности. Вот почему при детерминированной среде «обитания» робота, например в условиях промышленного цеха, стремятся исключить маневренность, и лишь, когда робот работает в стохастических условиях и появление в рабочей зоне «препятствий» вполне вероятно, приходится увеличивать число степеней подвижности и обеспечивать тем самым необходимую маневренность.

Маневренность вуза как его системное свойство, необходимое в непредсказуемых условиях функционирования, также зависит от числа его «степеней подвижности» – количества его структурных подразделений: факультетов, кафедр; форм учебного процесса (очной, вечерней, заочной, дистанционной), ассортимента специальностей и специализаций и т. д. При возникновении тех или иных форс-мажорных обстоятельств (препятствий – финансовых, юридических, кадровых, административных и т. п.) руководители вуза должны пред-

принять некий соответствующий маневр – кадровый, финансовый, юридический и т. д., чтобы обойти, преодолеть появившееся препятствие с минимальными издержками ресурсов и за приемлемое время.

Кафедра как целенаправленная система, работающая в стохастических условиях, также стремится обеспечить некую маневренность путем подготовки не одной, а двух-трех родственных специальностей или специализаций, подбора преподавателей, способных читать не одну, а две-три дисциплины и таким образом обеспечивать их взаимозаменяемость на случай форс-мажорных обстоятельств.

Преподаватель, в свою очередь, обеспечивает свою маневренность, осваивая два-три и более курсов, читая их на разных кафедрах или факультетах, и т. д.

И, наконец, образовательная система страны в целом также стремится иметь некоторую маневренность, обеспечивая подготовку специалистов одного профиля или специальности не в одном, а в двух-трех и более вузах, даже в одном регионе страны.

На любом из перечисленных уровней иерархии образовательных систем критерий качества тактического менеджмента состоит в том, чтобы за счет маневренности, заложенной при оргпроектировании, обеспечить выживаемость и конкурентоспособность образовательной системы в форс-мажорных обстоятельствах. Вместе с тем маневренность как системное свойство в образовательных учреждениях полезна лишь в стохастических условиях, в детерминированных, стационарных условиях она увеличивает сложность управления, так как связана с неизбежным увеличением числа степеней подвижности (элементов) на том или ином уровне иерархии.

**Сервис.** Прочно вошедшее в русский язык английское слово «сервис» означает бытовое обслуживание населения. В робототехнике выработано несколько количественных оценок качества «обслуживания» роботом рабочего объема «услугами» перемещений и ориентирования объектов манипулирования. Под углом сервиса  $\Psi$  манипулятора понимают телесный угол, внутри которого можно подвести схват в данную точку  $X$  пространства, как это представлено на рис. 3.

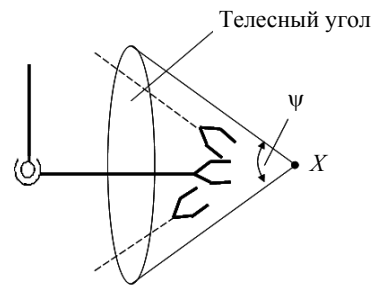


Рис. 3. Иллюстрация понятия «угол сервиса манипулятора»

Под коэффициентом сервиса  $C_x$  понимают отношение этого угла к полному телесному углу, равному  $4\pi$ :

$$C_x = C(X) = \frac{\Psi}{4\pi}. \quad (4)$$

Коэффициент сервиса  $C_x$  меняется от положения схвата  $X$ , и при проектировании манипулятора стремятся к тому, чтобы он был по возможности высоким и постоянным по объему рабочего пространства  $V(x)$ .

Интегральный критерий качества манипулятора по сервису имеет вид

$$K_C = \frac{1}{V(x)} \int_x C(x) dx \quad (5)$$

и представляет собой усредненное значение коэффициента сервиса по всему рабочему объему  $V(x)$ , обслуживаемому роботом. Чем больше значение  $K_C$ , тем лучше спроектирован манипулятор и тем качественнее обслуживание им рабочего объема.

Эти понятия легко распространить и на объекты образовательных систем. Так, качество образовательных услуг вуза на любой из его кафедр (своеобразный коэффициент сервиса) должно быть одинаково высоким, что обеспечивается соответствующим распределением финансовых, кадровых ресурсов, уровнем научных работ, методического обеспечения и т. д.

Каждая кафедра, в свою очередь, должна располагать преподавателями, по возможности в равной мере владеющими как можно более широким набором учебно-воспитательных методик и приемов (также своеобразным углом сервиса), чтобы «подойти» с различных «направлений» к любому обучающемуся для достижения поставленных педагогических целей.

И, наконец, в масштабах образовательной системы необходимо обеспечить хотя бы приблизительно равновысокий уровень образовательных услуг в учреждениях одинакового статуса (школах, колледжах, институтах, университетах) столичных, областных, районных и т. д.

На любом из перечисленных уровней иерархии образовательных систем критерием качества оргпроектирования и менеджмента является приблизительно одинаковый и высокий уровень сервиса (качество учебно-воспитательного процесса) при оказании образовательных услуг.

**Мобильность.** В [2, с. 318] термин «мобильный» (фр. *mobile*, лат. *mobilis*) означает «подвижный», способный к быстрому и скорому передвижению, действию. В робототехнике это понятие существенно расширено и также доведено до четких количественных оценок. Будем изменять с максимально допустимой скоростью поочередно каждую из обобщенных координат  $q_1, q_2, \dots, q_7$  манипулятора (рис. 1). Вполне очевидно, что схват манипулятора будет при этом перемещаться с различными скоростями  $v_1, v_2, \dots, v_7$  в различных направлениях, так что вокруг него образуется своеобразный «ежик» из векторов указанных скоростей. Мобильностью  $M(x)$  называется объем многогранника, образованного концами «ежика» скоростей  $v_i$ , полученного указанным выше образом. Усредняя мобильность по всему рабочему объему  $V(x)$  манипулятора, можно получить следующий интегральный критерий качества манипулятора по мобильности:

$$K_M = \frac{1}{V(x)} \int_x M(x) dx. \quad (6)$$

«Мобильность» – достаточно сложное понятие, характеризующее не только скоростные возможности (в данном случае манипулятора), но и многообразие возможных перемещений. Поэтому рассмотрим более подробно простейший двухзвенный плоский манипулятор на рис. 4.

Как видно из рис. 4а, «ежик» скоростей  $v_1, v_2$  ограничен плоской заштрихованной фигурой, площадь которой  $M(x)$  и является мобильностью плоского двухзвенного манипулятора. Легко показать, что в конфигурациях манипулятора при  $q_2 = 90^\circ$  площадь  $M(x)$ , т. е. мобильность, максимальна.

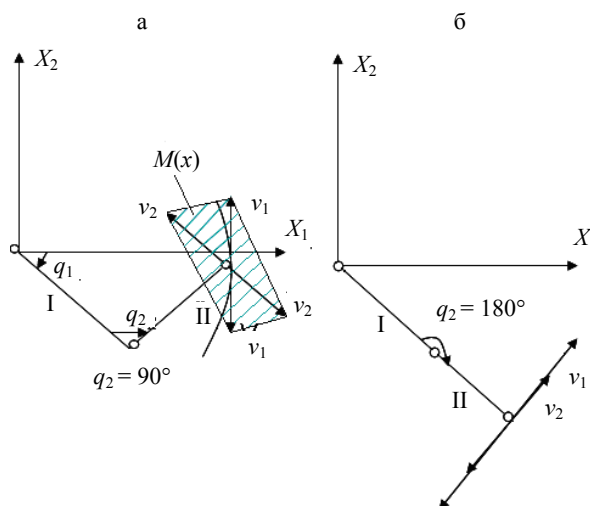


Рис. 4. Иллюстрация понятия «мобильность» двухзвенного манипулятора

Вместе с тем из рис. 4б следует, что при  $q_2 = 180^\circ$  векторы скоростей  $v_1$  и  $v_2$  совпадают по направлению, и следовательно,  $M(x) = 0$ , хотя скорость перемещения схвата при этом максимальна. Здесь уместно напомнить, что характерная поза футбольного вратаря, ожидающего штрафной удар (пенальти), непредсказуемый по направлению и силе, соответствует его максимальной мобильности, так как все его суставы согнуты с углами, близкими к  $90^\circ$ . Этот пример достаточно убедительно показывает, что мобильность любой системы зависит не только от «скоростных» возможностей, т. е. от мобильности составляющих ее элементов, но и от их взаимного расположения (конфигурации) в системе.

На основе приведенных выше положений попытаемся далее обосновать и наполнить неким математическим содержанием понятие «мобильность специалиста», имея в виду, конечно, его профессиональную мобильность, а также другие введенные термины, рассматривая их с позиции кадрового менеджмента.

**Кадровый менеджмент на основе математических знание-деятельностных моделей специалистов.** Воспользуемся математической знание-деятельностной моделью специалиста, предложенной в [4, с. 5–12]:

$$И = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 3_i \cdot \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m D_j}{C_1 + C_2} = \frac{3 \cdot Д}{C_1 + C_2}, \quad (7)$$



этих специалистов в конечном итоге едва ли окупаются.

Вывод вполне очевиден: из специалистов I и II следует создать некую систему. И наименее затратный способ сделать это – организовать инновационный проект и группу по разработке упомянутого нового товара (образовательной технологии) с соответствующей целью, ресурсами, временными ограничениями и т. п.

Пусть на первых порах ответственными за этот проект окажутся лишь двое специалистов. Как оценить их объединенные компетентность и мобильность? Решение этой задачи следует, видимо, искать в рамках модели (7), введя новое понятие «степень идеальности коллектива инновационного проекта»:

$$I_k = (Z_I + Z_{II})(D_I + D_{II}) / (C_1 + C_2) = \\ = (Z_I D_I + Z_{II} D_I + Z_I D_{II} + Z_{II} D_{II}) / (C_1 + C_2). \quad (9)$$

Подставив в (9) наши числовые оценки, получим:

$$I_k = (9 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot 1,5 + 9 \cdot 9 + 1,5 \cdot 9) / (C_1 + C_2) = 110,25 / (C_1 + C_2). \quad (10)$$

Как и следовало ожидать, компонента  $Z_{II} D_I = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25$  балла имеет второй порядок малости, и ею можно пренебречь. Компоненты  $Z_I D_I$  и  $Z_{II} D_{II}$  также малы по сравнению с доминирующей составляющей  $Z_I D_{II}$  и достаточно сомнительны по смыслу из следующих соображений: вряд ли знания «дилетанта» добавляют что-либо новое к знаниям «эрудита», и едва ли «пассивный» добавит что-либо существенное к энергии «активного».

Таким образом, модель (9) предельно упрощается

$$I_k = (Z_I D_{II}) / (C_1 + C_2) = (9 \cdot 9) / (C_1 + C_2), \quad (11)$$

и на рис. 5 это можно отобразить точкой К.

Нетрудно видеть, что знание-деятельностная компетентность коллектива резко, нелинейно (синергетически) возрастает (до 81 балла) по сравнению с суммой компетентностей, не объединенных в коллектив специалистов:

$$Z_I D_I + Z_{II} D_{II} = 9 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot 9 = 27 \text{ баллов.} \quad (12)$$

Оценим далее мобильности специалистов, считая, что векторы  $\dot{Z}_{I,II}$  и  $\dot{D}_{I,II}$  составляют, например, 15 % от векторов  $Z_{I,II}$  и  $D_{I,II}$  соответственно:

$$M_I = 0,15 \dot{Z}_I \cdot 0,15 \dot{D}_I = (0,15 \cdot 9)(0,15 \cdot 1,5) = \\ = 0,3 \text{ балла;}$$

$$M_{II} = 0,15 \dot{Z}_{II} \cdot 0,15 \dot{D}_I = (0,15 \cdot 1,5)(0,15 \cdot 9) = \\ = 0,3 \text{ балла,}$$

а сумма мобильностей этих специалистов (не объединенных в коллектив)

$$M_I + M_{II} = 0,6 \text{ балла.} \quad (13)$$

Согласно модели (7) мобильность коллектива:

$$M_k = (Z_I + Z_{II})(D_I + D_{II}) \quad (14)$$

или, пренебрегая малыми компонентами:

$$M_k = \dot{Z}_I \dot{D}_I = (0,15 \cdot 9)(0,15 \cdot 9) = 1,82 \text{ балла,} \quad (15)$$

что существенно больше суммы (13) мобильностей специалистов, не объединенных в коллектив.

Таким образом, сумма компетентностей специалистов I и II составляет 27 баллов, тогда как их объединение в коллектив (систему) синергетически увеличивает компетентность последнего до 81 балла. Аналогично сумма их мобильностей составила 0,6 балла, а при объединении в коллектив она выросла до 1,82 балла.

Весьма интересно оценить также затраты  $C_2$  работодателя при компетентностном формировании групп для разработки инновационных проектов. В нашем примере очевидно

$$C_2 = K[(Z_I D_I) + (Z_{II} D_{II})] = K \cdot 27, \quad (16)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности между заработной платой и компетентностью специалистов.

Если бы все работы по проекту выполнялись одним высококвалифицированным специалистом, эквивалентным по компетентностям  $Z$  и  $D$  группе из специалистов I и II, то при тех же условиях затраты работодателя составили бы

$$C_2 = K(3Д) = K \cdot 81. \quad (17)$$

Итак, проведенные расчеты даже при предельном уменьшении числа объектов в системе до двух убедительно свидетельствуют о том, что оргпроектирование и кадровый менеджмент на основе математических знание-деятельностных моделей специалистов при их надлежащем подборе в целеустремленных коллективах приводят к парадоксальным увеличениям синергии, мобильности, маневренности и сервиса последних при одновременном и весьма существенном уменьшении затрат на их содержание.

В более сложных коллективах из  $n$  специалистов и  $m$  менеджеров степень идеальности коллектива по сравнению с моделью (11) естественно усложняется и принимает вид:

$$I_k = \frac{\sum_{i=1}^n 3_i \sum_{j=1}^m D_j}{C_2}, \quad (18)$$

где  $3_i$  – знаниевая компетентность  $i$ -го специалиста;  $D_j$  – деятельностная компетентность  $j$ -го менеджера,  $i = I; II; \dots, n$ ,  $j = I; II; \dots, m$ .

### ВЫВОД

Из сказанного выше очевидно, что любой из  $n$  специалистов должен обладать весьма высокими знаниевыми компетентностями, каж-

дый в своей узкой области, набор которых определяется основными компонентами разрабатываемого инновационного проекта (товара, услуги и т. п.), например «системный анализ», «математика», «физика», «программное обеспечение», «микроэлектроника», «дисплейная техника» и т. д. Аналогично каждый менеджер должен обладать высокими деятельностными компетентностями каждый в своей области менеджмента, например «кадровый менеджмент», «связь с общественностью», «реклама», «маркетинг» и т. д. Аксиомой инновационного менеджмента является также обязательное привлечение так называемого «административного ресурса», например в виде общего руководства и заинтересованности первого лица организации в успехе того или иного инновационного проекта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Философский** энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 750 с.
2. **Словарь** иностранных слов. – М.: Русский язык, 1982. – 606 с.
3. **Капица, С. П.** Синергетика и прогнозы будущего / С. П. Капица, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий. – М.: УРСС, 2003. – 280 с.
4. **Михалев, А. С.** Математическая знание-деятельностная модель специалиста / А. С. Михалев // Инновационные образовательные технологии. – 2009. – № 4.

Поступила 06.10. 2010.