

Несистемность – источник критических проблем при проектировании сложных систем

Ю. И. Лобановский

Краткое содержание

В работе на основе различных исторических примеров развития различных сложных технических и организационных систем показано, что пренебрежение основными системными принципами приводило к проблемам, провалам и/или катастрофам при их создании или использовании. Намечена классификация этих основных системных принципов.

I. Введение

В настоящее время на Западе при проектировании сложных систем считается обязательным применение системной инженерии. Современный мировой опыт демонстрирует, что системная инженерия, рассматриваемая как комплексный, мультидисциплинарный подход и методика создания сложных систем, является фундаментом, на котором можно достичь успеха при разработке таких объектов. За последние 40 – 50 лет написано большое количество стандартов, руководств и учебников по системной инженерии, в которых говорится о значительном эффекте от использования таких подходов. Подобные утверждения, обычно, доказываются статистическими данными, см., например, рис. 1, на котором сопоставляется уровень затрат на системную инженерию в различных проектах NASA с величиной превышения бюджета этих проектов [1]. Результаты, представленные на этом рисунке, указывают на наличие явной корреляции – чем больше доля затрат на системную инженерию, тем меньше превышение бюджета проектов над запланированным, что свидетельствует о важности выделения ресурсов на системную инженерию.

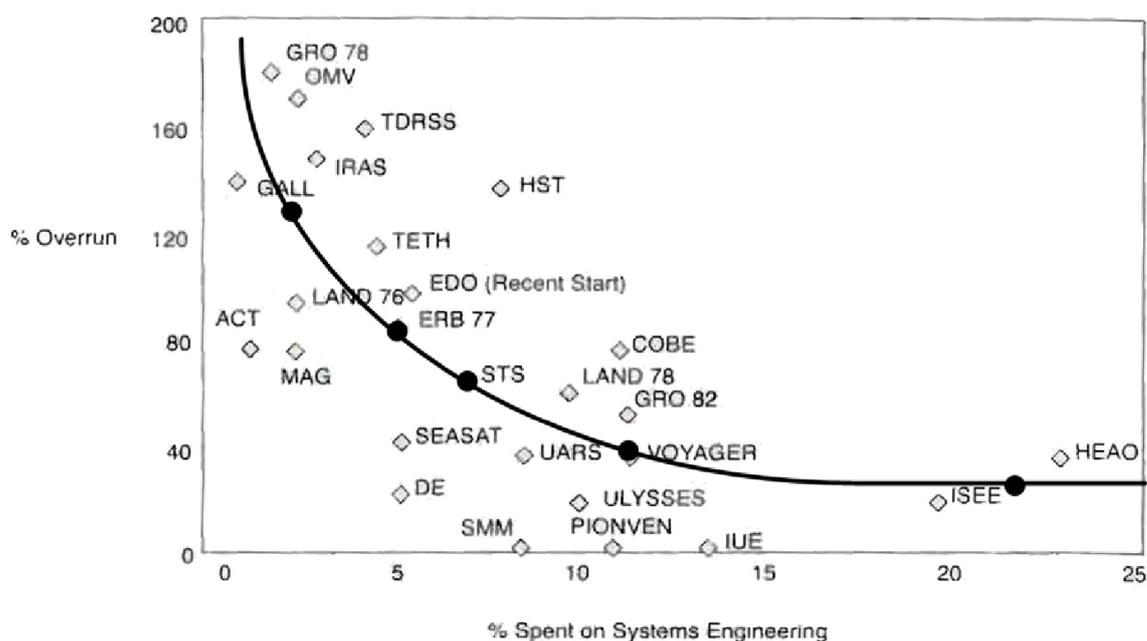


Рис. 1 – Данные NASA по связи затрат на системную инженерию с величиной превышения бюджета проекта

Однако, более показательными, чем такие количественные статистические данные, могли бы быть качественные примеры того, как использование или пренебрежение основными системными принципами приводило к успехам или провалам при создании сложных систем. Однако, во всех известных руководствах и учебниках такого рода подобные примеры практически отсутствуют, за исключением описания целенаправленного применения системного подхода при разработке американской пилотируемой программы полета на Луну, когда, собственно, и возникла системная инженерия в ее современном понимании как некая совокупность явно сформулированных практик, опирающихся на базовые научные принципы [2].

При этом следует отметить, что именно провалы, зачастую приводившие к крупным («историческим») катастрофам, являются наиболее интересными с системной точки зрения, ведь, как известно, «у победы много отцов, а поражение всегда остается сиротой». Так получается из-за того, что прошлые успехи могут быть объяснены по-разному, например, глубоким интуитивным пониманием проблем, возникших при создании системы, опорой на длительный опыт предшественников или просто удачей, но неуспехи и

провалы на первый взгляд потенциально вполне успешных проектов практически однозначно, как показывает анализ, были вызваны именно отсутствием системного подхода при их разработке и продвижении.

II. Советские фронтовые истребители Второй мировой войны

В качестве первого примера рассмотрим, как не учитываемые конструкторами надсистемные факторы сыграли решающую роль в столь различных судьбах трех близких по конструкции и уровню совершенства советских самолетов-истребителей, созданных непосредственно перед началом Великой отечественной войны.

В 1939 году сразу после окончания Испанской войны И. Сталиным было принято решение поставить перед несколькими конструкторскими бюро задачу создать новый советский истребитель. Это было вызвано тем, что стоявший тогда на вооружении Военно-воздушных сил Советского Союза истребитель ОКБ Поликарпова И-16, как показал опыт воздушных боев в Испании, не мог противостоять последней на тот момент модели немецкого истребителя Мессершмитт Вф-109С, а новый самолет этого конструкторского бюро И-180 не имел надежно отработанного двигателя и увяз в бесконечных доводках конструкции. Уже в следующем, 1940 году победителями конкурса были объявлены сразу 3 самолета: МиГ-1 (после небольшой доработки получивший обозначение МиГ-3), Як-1 и ЛаГГ-1 (ЛаГГ-3). Все они концептуально были очень похожи – скоростные, маневренные одномоторные низкопланы с двигателями водяного охлаждения и пушечно-пулеметным вооружением. Таким образом, они в целом повторяли конструкцию Вф-109, который де-факто стал образцом фронтового истребителя начала Второй мировой войны для многих стран от Японии (Зеро) на Востоке до США (Томагавк, Мустанг и, отчасти, Аэрокобра) на Западе.

По формальным признакам из этой тройки наилучшими характеристиками обладал самолет МиГ-3 с его самой большой скоростью и наибольшей высотой полета. Он был несколько тяжелее конкурентов, и на нем был установлен несколько более мощный двигатель – АМ-35 с турбонагнетателем, в то время как на более легких машинах Як-1 и ЛаГГ-3 использовался двигатель М-105 без дополнительных агрегатов. Предполагалось, что МиГ-3 будет господствовать вследствие превосходства в скорости над истребителями противника на средних и больших высотах, на которых ожидалось основные воздушные бои, а два остальных более дешевых типа машин будут внизу добивать уже деморализованного противника.

Наглядным подтверждением уверенности советских верхов в превосходстве истребителя МиГ-3 над истребителями будущего противника является следующая история: в апреле 1941 года делегация, руководимая военно-воздушным атташе в нашей стране полковником Г. Ашенбреннером, посетила авиазавод N 1 в Москве, который был одним из крупнейших советских авиазаводов и строил тогда в больших количествах самолет МиГ-3. «Потом немецких специалистов повезли на два аэродрома, где на линейке стояли новенькие длинноносые истребители. Офицеры люфтваффе и работники аппарата германского министерства авиапромышленности не до конца поверили, что их ознакомили с истинным оснащением советских ВВС, но самолет произвел на них сильное впечатление. Они хорошо знали, что дававший им пояснения главный конструктор завода N 1 Артём Микоян был братом наркома торговли и заместителя председателя СНК Анастаса Микояна, поэтому предупреждение, которое он сделал, было процитировано Ашенбреннером дословно в отчете Генеральному штабу люфтваффе: «Мы сейчас показали вам, что мы имеем и чем занимаемся, и тот, кто попытается напасть на нас, будет уничтожен!» [3].

Однако спустя менее чем через 3 месяца после этого гордого заявления конструктора, война сразу же поставила крест на всех кабинетных умозрительных построениях. Самолеты Люфтваффе, чьим основным истребителем уже была на тот момент более скоростная модель Вф-109Е (Эмиль), и во все более широких масштабах вводилась еще более новая и мощная – Вф-109F (Фридрих), завоевали господство в воздухе в первые же часы войны. Так как основные усилия авиации были направлены на поддержку сухопутных войск, воздушные бои велись преимущественно на малых и средних высотах, где потенциально высокие характеристики истребителя МиГ-3 не могли проявиться, и где он практически во всем уступал «Эмилю», не говоря уже о «Фридрихе», как и все другие советские истребители того времени. К тому же, МиГ-3 конкурировал со штурмовиком Ил-2, роль которого в реальной войне оказалась значительно более важной, чем планировалось до нее, за применявшиеся на обоих типах машин двигатели АМ-35/АМ-38, которые были клонами одной и той же конструкции и делались на одних и тех же производственных линиях. В связи со всем этим производство наиболее совершенного советского истребителя начала войны вскоре прекратилось, и он перестал играть какую-либо заметную роль в этой войне.

Аналогичная судьба должна была вскоре постичь и ЛаГГ-3, несколько менее маневренный, чем Як-1, и его упрощенный, частично деревянный клон военного времени Як-7, так как особенностью истребителя ЛаГГ-3 было использование в конструкции вместо алюминия так называемой дельта-древесины – пропитанного полимерной смолой и сильно спрессованного дерева. Это, по замыслу его конструкторов,

давало самолету дополнительные преимущества в условиях дефицита алюминия, которого не хватало на все советские авиационные проекты. Однако это же привело к утяжелению его конструкции и снижению маневренных характеристик по сравнению с примерно аналогичным самолетом Як-1, да и дельта-древесина в ходе войны оказалась как бы еще не более дефицитна, чем алюминий, из-за прекращения с началом войны импортных поставок синтетических смол, необходимых для ее производства.

В конце 1941 года уже было подготовлено решение об остановке массового производства истребителей ЛаГГ-3 на Горьковском авиазаводе, и тут один из триумвирата его конструкторов – Лавочкин, принял решение заменить на этом самолете двигатель водяного охлаждения М-105 на двигатель воздушного охлаждения М-82. Это приводило к значительному росту лобового сопротивления самолета, что, однако, компенсировалось ростом мощности двигателя.

Но самым главным было то, что в стране в этот момент образовался значительный запас этих никем не востребованных двигателей, который первоначально планировалось ставить на массовую серию легких одномоторных бомбардировщиков Су-2. Однако, изменение характера войны оставило не у дел эти самолеты, которые могли эффективно действовать только в условиях господства в воздухе советской авиации, и их производство было прекращено. При этом двигатели для них в больших количествах уже были произведены. И в кратчайшие сроки ОКБ Лавочкина перепроектировало свой истребитель на двигатель другого типа и выпустило его под обозначением Ла-5. В таком виде он не уступал истребителям ОКБ Яковлева, и, вдобавок обеспечивал использование запаса никому тогда не нужных двигателей М-82. А после форсирования этого двигателя и замены дерева в конструкции самолета на алюминий была создана модель Ла-7, которую многие историки считают лучшим советским истребителем Второй мировой войны, несколько превосходящим (как и Як-3) немецкие истребители конца войны.

Из рассмотрения этой нетривиальной истории с системных позиций следует, что на этапе анализа требований (см., например, [2]) к советской истребительной авиации в 1939 году была допущена принципиальная ошибка, когда нужды ВВС выявлялись на основе умозрительных представлений о грядущей войне как о наступательной с самого начала. Кроме того, не было учтено, что основные действия фронтовой авиации связаны с поддержкой сухопутных войск, и поэтому, они должны проводиться на малых и средних высотах, и именно там следует добиваться наилучших характеристик самолетов-истребителей.

Можно полагать, что только известная непоследовательность решений (принятие на вооружение одновременно трех типов истребителей) и ранее непредвиденные случайности (отказ от массового производства слабо защищенных легких бомбардировщиков Су-2) довольно быстро привели к возникновению в середине войны близкой к оптимальной структуры советской истребительной авиации, состоящей в основном (не считая некоторого количества американских и английских самолетов) из двух типов машин: более легких и маневренных самолетов Як (Як-9, Як-3) с двигателями водяного охлаждения, и более мощных и скоростных самолетов Ла (Ла-5ФН, Ла-7) с двигателями воздушного охлаждения. А истребители МиГ остались в истории первого года войны (см. рис. 2). Интересно отметить, что к подобной структуре пришла и фронтовая истребительная авиация Люфтваффе, состоявшая на тот период из самолетов Vf-109F/G и FW-190 различных модификаций.



Рис. 2 – Присвоение зимой 1942 года гвардейского звания полку, вооруженному истребителями МиГ-3

Таким образом, не проработанность на надсистемном уровне решения, одного из важнейших для ближайшего будущего страны, привела к тому, что только к середине войны после многочисленных проб и ошибок возникла отвечающая реалиям войны структура советской истребительной авиации, для чего потребовалось принести немало лишних жертв и ресурсных затрат в условиях предельного перенапряжения всех сил.

III. Лунная гонка

К наиболее ярким примерам необходимости системного подхода при осуществлении особо сложных проектов являются итоги трех космических программ, в которых создавались средства доставки человека на Луну, две из которых велись параллельно в рамках так называемой Лунной гонки. Именно американская программа «Аполлон» стала первым примером осознанного и целенаправленного применения системного подхода в современном его понимании. Выполнение этой программы позволило доставить на поверхность Луны и успешно вернуть на Землю 12 американских астронавтов. И все это произошло в первые 12 – 15 лет космической эры! При этом все запуски крупнейшей по сей день ракеты-носителя Сатурн-5 (см. рис. 3), выведившей корабль «Аполлон» на траекторию полета к Луне, а также запуски всех ракет меньшего масштаба, на которых отработывались отдельные ступени лунной ракеты и модули лунного корабля, оказались успешными [4]. Это было тогда беспрецедентным показателем, особенно, если вспомнить, насколько частыми были аварии ракет-носителей еще за десяток лет до этого.



Рис. 3 – Старт ракеты Сатурн-5

Теоретическое осмысление реализованных в этой программе процессов управления разработками и конструированием стало одной из основ новой инженерной дисциплины – системной инженерии [4, 5]. Для ее успешной реализации в качестве ключевых понадобились четыре зрелых системных технологии – тяжелая ракета-носитель, корабль для перемещения в космическом пространстве, система траекторного анализа и измерений и система связи [5]. Было построено несколько уникальных стендов для отработки отдельных подсистем и модулей этой ракетно-космической системы: от циклопического стенда наземных испытаний двигательной установки первой ступени ракеты Сатурн-5 в сборе до летающего стенда для моделирования посадки лунного модуля корабля «Аполлон» на поверхность нашего естественного спутника.

Нельзя сказать, что реализация всей этой грандиозной программы обошлась совсем без аварий: за 2,5 года до высадки человека на Луне сгорел на Земле экипаж первого пилотируемого корабля «Аполлон-1», разбился летающий стенд – аналог лунного модуля, при одном из стартов произошел отказ одного из пяти двигателей первой ступени ракеты-носителя Сатурн-5, что было компенсировано более продолжительной работой остальных четырех двигателей, в четвертой лунной экспедиции на траектории полета к Луне произошел взрыв кислородного бачка энергосистемы основного модуля корабля, и экипаж смог вернуться на Землю после облета Луны, используя только ресурсы лунного модуля. Таким образом, происходили отказы отдельных подсистем, которые приводили к авариям, но никогда (исключая пожар при наземных тестовых испытаниях «Аполлона-1») – к катастрофическим последствиям. Да и в последнем случае кардинальная переработка интерьера командного модуля корабля для исключения использования горючих в его чисто кислородной атмосфере материалов в дальнейшем полностью устранила какие-либо проблемы такого рода. Так что созданная в этой программе инженерная система оказалась в целом очень устойчивой, обеспечившей 6 успешных высадок человека на Луну, см. рис. 4.

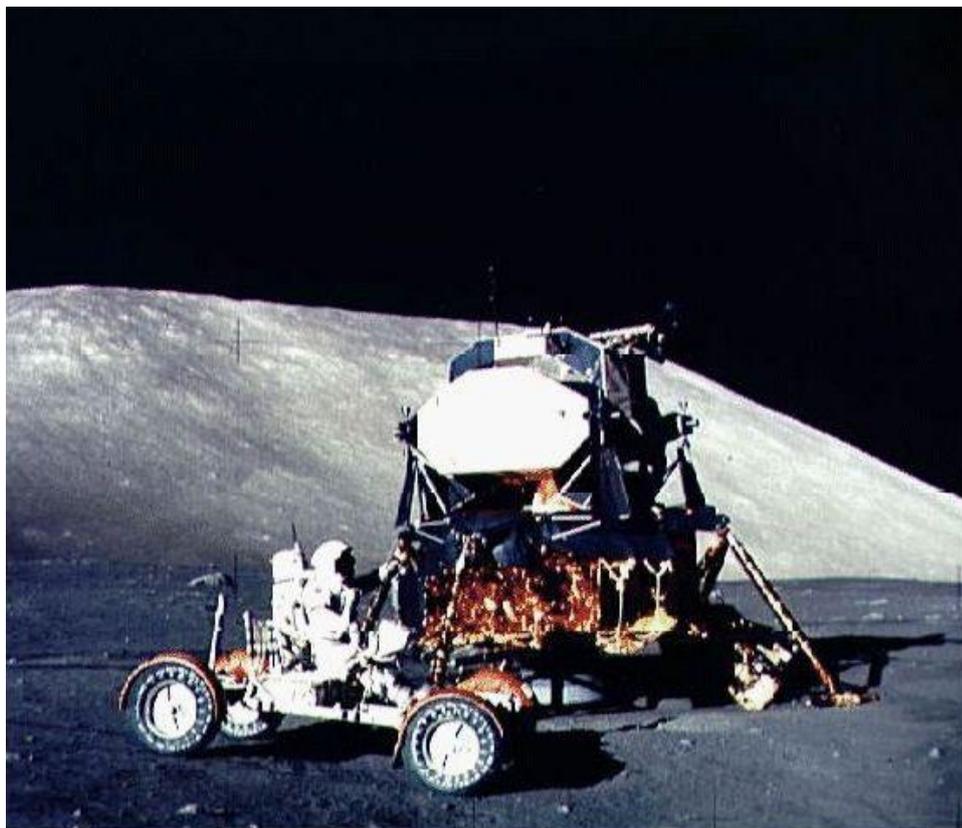


Рис. 4 – На Луне

В то же время, аналогичная советская программа, при реализации которой системный подход не применялся столь же строго и последовательно, завершилась после четырех подряд взрывов ракет-носителей Н1 на начальных этапах полета (см. рис. 5). В значительной степени это было связано с использованием в Советском Союзе применявшейся до этого практики отработки ракетно-космических систем в полете путем их «отстрела» без максимально возможной наземной отработки их подсистем. Это делалось для того, чтобы сэкономить на наземных стендах и на сроках выполнения программ. Однако в реальности это, обычно, приводило к перерасходу средств, затягиванию сроков, а иногда, как в пилотируемой лунной программе – к ее прекращению. Раньше часто бывало, что подобный подход позволял опередить американских соперников. Например, первая посадка советской автоматической станции на Луну

произошла раньше, чем американской, несмотря на то, что это произошло при тринадцатой (!) (и первой успешной) попытке запуска аппарата по данной программе [6]. Но, чем сложнее и дороже становились проекты, тем больше проблем возникало при их реализации при пренебрежении или недостаточном внимании к методам системной инженерии.



Рис. 5 – Взрыв ракеты-носителя Н1 при втором пуске после нештатного разворота по крену

Более того, попытка Соединенных Штатов «вернуться на Луну» в программе «Созвездие» спустя несколько десятилетий после завершения программы «Аполлон», уже в начале XXI века, в максимальной степени используя уже готовый задел, полученный за предыдущие годы, также закончилась ничем [7]. Конечно, можно сослаться на то, что это произошло, в первую очередь, по политическим причинам, однако эти причины вдруг стали выявляться по мере накопления внутренних проблем в новой программе полета на Луну, а они, в свою очередь, в немалой степени возникли из-за того, что принципы системного подхода в ней были в значительной мере нарушены тем, что часто создавалось не то, что должно, а модифицировалось и подгонялось то, что было.

IV. Саянская катастрофа

Утром 17 августа 2009 года, в 8 часов 13 минут по местному времени, второй гидроагрегат крупнейшей в России Саяно-Шушенской ГЭС массой около двух тысяч тонн напором воды был выброшен из турбинной шахты вверх на полтора десятка метров. Из открывшегося отверстия шахты мощный поток воды хлынул в машинный зал станции, убивая людей, сметая оборудование, разрушая стены и потолок зала вокруг этого агрегата и затопивая остальные 9 агрегатов, что, в свою очередь выводило их на нерасчетные режимы работы и саморазрушение (см. рис. 6). После того как только через час вручную (из-за потери питания для внутренних нужд) удалось закрыть затворы в водоводах гидроагрегатов станции, уровень воды в машинном зале стабилизировался, но до открытия водосброса существовала угроза перелива воды через плотину. Откачать воду из машинного зала удалось через неделю, а полностью отремонтировать станцию с заменой всех 10 агрегатов – более чем через 5 лет. В этой катастрофе погибло 75 сотрудников гидроэлектростанции, общие затраты на ремонт и потери от прекращения производства электроэнергии составили, по оценкам, порядка 3 миллиардов долларов.



Рис. 6 – Машинный зал Саяно-Шушенской ГЭС после катастрофы

Сколько-нибудь правдивая и, одновременно, достаточно полная и связная картина этого и последующих за ним событий практически осталась мало кому известной. Поэтому автор данной работы, который благодаря случайности или волею судьбы, не запутавшись, коснулся паутины из нитей, связавших основные события, последовавшие за катастрофой, видимо, должен вкратце описать то, что произошло, иначе может оказаться не вполне понятным, какое отношение все это могло иметь к системной инженерии.



Рис. 7 – Саяно-Шушенская ГЭС до катастрофы

Руководству станции и компании «РусГидро», которой эта станция принадлежала, ведущим представителям отраслевой и академической науки, экспертам Ростехнадзора и комиссии Госдумы РФ, созванной в связи с катастрофой, причина произошедшего осталась совершенно непонятной. Некоторое время официальные лица с несколько потрясенным видом говорили о том, что на станции (см. рис. 7) произошло что-то беспрецедентное, противоречащее всем законам природы.

После многих шараханий и довольно ожесточенной внутренней грызни, сопровождавшейся проведением совещаний, симпозиумов, «международных» конференций, заказных публикаций в отраслевом журнале и снятия некоторых статей из него непосредственно перед выходом в печать (с угрозами выхода членов редколлегии этого журнала из ее состава), а также лихорадочной деятельностью в Интернете, гидроэнергетический истеблишмент в итоге пришел как бы к официальному консенсусу: гидроагрегат взлетел, потому что оторвалась турбинная крышка, которая закрывала турбинную шахту и к которой были прикреплены все взлетевшие части гидроагрегата, а турбинная крышка оторвалась потому, что разрушились 80 стальных крепежных шпилек, запас прочности которых в 5 с лишним раз превышал расчетные нагрузки на крышку от действия на нее потока воды. Причины разрушения шпилек выяснены не были – были только достаточно смутные намеки на их усталость, хотя квалифицированные авиационные инженеры, занимающиеся усталостной прочностью, к которым с фотографиями изломов этих шпилек обратился автор данной работы, усталости там не нашли, а определили места разрушений как результат форсированного циклического разрушения, то есть очень быстрого (за несколько секунд) роста трещин в шпильках под действием циклических нагрузок, достаточных для их разрушения [8].

Более того, большинство этих ведущих представителей и экспертов не заинтересовал тот факт, что катастрофа произошла после серьезной модернизации второго гидроагрегата. Не заинтересовало их (скорее всего, по незнанию) также то, что шестой гидроагрегат, менее всех пострадавший в катастрофе из-за того, что он в тот момент стоял (его готовили к пуску 18 (!) августа после аналогичной модернизации), был запущен во временную эксплуатацию в феврале 2010 года и при приемочных испытаниях сразу же стал демонстрировать аналогичные проявления неустойчивости работы. Его удалось остановить без катастрофического взлета, но в крепежном фланце его турбинной крышки, к которому она была присоединена уже с помощью усиленных шпилек, возникли трещины, вскоре выросшие до такого состояния, что протечки воды через них не позволили проводить дальнейшую его эксплуатацию. Руководство компании «РусГидро» постаралось эти факты не афишировать, а шестой гидроагрегат был резко продвинут вперед в очереди на замену, хотя до этого инцидента он был в этой очереди предпоследним, непосредственно перед полностью разрушенным во время катастрофы вторым. Вскоре старый агрегат разобрали, установив в его шахте новый шестой агрегат, по принципу: «С глаз долой – из сердца вон» [9]. Некоторые из ведущих представителей, которых все-таки что-то заинтересовало в истории этой катастрофы, вдруг вскоре убедились, что имеют довольно слабое сердце, не способствующее продолжению проявления активности на этом направлении, а кто-то из них внезапно даже оказался в совете директоров компании «РусГидро» и оставался там, пока общественная активность по поводу катастрофы еще не затихла. После этого их интерес к случившемуся резко угас.

Проще всех поступили следственные органы – в результате трехлетней работы и создания дела из 1213 томов (видимо, абсолютный рекорд по объему дела) они квалифицировали произошедшее как результат халатности персонала станции, причем смогли подобрать нужную статью Уголовного кодекса РФ только после полугодовой борьбы с прокуратурой. Но, в итоге обе эти инстанции согласились, что была проявлена халатность при проведении горных (!), строительных (!) и иных работ (наконец-то определение деятельности гидроэнергетиков было найдено – иные работы), с чем согласился, в итоге, и суд. В числе подсудимых оказались 6 руководителей Саяно-Шушенской ГЭС и ведущий инженер лаборатории вибрационной диагностики, которому инкриминировали то, что он не обращал внимания на явно ошибочные показания некоторых датчиков вибрации, стоявших на втором гидроагрегате (они зашкаливали, даже когда агрегат был выключен).

Впрочем, четверым из них дали не самые большие сроки по этой статье, одного – амнистировали, а инженер и один из руководителей получили условные сроки [10], а потом они также были амнистированы [11]. Таким образом, и волки оказались сыты, и овцы целы. В поселке гидроэнергетиков Саяно-Шушенской ГЭС Черемушки были проявления возмущения исходом суда, вылившиеся в итоге в петицию президенту России, подписанную двумя тысячами человек, то есть подавляющим взрослым большинством населения поселка, но президент на петицию никак не отреагировал [12]. Поэтому вскоре все завершилось наилучшим образом, то есть новой петицией с просьбой наградить за произошедшее руководство компании «РусГидро», а также некоторых других выдающихся представителей высших сфер как причастных, так и не причастных к катастрофе [13]. Впрочем, и эта петиция также не имела последствий.

Казалось бы, какое отношение к системной инженерии имеет эта довольно занимательная, но несколько печальная история? Достаточно скоро после катастрофы, на совещании в «РусГидро» от 1 июля 2010 года, посвященном рассмотрению точки зрения автора данной статьи на ее причины, стало понятно, что отношение имеется и даже не косвенное, а вполне прямое. Выяснилось, что в напорной системе второго гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС, состоящей из водовода и самого турбоагрегата, возникли автоколебания, быстрый рост которых за 3 – 4 секунды и привел в отрыву турбинной крышки.

Автоколебания возникают, когда в колебательной системе имеется положительная обратная связь, закачивающая в систему энергию из внешней среды. В результате, колебательная система может перейти или в режим постоянной генерации незатухающих колебаний, когда приход и расход энергии становятся равными (как, например, в любых механических или электронных часах), или амплитуда колебаний будет расти до тех пор, пока колебательная система не разрушится (как, например, при флаттере крыла самолета или моста). Было показано, что в напорной системе положительная обратная связь возникает, когда коэффициент полезного действия турбины падает с ростом ее мощности [14, 15]. В этом случае происходит быстрый рост энергии, остающейся в потоке воды за турбиной, которая и подпитывает колебания этого потока.

Гидроэнергетикам хорошо известно, что на рабочей характеристике радиально-осевых турбин, применяющихся на Саяно-Шушенской ГЭС, имеются две зоны, в которых это условие выполняется. Для запуска автоколебаний необходим как бы «внешний» источник, и таковой в потоке имеется – это затурбинный вихрь (см. рис. 8), который проявляется как ясно видимый жгут в потоке воды и который на некоторых нерасчетных режимах работы турбины весьма интенсивен.



Рис. 8 – Затурбинный вихревой жгут

Как показали исследования этого и других подобных инцидентов [15, 16], если частота колебания вихря (параметр, определяемый скоростью вращения турбины) близка к одной из 2 – 3 первых мод собственной частоты колебаний напорной системы гидроэлектростанции (параметра, связанного, с геометрией водовода и эффективностью турбины) или приблизительно кратна им (при малых отношениях кратности – максимум 2 – 3), то при достаточной интенсивности возбуждающих вихревых колебаний процесс автоколебаний в системе может возникнуть самопроизвольно. Следует отметить, что после вылета второго гидроагрегата из турбинной шахты и обратного падения туда его остатков, его водовод не был полностью разрушен. Поэтому, самопроизвольно перестроившая свою структуру напорная система (открыв дополнительный выход воды через турбинную шахту) перешла в режим генерации колебаний, которые визуально наблюдались в течение часа по вздымавшемуся над открытой шахтой и опадавшему фонтану воды, до тех пор, пока не был закрыт верхний затвор этого водовода.

Более тонкие детали этого процесса вряд ли целесообразно рассматривать в данной работе по системной инженерии. Однако из уже сказанного следует простая мысль: тщательно отработанные разнообразными расчетными и экспериментальными методами гидравлические турбины с направляющим аппаратом – управляемыми лопатками в трубной спирали, огибающей турбину, и водоводы – трубы большого диаметра, по которой к ней поступает вода, при всем своем совершенстве не гарантируют, что будет нормально работать напорная система – то есть вся совокупность указанных объектов, так как полноценное взаимодействие этих подсистем между собой, по существу, никем и никак не рассматривается.

Это означает, что принятая в гидроэнергетике схема, по которой турбины (вместе с направляющими аппаратами), электрогенераторы и водоводы разрабатывают различные люди, и более того, различные организации и компании, и нет никого, кто бы рассматривал эту, весьма энергонапряженную, систему в целом, в отдельных случаях приводит к серьезным проблемам, а время от времени – к крупным авариям, а иногда, и катастрофам, из которых Саянская катастрофа просто оказалась крупнейшей и наиболее известной. Таким образом, было показано, что пренебрежение системными принципами чревато не только в авиационной или ракетной технике с их сравнительно малыми запасами по всем критическим параметрам, но и в таких, казалось бы, потенциально значительно более благополучных с этой точки зрения областях как энергетическое машиностроение и гидростроительство, где запасы на нерасчетность поведения системы могут быть в разы больше. Однако при отсутствии системности рассмотрения объектов этого может не хватить и там.

В системной инженерии и теории систем возникновение новых свойств системы, отсутствующих у отдельных ее элементов, принято называть эмерджентностью [2]. Один из основателей современной теории систем Л. фон Берталанфи считал, что эмерджентность является основной системной проблемой [17], и Саянская катастрофа, к несчастью, оказалась хорошей иллюстрацией к правильности этого мнения. Похожие мысли высказывал и С. П. Королёв относительно того, как возникают самые трудные проблемы при создании изделий возглавляемого им ОКБ. Следует отметить, что на внедрение системной инженерии для правильного проектирования гидроэлектростанций потребовалось бы ресурсов на порядки меньше, чем их было затрачено на восстановление одной только Саяно-Шушенской ГЭС, а также на сокрытие причин произошедшей с ней катастрофы.

V. Македонская фаланга и римский легион

В продолжение этого небольшого исследования по системной инженерии рассмотрим случай, когда сценарий использования системы кардинальным образом влияет на ее эффективность. В данном случае рассматриваемая система не является чисто технической, так как для ее эффективного функционирования необходима реализация определенных как технических, так и общественно-политических и морально-этических практик. Речь идет о македонской фаланге, которая в течение, по крайней мере, полутора веков являлась, в некотором роде, «абсолютным оружием». А потом, в одночасье, все кардинально изменилось.

Хотя в своем окончательном, классическом виде, фаланга – это продукт Македонского царства (варварской окраины классической Эллады) во время и после царствования Филиппа II, отца божественного Александра, длительный генезис ее более ранних форм происходил в Греции. Вполне основательно полагать, что именно там впервые возникли гоплиты – тяжеловооруженные воины в доспехах и со щитами, которые, используя против врага копья и мечи, были способны стоять плечом к плечу в бою и держать строй. А воины в регулярном боевом строю имели явное преимущество перед пусть и агрессивным, но хуже организованным противником. Прорвать строй удавалось далеко не всем – обычно таким же, но, видимо, более мотивированным гоплитам. Перед мысленным взором читателя, конечно, тут же должны возникнуть спартанцы, но близкими по духу были гоплиты и десятков других греческих полисов.

Так как сражаться подобным образом с психологической точки зрения было весьма непростым делом, для сплочения рядов использовались специальные морально-этические практики. Например, известный «священный отряд» гоплитов – основная ударная сила одного из крупнейших городов Эллады – Фив, численностью в триста человек, полностью состоял из бойцов, находившихся в гомосексуальных связях друг с другом. Это их сплачивало и позволяло надеяться, что никто из них не побежит с поля боя, бросив любовника. И действительно, в битве при Платеях, как гласит легенда, весь этот отряд до единого человека полег под ударами превосходящих сил македонцев Филиппа II [18], подобно тремстам спартанцам царя Леонида, покрывшим себя неуязвимой славой в легендарном сражении при Фермопилах с огромной персидской армией за полтора века до Платей.

Рассматриваемая боевая структура достигла своего логического завершения, когда выдающийся системный инженер древности царь Филипп II создал македонскую фалангу. Она представляла собой сомкнутый строй до 32 линий, состоящих из воинов, обычно, в простейших доспехах (вплоть до толстых льняных рубашек), вооруженных копьями, щитами и, иногда, легкими мечами. Первые 5 линий выставляли

копья вперед по фронту фаланги, а остальные держали их вертикально. Они обеспечивали устойчивость всего соединения, не давая отступать тем, кто были впереди, и были готовы в случае необходимости заменить их. Общее число воинов фаланги было порядка 10 тысяч человек и более. Щиты, надетые на плечи воинов, прикрывали от противника ее фронт [19].

Длинные копья (сариссы) были основным оружием этой боевой системы, воины их держали обеими руками. Как писали некоторые современники, копья в каждой из первых 5 линий могли иметь определенную длину – от довольно коротких сарисс первой линии до шестиметровых – последней, пятой, так что наконечники всех этих сарисс находились примерно на одном расстоянии от фронта фаланги, создавая, таким образом, перед противником небывалую ранее концентрацию острого и смертельно опасного железа. Но и при одинаковой длине копий фаланга была почти так же опасна (см. рис. 9).

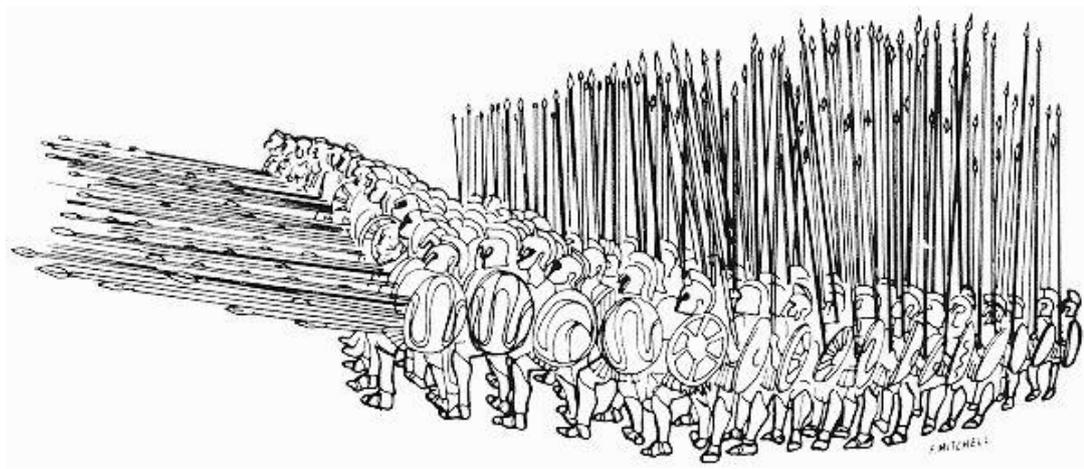


Рис. 9 – Македонская фаланга

Тренировки позволяли добиваться того, чтобы фаланга на поле боя двигалась, сохраняя строй и интервалы между линиями. Была разработана процедура замены погибших и раненых бойцов первой линии, во время которой выбывшего заменял воин из следующей линии, хотя, судя по всему, это происходило не слишком часто. Движущаяся вперед, оцетинившаяся копьями и закрытая щитами и доспехами стена обычно просто сметала любого врага. Уязвимые фланги этого построения защищались конницей и подвижными отрядами легковооруженных воинов. Мечи бойцами фаланги (если они у них были) должны были использоваться только в крайнем случае, если что-то пойдет не так, как планировалось. Во время расцвета Македонии конница, обычно, охватывала противника с флангов и тыла и прижимала его к фаланге, и они вместе действовали подобно молоту и наковальне. В конце эпохи своего существования фаланга обычно наступала на врага самостоятельно без поддержки конницы.

Такая боевая система, состоявшая из явно видимых подсистем – боевых линий, отличавшихся выполняемыми функциями, часто реализуемыми с помощью различных технических средств (объектов конфигурации на языке системной инженерии), господствовала на полях сражений более полутора сотен лет (примерно с середины IV века до н. э. вплоть до первой четверти II века до н. э.). Под командованием Александра Македонского фаланга прошла через всю огромную территорию бывшей до того великой державы древности – Персидской империи. Только ненужность новых завоеваний к востоку от Персии, которой с избытком хватало для горстки пришельцев с запада, остановило дальнейшее продвижение греко-македонцев. Даже победоносные римские легионы, встретившиеся с македонской фалангой в самом конце III века до н. э. дважды были вынуждены безоговорочно уступить ей поле боя. При этом следует отметить, что сложность и стоимость вооружения бойца фаланги были значительно ниже, чем у типичного снаряжения классического гоплита или римского легионера, благодаря чему сравнительно небольшое и бедное варварское государство смогло покорить Грецию и Персию – значительно более развитые и богатые страны.

В отличие от единого сомкнутого строя фаланги римский легион того времени имел расчлененный строй из отдельных сравнительно небольших соединений – манипул, состоящих, из 60 – 120 воинов. Эти манипулы располагались на некотором расстоянии друг друга в шахматном порядке и имели определенную свободу перемещения, так что командиры могли ими сравнительно легко манипулировать. При этом сами манипулы имели сомкнутый строй и должны были перемещаться как единое целое. Легионеры были вооружены метательными пилумами – короткими копьями (дротиками) с длинным железным наконечником, который невозможно было перерубить врагу, мечами средней длины – гладисами, прямоугольными щитами, из которых легко было составить сплошную линию прикрытия, и доспехами.

Численно легион составлял примерно от половины до четверти фаланги, причем в крупных боестолкновениях римляне, обычно, использовали несколько легионов, что также позволяло более гибко управлять войсками [20].

Несмотря на весь свой боевой опыт, воинское искусство, легендарную римскую стойкость и продуманное и отработанное вооружение, в первых двух столкновениях с македонской фалангой римские легионы не смогли ей ничего противопоставить и сражения Первой греко-римской войны проиграли. Спустя четверть века, когда началась Вторая греко-римская война, римские войска снова высадились на территории Греции и под городом Киноскефалы вновь встретились с македонской фалангой. И опять фаланга перешла в наступление, и снова легионы стали отступать – еще немного и они просто побежали бы с поля боя. Однако, сражение происходило на холмистой местности, при быстром продвижении вперед строй фаланги нарушился, и она стала уязвимой. В разрывы фронта ворвались только что отступавшие легионеры, устроив своими гладисами, явно превосходящими очень короткие мечи воинов фаланги (скорее, кинжалы, совершенно неэффективные против доспехов римлян), настоящую резню. Практически вся фаланга была вырезана. Такого разгрома войска Македонии не испытывали никогда.

История повторилась спустя три десятка лет во время Третьей греко-римской войны. Снова в предгорьях у местечка Пидна македонская фаланга, обходя естественные препятствия – крупные валуны, вынуждена была нарушить строй. И опять она подверглась полному разгрому и была вырезана после первоначального успешного наступления. После этой битвы война завершилась политической катастрофой эллинской государственности – Македония и вся Греция стали провинциями Рима, а фаланга больше никогда не появилась на полях сражений. Отсюда можно сделать вывод, что римские полководцы, исполнявшие роли системных инженеров, в этом последнем качестве явно превосходили македонских, которые оказались бездумными эпигонами своего великого предка.

Таким образом, великолепно отлаженная система оказалась совершенно непригодной при смене сценария ее использования. Поэтому системные инженеры должны рассматривать все возможные сценарии использования проектируемых ими систем, так как даже единственный возможный, но неучтенный сценарий, может оказаться фатальным.

VI. Линкоры и истребители 5-го поколения

Можно отметить, что в положении, аналогичном тому, в которое 22 века назад попала фаланга, в ходе Второй мировой войны оказались линкоры – корабли, обеспечивавшие господство на море. Линкор, как боевая система достиг пика своего развития после того, как первый корабль новой серии британских линейных кораблей Дредноут (Неустршимый) был спущен на воду в 1906 году (см. рис. 10) [21]. Этот корабль воплощал новую тогда концепцию – all-big-gun (все пушки – большие), выдвинутую первым морским лордом флота ее Величества Д. Фишером. Впервые вся основная артиллерия корабля состояла из орудий максимально возможного калибра, размещенных в поворотных башнях, ракурс обстрела из которых был очень велик. Из-за большого калибра орудий и возможности их концентрации на нужном направлении, такой корабль имел абсолютное превосходство над любым современным ему противником по мощи боевого залпа, а также по его максимальной дальности. Дредноут, имея, кроме всего прочего, некоторое преимущество в скорости хода, мог спокойно расстреливать любого противника с расстояния, превышающего дистанцию его действенного огня.

После выхода Дредноута в море все его потенциальные противники оказались неспособны что-либо ему противопоставить совершенно так же, как все прежние боевые порядки древнего мира потеряли свою боевую ценность при столкновении с македонской фалангой. После этого все ведущие морские державы стали лихорадочно строить корабли такого же типа, а по количественным характеристикам превосходящие Дредноут. Однако эпоха господства на море линкоров такого типа была недолгой – около 35 лет. После становления авианосного флота они в кратчайший срок потеряли все свое могущество. На этот раз крупнокалиберные пушки и толстая броня линкоров внезапно стали бессильными перед оружием дальнего действия – самолетами морского базирования, способными поражать точечные цели. При этом удары торпедами или бомбами наносились туда, где брони у линкора или не было совсем (подводная часть борта) или она была слаба (палуба).

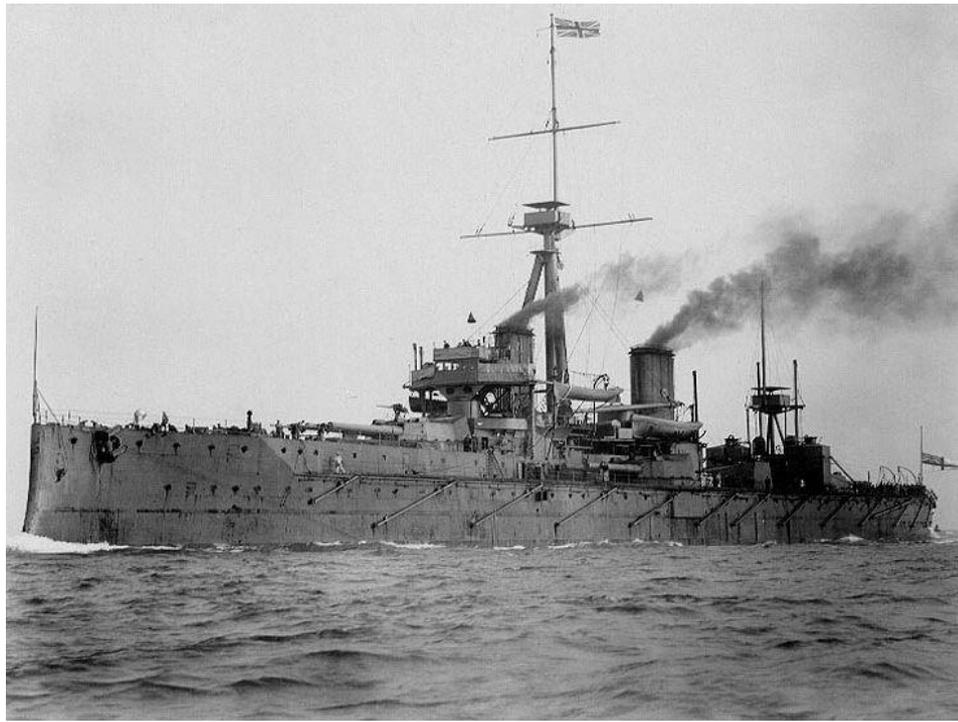


Рис. 10 – Дредноут

В декабре 1941 года в бухте Пёрл Харбор все линкоры Тихоокеанского флота США были уничтожены или сильно повреждены после внезапной атаки японской палубной авиации. После этого авианосцы, сначала японские, а с июня 1942 года, после битвы за атолл Мидуэй, американские, стали господствовать на Тихом океане. В том же 1942 году японцы ввели в строй два крупнейших в мире, небывалых по мощи, линкора Ямато и Мусаси. Однако, они долгое время в основном отстаивались на основной базе флота. Когда же в 1944 году Япония бросала в бой последние резервы, и они все же приняли участие в крупной боевой операции в Яванском море, Мусаси тут же был утоплен американской палубной авиацией, а Ямато – поврежден. Когда же после ремонта и модернизации на следующий год он снова вышел в море для отражения американского десанта на остров Окинава, американское авианосное соединение тут же устроило за ним настоящую охоту, и вскоре он был уничтожен (см. рис. 11).

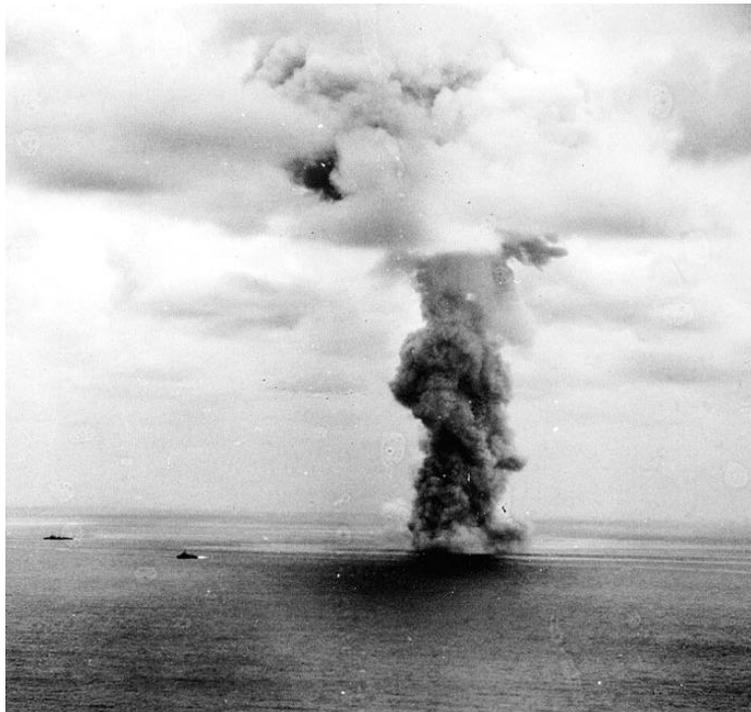


Рис. 11 – Гибель линкора Ямато

По-видимому, качественная смена сценария использования может ждать в ближайшее время и истребительную авиацию в том случае, если малозаметные истребители 5-го поколения будут созданы в нескольких странах – потенциальных противниках. В этом случае вместо дальних перехватов снова должны вернуться ближние маневренные бои при обязательном визуальном обнаружении друг друга, поскольку с помощью РЛС самолет противника обнаружить не удастся (из-за его малой ЭПР), при этом самолет, включивший РЛС, будет демаскировать этим сам себя [22].



Рис. 12 – Истребители США F-22 пятого поколения в воздухе

Конечно, сторонники сетцентрической войны, в которой все системы на поле боя должны быть связаны между собой для совместного обнаружения целей и передачи информации о них друг другу, а также для наведения оружия не с тех боевых систем, с которых оно доставляется в зону пуска, будут говорить о том, что цели для дальних перехватов и ударов и наведение на них будет осуществляться с самолетов дальнего радиолокационного обнаружения и управления (ДРЛО), находящихся далеко от поля боя, а не с малозаметных боевых самолетов. Однако, весь мировой опыт показывает, что при военном соревновании более-менее равных соперников достаточно быстро находились средства противодействия новым системам противника, причем, обычно, наиболее уязвимыми оказывались сложные и, особенно, специализированные боевые системы. А при рассмотрении боевого применения малозаметных истребителей достаточно очевидными способами нарушения их способности наносить удары «невидимыми» является подавление линий связи между ними и их вооружением с самолетами ДРЛО, а также уничтожение последних (которых в окрестности поля боя, обычно, может быть не более 1 – 3) с помощью интенсивно развиваемых сейчас систем оружия, таких как аэробаллистические или гиперзвуковые крылатые ракеты с достаточной дальностью полета.

Таким образом, при серьезном противостоянии воздушные бои практически неизбежно должны снова превратиться в ближние, а ближний маневренный воздушный бой (dog fight – собачья свалка) – крайне жестокий процесс, и таким боям свойственны очень высокие потери. Они были возможны в эпоху, когда истребители были дешевым массовым расходным материалом (производство истребителей в Первую и, особенно, во Вторую мировые войны в ведущих странах составляло многие десятки тысяч единиц, и заметная часть из них была сбита в первом – втором вылетах). Если же теперь стоимость одного истребителя равна или даже существенно превышает 100 миллионов долларов и производство их измеряется десятками или максимум, сотнями, возникает острое противоречие между требованиями и ресурсными возможностями даже для великих держав.

Истребитель Мессершмитт Вf-109G-6 в разгар Второй мировой войны (в 1943 году) стоил 43 тысячи марок [23], а предвоенный официальный курс доллара США к рейхсмарке в период с 1925 по 1940 годы колебался в пределах 2.45 – 4.36, при этом в 1940 году курс составлял 2.5 [24]. Таким образом, стоимость этого истребителя без учета инфляции в военные годы можно оценить в 17 тысяч долларов США (а при инфляции марки и еще ниже). При этом стоимость более-менее аналогичных истребителей США, таких как Мустанг или Аэрокобра, как известно, составляла в 1944 – 1945 годах около 50 тысяч долларов США. С учетом инфляции с конца Второй мировой войны до 2010 года, снизившей стоимость доллара в 12.1 раз [25], типичный истребитель той поры немецкого или американского производства стоил бы в конце прошлого десятилетия около 200 – 600 тысяч долларов США. При этом стоимость современных американских истребителей пятого поколения F-35 и F-22 с учетом всех затрат в 2010 году составляла от 115 до 410 миллионов долларов [26], то есть на 2.5 – 3 порядка больше, чем за 65 лет до этого (при этом следует учесть, что меньшее из двух указанных чисел, насколько можно понять, – это чистая цена закупки без учета затрат на разработку самолета, а также без стоимости его двигателя). В последних сообщениях говорится уже о ценах за F-35 от 165 миллионов долларов [27].

Дредноут стоил около 1.67 миллионов фунтов стерлингов [21] или по курсу того времени [28] 8.1 миллионов долларов, и с учетом 25-кратной инфляции доллара с 1906 по 2010 год [25] его стоимость сейчас была бы равна примерно 200 миллионам долларов США. Поэтому, видимо, не будет преувеличением сказать, что истребители пятого поколения начинают напоминать линейные корабли первой половины двадцатого века, которые даже до появления эффективных авианосных флотов почти перестали участвовать в реальных боевых операциях из-за чрезмерной стоимости этих кораблей, малого их количества и неясности перспектив их применения в условиях противодействия аналогичных вражеских сил. Это произошло сразу после грандиозного Ютландского сражения в конце мая 1916 года, хотя мировая война продолжалась еще 2.5 года.

Таким образом, резкое изменение ценности системы при изменении сценария ее применения – это закономерное явление, которое наиболее наглядно проявляется для боевых систем. Но нет никаких оснований утверждать, что подобного не может случиться с системой любого типа. Кроме того, чрезмерное совершенство системы в условиях ресурсных ограничений вполне может загнать ее в тупик, из которого у нее не будет выхода. Единственная возможность в этом случае – это создание принципиально новой системы, решающей те же или вновь возникшие задачи.

VII. Выводы

1. Рассмотрение в исторической ретроспективе проблем, провалов и катастроф при реализации сложных проектов показывает, что к ним часто приводит пренебрежение принципами системной инженерии.
2. Кардинальное расхождение между предполагаемыми и реальными надсистемными требованиями к советским самолетам-истребителям перед началом Великой отечественной войны привело к тому, что отвечающая реалиям войны структура советской истребительной авиации была создана только к середине войны, для чего потребовалось принести немало лишних жертв и ресурсных затрат в условиях предельного перенапряжения всех сил.
3. Применение системной инженерии в американской программе высадки человека на Луну оказалось одним из ключевых составляющих успеха этой программы. В то же время, аналогичная советская программа, а также новая американская программа начала XXI века, при реализации которых системный подход не применялся столь же строго и последовательно, завершились безрезультатно.
4. Катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС наглядно продемонстрировала, что никакое совершенство отдельных подсистем не может обеспечить успешную работу системы в целом, если эта система не проектировалась как таковая, а являлась простой сборкой этих подсистем без учета вновь возникших свойств объединенной системы.
5. Опыт истории войн и военного искусства достаточно ярко показывает, что системные инженеры должны пытаться рассматривать все возможные сценарии использования проектируемых ими систем, так как даже единственный возможный, но неучтенный сценарий может оказаться фатальным. При этом жесткие системы, то есть рассчитанные на малое количество рабочих сценариев, рано или поздно сталкиваются с таким фатальным для них сценарием. Если же рабочих сценариев много, то есть шанс, что мягкая система, способная функционировать при их большом разнообразии, успеет сойти со сцены без катастрофического завершения своего жизненного цикла.
6. В условиях ресурсных ограничений чрезмерное совершенство системы вполне может загнать ее в тупик, из которого у нее не будет выхода.

Литература

1. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge SEBoK, version 1.3, May 30, 2014.
2. А. Косяков и др. – Системная инженерия. Принципы и практика. Москва, ДМК, 2014.
3. Д. Б. Хазанов – 1941. «Сталинские соколы» против Люфтваффе. Москва, Эксмо, 2010.
4. J. Brill – Systems Engineering – A Retrospective View. *Systems Engineering*, vol. 1, Issue 4, 1998.
5. В. К. Батоврин – Современная системная инженерия. Этапы развития. *Датчики и системы*, 2013, N 3.
6. Б. Е. Черток – Ракеты и люди. Горячие дни холодной войны. Книга 3. Москва, Машиностроение, 1999.
7. J. Amos – Obama cancels Moon return project. *BBC News*, 1 February 2010 // <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8489097.stm>
8. Ю. И. Лобановский – Гидроакустическое возбуждение напорной системы второго гидроагрегата СШ ГЭС – причина Саянской катастрофы. *Synerjetics Group*, 2012 // <http://www.synerjetics.ru/article/causes.pdf>
9. На Саяно-Шушенской ГЭС начался демонтаж гидроагрегата №6. *РусГидро. Саяно-Шушенский филиал*, 15.02.2012 // <http://www.sshges.rushydro.ru/press/news/78123.html>
10. Обвиняемым в аварии на Саяно-Шушенской ГЭС вынесен приговор. *Информационное агентство Хакасия*, 24.12.2014 // <http://19rus.info/index.php/obshchestvo/item/24046-obvinyaemym-v-avarii-na-sayano-shushenskoj-ges-vynesen-prigovor>
11. Двое осужденных по делу об аварии на Саяно-Шушенской ГЭС подпали под амнистию. *TACC. Информационное агентство России*, 26.05.2015 // <http://tass.ru/proisshestiya/1994408>
12. Президента хотят подключить к станции. Энергетики просят провести новое расследование причин аварии на СШГЭС. *КоммерсантЪ*, 10.12.2014 // <https://www.kommersant.ru/doc/2630135>
13. Профсоюзы СШГЭС требуют госнаград для глав «РусГидро» и «Роснефти». *Плотина.Нет!*, 12.02.2015 // http://www.plotina.net/sshges-dod-sechin-gosnagrada/?utm_source=NovostiGES&utm_medium=twitter
14. В. Л. Окулов, И. М. Пылев – Неустойчивость напорных систем. *Доклады Академии наук, Энергетика*, 1995, том 341, N 4.
15. Ю. И. Лобановский – Автоколебания напорных систем и разрушение гидроагрегатов. *Гидротехническое строительство*, N 7, 2010.
16. Ю. И. Лобановский – Автоколебания напорных систем гидроэлектростанций и Саянская катастрофа. *Гидроэнергетика Украины*, N 3 – 4, 2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/autooscillations.pdf>
17. Л. фон Берталанфи – Исследования по общей теории систем. Москва, Прогресс, 1969.
18. Священный отряд из Фив. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Священный_отряд_из_Фив
19. Македонская фаланга. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Македонская_фаланга
20. Римский легион. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Римский_легион
21. HMS Dreadnought (1906). *Wikipedia* // [https://ru.wikipedia.org/wiki/HMS_Dreadnought_\(1906\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/HMS_Dreadnought_(1906))
22. А. Храмчихин – Совершенство приводит к деградации. Современные истребители стали слишком дороги для реальной войны. *Независимое военное обозрение*, 07.07.2017 // http://nvo.ng.ru/armament/2017-07-07/1_955_degradacia.html
23. Messerschmitt Bf.109. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Messerschmitt_Bf.109
24. Historical Dollar-to-Marks Currency Conversion Page // <http://www.history.ucsb.edu/faculty/marcuse/projects/currency.htm>
25. MeasuringWorth.com // <https://www.measuringworth.com/uscompare/>
26. Defense Acquisitions. Assessments of Selected Weapons Programs. *GAO, Report to Congressional Committees*, March 2011 // <http://www.gao.gov/new.items/d11233sp.pdf>
27. К. Mizokami. – The Cost of the F-35 is going up again. *Popular Mechanics*, July 17, 2017 // <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a27332/f-35-rising-cost/>
28. XE Currency Converter: GBP to USD // <http://www.xe.com/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=GBP&To=USD>

Москва
20.02.2018

Ю. И. Лобановский