

Über die Gesetze der Konstruktion technischer Systeme

B.I.Goldovsky

Februar 2018

Original: О законах построения технических систем¹.

Erschienen in ТРИЗ нужна России: проблемы технического творчества. Сб. ст. выпуск 2. – Чебоксары: Новое время, 2018. S. 54 - 72.

Übersetzt von Hans-Gert Gräbe, Leipzig, mit Unterstützung durch die freie Version von `deep1.com`.

Die von G.S.Altshuller [1] vorgeschlagene Liste der Gesetze der Entwicklung technischer Systeme (TS) ist relativ künstlich und bedingt unterteilt in die Gesetze der „Statik“, der „Kinematik“ und der „Dynamik“. Ein Schritt in Richtung einer natürlichen Klassifizierung dieser Gesetze wurde in den frühen 1980er Jahren von V.M. Petrov vorgenommen, der die Gesetze der „Statik“ als „Organisations-Gesetze“ bezeichnete (d.h. Gesetze der Konstruktion), die Gesetze der „Kinematik“ und „Dynamik“ dagegen zu „Evolutionsgesetzen“ (d.h. Entwicklungsgesetzen) vereinigte [2], [3] (unter Verwendung von seinen früheren Ausarbeitungen zu diesem Thema). Fast zur gleichen Zeit hat auch der Autor dieses Aufsatzes Ausarbeitungen zur Entwicklung eines Systems von Gesetzmäßigkeiten der Konstruktion und Entwicklung technischer Systeme vorgelegt [4]. Ziel dieser Ausarbeitungen war einfach, das Thema zu verstehen. Dabei wurden drei wesentliche Momente angemerkt:

- Das System der Gesetzmäßigkeiten ist in Wirklichkeit viel komplexer als die in [1] aufgeführte Liste.
- Ein Teil der Gesetzmäßigkeiten lässt sich deduktiv begründen.
- Im System der Gesetzmäßigkeiten ist es notwendig, die Gesetze der Konstruktion TS herauszuheben, welche die Arbeitsfähigkeit des TS sichern, weil die Gesetze der Entwicklung im Rahmen der Gesetze der Konstruktion wirken.

Die letzte These, die methodologisch wichtig ist, wurde 1983 in den Konferenzthesen [5] veröffentlicht (siehe auch [6]). Es gab auch Versuche, in späteren Publikationen darauf aufmerksam zu machen, aber ohne Erfolg. Das ist durchaus verständlich, denn die Hauptarbeiten der TRIZ-Spezialisten zu Gesetzen der Konstruktion und Entwicklung technischer Systeme konzentrierten sich hauptsächlich auf die Beschreibung der Gesetze, auf deren Klassifizierung und Untersetzung mit Beispielen [7], [8]. Die Frage der Mechanismen der Funktionsweise der Gesetze, wofür diese methodologische These wichtig sein könnte, wurde nicht untersucht.

¹<https://www.metodolog.ru/node/2164>.

Ein solches Phänomen ist ganz typisch für die Entwicklung jeder wissenschaftlichen Erkenntnis. Wie in [9] erwähnt wird: „Die Wissenschaft bewegt sich wie mit dem Rücken zur Zukunft; sie drängt vorwärts und lässt uns den zurückgelegten Weg überblicken. Wer sich schneller bewegt und seine Zeitgenossen überholt, fällt aus dem Gesichtsfeld“.

Im Jahr 2017 bezeichnete N.A. Shpakovsky in [10], unter Anwendung des Systems der Gesetze von V.M. Petrov auf den Prozess der Schaffung und Entwicklung TS, die Gesetze der Organisation als zentrale und die Gesetze der Evolution als unterstützende. Eine solche Einteilung ist nicht ganz korrekt, da diese Gesetze in unterschiedlichen Bereichen wirken. Doch der Fakt der Hervorhebung der besonderen Rolle der Gesetze der Konstruktion TS selbst ist richtig. Worin besteht aber die Besonderheit der Gesetze der Konstruktion TS?

Es ist bekannt, dass alle TS Teil von zwei Beziehungssystemen sind: der Natur und der Gesellschaft (des menschlichen Soziums). Sie werden vom Sozium für die Bedürfnisse des Menschen geschaffen, aber unter Verwendung des natürlichen Substrats. In Bezug auf die technischen Widersprüche wurde dies in [11] gezeigt: Die Beziehungen der gegenseitigen Bedingtheit der Parteien des Widerspruchs sind durch das natürliche Substrat bestimmt (daher sind diese Beziehungen bedingungslos – *безусловно*), und die Beziehungen der Gegensätzlichkeit werden durch Bewertungen durch das Sozium bestimmt (und sind daher relativ, nicht bedingungslos). Ein ähnliches Bild ergibt sich auch in Bezug auf die Gesetze der Konstruktion und Entwicklung TS.

Es sei angemerkt, dass ein Gesetz eine Zwangskategorie ist. Jedes bedingungslose Gesetz wird die Nichteinhaltung seiner Anweisungen bestrafen. In dieser Hinsicht unterscheiden sich die Gesetze der Konstruktion TS erheblich von den Entwicklungsgesetzen (sowohl in ihrem Wesen als auch ihrem Wirkmechanismus). Die Gesetze der Konstruktion TS sind als Reflexion des natürlichen Substrats der Technik bedingungslos: ihre Verletzung führt unmittelbar zur Funktionsunfähigkeit des TS (d.h. die Bestrafung für ihre Verletzung ist unvermeidlich). Die Gesetze der Entwicklung spiegeln den Einfluss des Soziums auf die Technik wider und sind, genau wie die Gesetze des Soziums, nicht bedingungslos. Ihre Verletzung führt nicht zu einer sofortigen Bestrafung, führt die Entwicklung des TS aber von einer optimalen Bahn. *Daher ist die Identifizierung eines Mechanismus, der erzwingt, dass den Gesetzen der Entwicklung TS bei deren Verbesserung zu folgen ist, eine recht schwierige Aufgabe, mit der man sich beschäftigen muss.* Gleichzeitig macht die bedingungslose Wirkung der Gesetze der Konstruktion TS diese invariant gegenüber allen Transformationen eines TS. Dementsprechend können sie verwendet werden, um die Richtigkeit der Transformationen zu kontrollieren und, wie jede wesentliche Einschränkung, auf den Wirkmechanismus der Gesetze der Entwicklung TS einwirken.

Diese Ausführungen gehören zu den theoretischen Kenntnissen, die, im Gegensatz zu angewandten, bei der Mehrheit der TRIZ-Spezialisten nicht gefragt sind (so der Autor in [12]). In konkreten Anwendungen werden die Gesetze der Konstruktion TS in erster Linie bei der Synthese TS eingesetzt. Allerdings sind sie auf Grund ihrer hohen Allgemeinheit den zahlreichen gesetzmäßigen Regeln der Konstruktion arbeitsfähiger TS unterlegen, die das Wesen der Ingenieursdisziplinen in verschiedenen Bereichen der Technik ausmachen. Gleichzeitig macht gerade der allgemeine Charakter der Gesetze der Konstruktion TS sie hinreichend universell. Wobei einzelne Schlussfolgerungen aus diesen Gesetzen einen eigenständigen Anwendungswert haben.

Die Gesetze der Konstruktion TS sind in unterschiedlichem Detaillierungsgrad in vielen Quel-

len beschrieben, zum Beispiel in [7], [13], [14], [15], [16], [17]. Dennoch erscheint es angebracht, dieses Thema unter Berücksichtigung der in den verschiedenen Jahren geleisteten Arbeit kompakt zu umreißen.

Der wichtigste systembildende Faktor für ein TS ist seine primär nützliche Funktion (PNF), die einem Bedürfnis des Soziums entspricht. Die Umsetzung der PNF erfordert ihrerseits die Ausführung einer Reihe von Funktionen auf niedrigerer Ebene von Allgemeinheit, von elementaren nützlichen Funktionen (ENF). Zum Beispiel müssen für Fahrzeuge mit PNF „Transport von Fracht auf der Wasseroberfläche“ die folgenden ENFs umgesetzt werden:

- Gewährleistung von Platzierung und Fixierung der Ladung während des Transports;
- Sicherstellung der Haltens des Transportmittels auf der Wasseroberfläche;
- Sicherstellung der Bewegung des Transportmittels auf der Wasseroberfläche;
- Steuerung der Bewegung des Transportmittels.

Zur Realisierung der ENF im System müssen entsprechende Subsysteme vorgesehen werden. D.h. es muss die **funktionale Vollständigkeit des TS** gewährleistet sein: im System müssen alle Teilsysteme realisiert sein, die zur Ausführung der PNF erforderlich sind.

Die angegebenen ENFs bilden die erste Ebene der Zerlegung der PNF, ihre Zusammensetzung bleibt bei jeder Änderung der Wirkprinzipien der einzelnen Teilsysteme unverändert. Diese Stabilität der Zusammensetzung der ENF der ersten Ebene und der entsprechenden Subsysteme des TS macht sie zu einer Invarianten und zu einem Marker einer bestimmten Gruppe (Klasse) von technischen Mitteln, die in eine bestimmte **funktionelle Nische** entsprechend der PNF fallen.

Die Ausführung der PNF und der entsprechenden ENFs wird durch die Struktur der TS gewährleistet als Elemente des natürlichen Substrats, die auf eine bestimmte Art und Weise miteinander interagieren. Gerade darauf ist zurückzuführen, dass bei der Interaktion der Elemente nicht alle ihre Eigenschaften realisiert werden, sondern nur einige, und dass sich durch die bestimmte Kombination von Eigenschaften bei der Interaktion eine spezielle Systemeigenschaft herausbildet, die nicht auf die Summe der Eigenschaften der in der Struktur enthaltenen Elemente reduzierbar ist. Gleichzeitig erzeugt diese aber auch einen strukturellen Überschuss im TS [18].

Die Anzahl und Zusammensetzung der Elemente, die in der Struktur enthalten sind, stimmt nicht mit der Anzahl und Zusammensetzung der funktionalen Subsysteme überein, da einige Elemente Teil mehrerer Subsysteme sein können.

Die funktionale Vollständigkeit des TS muss der **strukturellen Vollständigkeit** des Systems entsprechen, die besagt, dass die Zusammensetzung der Elemente und die Wechselwirkungen zwischen ihnen ausreichen müssen, um alle zum System gehörenden Elementarfunktionen ausführen zu können. Deshalb ist es zweckmäßig, das Funktionieren als Prozess geeigneter Transformationen natürlichen Flüsse (von Stoffen, Energie und Information) darzustellen. Derartige Darstellungen entsprechen einem aus der Kybernetik bekannten Strukturierungsansatz, der aus einem Umformer (Black Box) mit Ein- und Ausgängen besteht (wobei über einen der Eingänge die Steuerung erfolgen kann). Der Ansatz der Darstellung des Funktionierens durch Transformation von Flüssen wird z.B. in der bekannten Arbeit von R. Koller [19] aufgenommen.

Nach dieser Darstellung kann das **Gesetz der strukturellen Vollständigkeit eines TS** wie folgt formuliert werden: **Die Gesamtheit der Elemente der Struktur und die Wechsel-**

wirkungen zwischen ihnen müssen den Durchsatz der natürlichen Flüsse (Stoff, Energie und/oder Information) zu den notwendigen Teilen des Systems sichern sowie eine solche Umwandlung dieser Ströme, dass alle elementaren Funktionen des Systems erfüllt werden.

Die angeführte Definition bezieht sich auf die so genannten dynamischen Systeme (Maschinen, Geräte und Apparate), in denen für den Menschen lebensnotwendige natürliche Prozesse realisiert werden, die das Funktionieren eines TS gewährleisten. Es gibt jedoch auch Anlagen (сооружение), die gemeinhin als statisch betrachtet werden. In [16] wurde allerdings gezeigt, dass eine Einteilung in statische und dynamische Systeme in gewisser Weise bedingt ist. Wenn man jedoch von der Wesentlichkeit oder Unwesentlichkeit dynamischer Prozesse als Unterscheidung ausgeht, lassen sich Anlagen von Maschinen, Geräten und Apparaten unterscheiden. In [13] wurde gezeigt, dass man auch in Anlagen Analoga von Flüssen finden kann als Bild der Verteilung von Spannungen und/oder Verformungen. Zum Beispiel kommt das Bild der Spannungsverteilung in einer Metallplatte mit variablem Querschnitt mit Kerben und Mulden bei Dehnung dem Bild der Geschwindigkeitsverteilung in der Strömung einer nichtviskosen Flüssigkeit in einer Rohrleitung mit einer ähnlichen Querschnittsänderungen sehr nahe. Ähnliche Details ergeben sich bei der Untersuchung von Hindernissen für Flüsse. Das heißt, im Prinzip kann der Fluss-Ansatz auch auf Anlagen angewendet werden. Dementsprechend kann auch der Begriff der strukturellen Vollständigkeit auf Anlagen angewendet werden.

In der TRIZ wurde der Fluss-Ansatz zuerst von Yu.I. Khotimlyansky [20] vorgeschlagen. Bezogen auf Energieflüsse wurde das Prinzip des Energiedurchsatzes vorgeschlagen („notwendige Voraussetzung für den Betrieb eines TS ist der Energiedurchsatz durch alle Objekte des Systems“). Weiter wurde vorgeschlagen, zwei Arten der Energieumwandlung (nach der Art und nach dem Programm (parametrisch)) zu unterscheiden. Dies vereinfachte in bekannter Weise die Modellierung von Flüssen im Gegensatz zum Ansatz von R. Koller, der eine Liste von 12 Gruppen physikalischer Elementarfunktionen vorschlug, von denen jede eine direkte und eine inverse Funktion umfasste.

Es sei angemerkt, dass in Ingenieuraufgaben die Konstruktion von integrierten Flussstrukturen (insbesondere in sehr frühen Entwicklungsstadien) keine Seltenheit ist. Zum Beispiel werden auf einem U-Boot elektrische Akkumulatoren und Druckluft als Energiequellen eingesetzt. Die Verbraucher elektrischer Energie benötigen Strom unterschiedlicher Art (Gleich- und Wechselstrom mit unterschiedlichen Spannungswerten). Auch die Verbraucher von Druckluft benötigen einen Luftstrom mit verschiedenen Drücken (Hoch-, Mittel- und Niederdruck). Darüber hinaus benötigen einige Verbraucher einen Fluss unter Druck stehender Hydraulikflüssigkeit, für deren Erzeugung elektrische Energie und Druckluft verwendet wird. Es ist auch notwendig, im Apparat Meerwasser zu bewegen. Natürlich wird man ein vergrößertes strukturelles Schema auf der Basis der Vorstellungen über Umformer und Black Boxes mit Ein- und Ausgängen ausarbeiten, um sich alle erforderlichen Flüsse und Energie-Transformationen anschaulich vorzustellen. Mit dieser Art von Erfahrung und basierend auf dem vorgeschlagenen Ansatz Yu.I. Khotimlyansky gelang es, als Teil der Komplexmethode der Suche nach neuen technischen Lösungen einen ausreichend ganzheitlichen Apparat zur strukturellen Synthese und Transformation zu entwickeln, mit dem ich auch die Stoff-Feld-Analyse ersetzen ließ [21], [13]. Dabei wurden Energie-Ketten modelliert, da sowohl Materie- als auch Informationsströme eine Energiekomponente umfassen.

Das Gesetz der strukturellen Vollständigkeit in der Flussdarstellung vereint zwei der traditionellen Gesetze der Konstruktion TS, das Gesetz der „Vollständigkeit“ und das der „Energieleitfähigkeit“, siehe [1]. Es sei darauf hingewiesen, dass die Formulierung dieser Gesetze faktisch Spezialfällen entspricht. In der Realität ist das Bild komplexer. Die Zusammensetzung der Struktur hängt, selbst in verallgemeinerter Form, weitgehend von ihrer Bestimmung ab. Typische verallgemeinerte Funktionsstrukturen (für Maschinen, Informationssysteme und Anlagen) sind z.B. in [17] angegeben. Beispiele von Energieketten verschiedener Bestimmung werden in [13] vorgestellt.

Den größten Einfluss auf die Struktur des Systems haben die **Wirkprinzipien** der Teilsysteme, d.h. jene natürlichen Prozesse, Effekte und Erscheinungen, deren Gesamtheit die Ausführung der nützlichen Systemfunktionen absichert. Das Wirkprinzip kann nicht auf der Grundlage der Funktion bestimmt werden, wenn diese allein auf einer qualitativen Ebene formuliert ist. Wie oben gezeigt, umfasst die funktionale Nische eine Reihe von technischen Systemen, die sich in ihren Wirkprinzipien unterscheiden. Zur Konkretisierung müssen neben der qualitativen Beschreibung der Funktion auch deren quantitative Charakteristika (Parameter) angegeben werden. Mit anderen Worten, eine funktionale Nische kann in eine Anzahl kleinerer **funktionell-parametrischer Nischen** unterteilt werden, in denen sich jeweils ein spezifisches TS mit seinen eigenen quantitative Parametern und entsprechenden Wirkprinzipien der Teilsysteme [13] befindet.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Berücksichtigung quantitativer Parameter TS nur am Rande der TRIZ erfolgt. Es ist vollkommen verständlich, da in erfinderischen Formulierungen quantitative Indikatoren meist fehlen. Allerdings kann bei einem solchen Verhältnis zu Quantitäten in der TRIZ das Gesetz des Übergang von quantitativen zu qualitativen Veränderungen faktisch nicht angewendet werden, obwohl es in Veröffentlichungen über die Gesetze der Entwicklung TS genannt wird (siehe z.B. [7]). Entsprechend fallen Kategorien wie, zum Beispiel, Wesentlichkeit und die Zuspitzung von Widersprüchen aus der Praxis heraus.

Die Nischenvorstellung der Wirkprinzipien TS ist nicht selten. In [13] wird zum Beispiel die Verteilung der Wirkprinzipien von Transportmitteln nach Nischen entsprechend der Geschwindigkeits- und Gewichtsparameter gezeigt. Ähnliche Abhängigkeiten sind in den Abb. 1 und 2 für elektrische Akkumulatoren dargestellt.

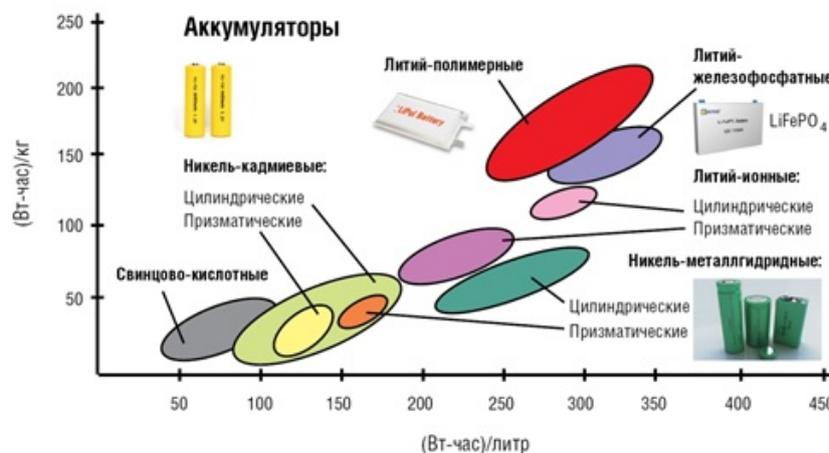


Abb. 1 – Verteilung der verschiedenen Typen von elektrischen Akkumulatoren auf Nischen nach den Parametern spezifische Energie pro Massen und Volumeneinheit.

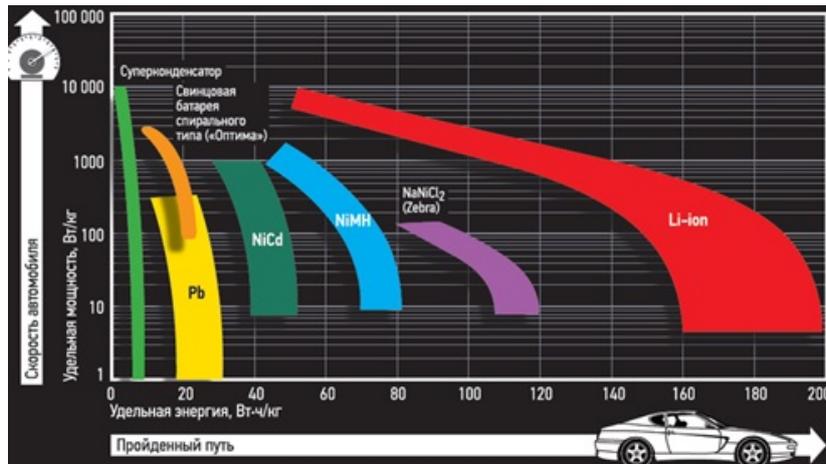


Abb. 2 – Verteilung der verschiedenen Typen von elektrischen Traktionsbatterien (Akkumulatoren elektrischer Energie) auf Nischen nach den Parametern spezifische Leistung und spezifische Energie pro Masseneinheit

Eine ähnliche Verteilung auf Nischen haben auch Baumaterialien. Zum Beispiel ist in Abb. 3 die Abhängigkeit der Materialverteilung für Gefäße auf entsprechende parametrische Nischen dargestellt.

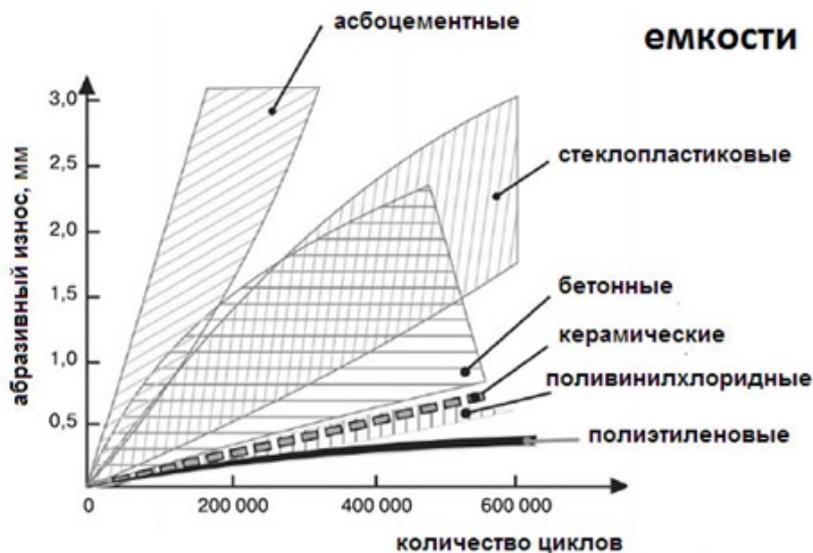


Abb. 3 – Verteilung der verschiedenen Materialtypen für Gefäße auf Nischen nach den Parametern zulässiger abrasiver Verschleiß und Anzahl der Lastzyklen

Damit kann man davon ausgehen, dass sich für Anlagen die Änderung des Materials faktisch analog der Änderung des Wirkprinzips auswirkt.

Im Gegensatz zur Funktion (PNF, ENF), die ein Spiegel der Ziele (Bedürfnisse) des Soziums ist, bezieht sich das Wirkprinzip auf das natürliche Substrat als Mittel zur Ausführung

einer Funktion. Daher ist es zweckmäßig, TS als eine bestimmte Art von technischen Mitteln (ähnlich einem biologischen Typ) zu definieren, als Kombination (Einheit) der PNF und des Wirkprinzips des wichtigsten (zentralen) Subsystems. Unter letzterem wird ein solches Subsystem verstanden, dessen ENF diejenige Gruppe (Klasse) von TS charakterisiert, welche die gemeinsame PNF realisieren und sich so von ähnlichen Systemen unterscheiden. *Zum Beispiel wird für Systeme mit der PNF, „Realisierung des Transports von Gütern auf der Wasseroberfläche“ das grundlegende (zentrale) Untersystem ein Untersystem sein, das die ENP „das Fahrzeug auf der Wasseroberfläche halten“ sichert, da die übrigen ENPs für fast alle TS typisch sind, die Lasten transportieren.*

Eine Nischendarstellung der Wirkprinzipien ist recht nützlich, erstens, weil sie ein ziemlich vollständiges Bild der realen Möglichkeiten dieser oder jener technologischer Effekte gibt. Zweitens erfordert die Arbeit mit funktional-parametrischen Nischen die Heraushebung der wirklich wesentlichen Parameter, die die Möglichkeiten der Wirkprinzipien zur Funktionsausführung quantitativ charakterisieren. Drittens, wenn die Ursache eines erheblichen unerwünschten Effekts (UE) die Veränderung eines quantitativen Indikators ist, der eine Nischengrenze definiert, dann ist es am wahrscheinlichsten, dass es notwendig ist, das Wirkprinzip zu ändern (d.h. zu einem neuen Typ von TS überzugehen).

Quantitative Charakteristika des Funktionierens sind nicht weniger wichtig wie qualitative. Wenn die Bedingungen für die Anwendung eines TS für das Sozium in Bezug auf das Funktionieren verallgemeinert werden, die zum Beispiel in [13], [15] und [22] angeführt werden, erhalten wir die folgende Sammlung von Bedingungen:

- Die primär nützliche Funktion (PNF) des TS muss qualitativ (inhaltlich) und quantitativ den Anforderungen des Soziums und/oder des technischen Umfelds entsprechen.
- Die Stabilität des Funktionierens muss gewährleistet sein (einschließlich der Zuverlässigkeit des Funktionierens und der Widerständigkeit gegenüber äußeren Einflüssen).
- Der erforderliche Grad der Steuerbarkeit des Prozesses des Funktionierens muss gewährleistet sein.
- Die Benutzerfreundlichkeit der menschlichen Interaktion mit dem TS (einschließlich der Benutzerfreundlichkeit der Steuerung) muss gewährleistet sein, wenn eine solche Interaktion vorgesehen ist.

In den Fällen, in denen eine Weiterentwicklung eines früher erschaffenen und bereits arbeitenden TS stattfindet, werden die quantitativen Charakteristika des Funktionierens sozusagen im Arbeitszustand festgelegt, auf der Basis der Analyse der Bedürfnisse des Soziums und des technischen Umfelds. In den Fällen, in denen ein TS zum ersten Mal entsteht (Pionier-Entwicklung), ist es nützlich, sich der Überwindung **parametrischer Schwellenwerte** zu erinnern, welche die Arbeitsfähigkeit des Systems charakterisieren [13]. Ein **physikalischer** parametrischer Schwellenwert bestimmt die Bedingungen für das zuverlässige Funktionieren des Systems. *Zum Beispiel sollte der maximale Wert der erzeugten Auftriebskraft 10-20% das Gewicht eines Flugzeugs um 10-20% überschreiten, damit dieses zuverlässig fliegt. Und bei jedem Überwasserschiff mit voller Ladung muss ein Teil des Rumpfes über Wasser bleiben, um die Lebensfähigkeit des Schiffes unter verschiedenen äußeren Einflüssen zu gewährleisten.* Eine **funktionelle** parametrische Schwelle bestimmt dasjenige Niveau der quantitativen Parameter des Funktionierens, bei dem das geschaffene TS nicht mehr nur als Prototyp angesehen werden. *Zum Beispiel wird ein Flussdampfer ein echtes Transportmittel, wenn er mit einer Tankfüllung gegen den Strom mindestens die Entfernung zwischen zwei Anlegestellen*

zurücklegen kann. Und der Überflug von Blériot über den Ärmelkanal (1909) war ein klares Zeichen dafür, dass das Flugzeug in die Reihe der einsatzfähigen Transportmittel aufgenommen war.

Eine der grundlegenden gesetzmäßigen Bedingungen der Arbeitsfähigkeit eines TS ist die Sicherung eines bestimmten **minimal erforderlichen Maßes an die Abstimmung der Struktur des TS**. In [14] wurde gezeigt, dass strukturelle Kohärenz eine unverzichtbare Systemeigenschaft ist. Nicht abgestimmte Systeme sind nicht arbeitsfähig. Dabei wurde vorgeschlagen, den Prozess der Abstimmung eines TS in zwei Etappen zu teilen: in die Anfangsetappe, in der die Arbeitsfähigkeit hergestellt wird, die „**Schwellenabstimmung**“, und weiter die „**Optimierungsabstimmung**“. Die Schwellenabstimmung ist endlich in der Zeit (sie gilt als erfüllt, wenn die Betriebsfähigkeit des TS erreicht ist), und die quantitative Bedingungen der Schwellenabstimmung haben die Form von Ungleichungen („nicht weniger als“, „nicht mehr als“). Die Optimierungsabstimmung kann sich über den gesamten Lebenszyklus der TS erstrecken und die quantitativen Bedingungen der Optimierungsabstimmung haben die Form von Gleichungen (Gleichsetzungen). Um den vielschichtigen Begriff „Abstimmung“ nicht überzustrapazieren, kann der anfängliche Prozess der (Schwellen-)Abstimmung mit dem Begriff „**Konjugation**“ (сопряжение) bezeichnet werden, der in der Evolutionsbiologie verwendet wird [23]. Bei der Verwirklichung der Konjugation Implementierung werden zwingend Struktur und Funktion abgestimmt, wie auch die Interaktion der Elemente der Struktur untereinander, qualitativ und quantitativ.

Als Ergebnis der Konjugation wird die **Konformität von Struktur und Funktion** der TS gesichert, was ein ziemlich wichtiges bedingungsloses Gesetz der Konstruktion ist. Es sei angemerkt, dass dieses Gesetz in [17] als „Entsprechung von Funktion und Struktur“ formuliert ist, wobei auf den Nachweis der Objektivität dieser Entsprechung besondere Aufmerksamkeit gerichtet wird. Diese Tatsache lässt sich dadurch erklären, dass der Übergang von der Funktion zur Struktur, wie bei jedem Übergang vom Ziel zum Mittel, ein Verfahren der Synthese ist, das im Prinzip nicht zu einem eindeutigen Ergebnis führt. Ein eindeutiger Übergang von der Funktion zur Struktur ist nur in trivialen (stereotypen) Fällen möglich und bei der Suche nach neuen Lösungen praktisch nicht anzutreffen. Gleichzeitig ist der Übergang von der Struktur zur Funktion ein analytisches Verfahren mit einem eindeutigen Ergebnis: Wie die Struktur, die Zusammensetzung und das Zusammenspiel der Elemente ist, so sind auch die Funktionen, deren Ausführung von dieser Struktur gewährleistet wird. Dabei ist innerhalb der Grenzen der eindeutig festgelegten Entsprechung von Struktur und Funktion auch die These über die Entsprechung von Funktion und Struktur berechtigt.

In jedem Fall gibt es eine wichtige Folgerung dieses Gesetzes: **die Entsprechung zwischen der Komplexität der Funktionen und der Struktur**. Eine der Manifestationen dieser Entsprechung ist das von R.U. Ashby formulierte „Prinzip der notwendigen Vielfalt“ – die Vielfalt des steuernden Systems darf nicht geringer sein als die Vielfalt des Objekts der Steuerung [16]. Nach diesem Prinzip muss mit zunehmender Komplexität des Objekts der Steuerung auch die Komplexität des steuernden Systems zunehmen.

Auf der Grundlage der genannten Konsequenz lässt sich ein **Gesetz der Aufrechterhaltung der Komplexität** formulieren, das sich hauptsächlich im Prozess der Entwicklung TS bemerkbar macht. In Übereinstimmung mit diesem Gesetz kann die Struktur des Systems nicht willkürlich vereinfacht werden. Es ist notwendig, entweder die Funktion des Systems zu vereinfachen (indem deren Umfang reduziert wird), indem einige Funktionen auf das Obersystem

übertragen werden, oder, unter Beibehaltung der Komplexität der Funktion, die Komplexität innerhalb der Struktur auf andere Systemebenen zu übertragen (indem die Funktionen einzelner Elemente komplizierter werden – „funktional-ideales Trimmen“ (функционально-идеальное свертывание) oder die Komplexität auf die Mikroebene übertragen wird, indem die verwendeten Formen der Bewegung der Materie komplizierter werden – „Änderung des Funktionsprinzips des Teilsystems“).

Durch die Wirkung dieses Gesetzes lässt sich das in der TRIZ bekannte Phänomen „der Welle der Idealität“ vollkommen erklären. In der Anfangsphase dieser Welle wird aufgrund der Differenzierung der Funktionsweise in Raum und Zeit, in Übereinstimmung mit dem Gesetz der Erhöhung der Idealität, die Struktur des Systems entsprechend komplizierter. Diese Verkomplizierung führt zur Reduktion der Zuverlässigkeit des Funktionierens des Systems (UE), was ab einem bestimmten Moment eine Vereinfachung der Struktur induziert. Die Formen zur Erreichung der erforderlichen Vereinfachung (Übergang zum Supersystem, Übergang zum „idealen“ Stoff usw.) [24] entspricht vollkommen dem Wirken des Gesetzes der Komplexitätserhaltung [13].

Bei dem Prozess der Konjugation von Elementen in der Struktur des TS ist es auch notwendig, ein **minimales Maß an Steuerbarkeit des Systems** zu sichern, das für die Funktionsfähigkeit erforderlich ist. Wie etwa in [16] bereits erwähnt, kann nur ein dynamisches System gesteuert werden, d.h. ein System, das zeitlich verschiedene Zustände in einem Bereich einnehmen kann, der durch die dem System eigenen Freiheitsgrade definiert ist. Doch nicht alle dynamischen Systeme erfordern eine Steuerung. Steuerung als gezielte Einwirkung auf das System, die durch das jeweilige Teilsystem erfolgt, ist erforderlich, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Das System ist in einigen seiner Zustände dynamisch.
- Es besteht die Notwendigkeit, das System in einen bestimmten aus einer Reihe möglicher Zustände zu versetzen (und/oder es in diesem Zustand zu halten).
- Es ist mit Blick auf das Funktionieren des Basisprozesses nicht möglich, das System in den erforderlichen Zustand zu bringen.

Zum Beispiel, wenn ein Objekt auf Amortisatoren zur Vermeidung der Verbreitung von Vibrationsflüssen montiert ist, dann hat es viele Freiheitsgrade und wird dynamisch. In den meisten Fällen ist die Aufrechterhaltung eines bestimmten Zustandes aus der Menge der möglichen einfach nicht erforderlich: all diese Zustände werden als zulässig angesehen. In einer Reihe von Fällen, wo eine niederfrequente („weiche“) Amortisation angewendet wird, ist es notwendig, den Umfang der Bewegung des Objekts unter einigen Betriebsbedingungen zu begrenzen. In diesem Fall werden zusätzlich zu den niederfrequenten Amortisatoren noch hochfrequente („harte“) Amortisatoren eingesetzt, die nach Überschreiten einer bestimmten Größe der Bewegung des Objekts in Betrieb gehen (indem das Objekt einfach mit „harten“ Amortisatoren in Berührung kommt). Dabei sind keine besonderen Kontrollmaßnahmen erforderlich. Allerdings gibt es Betriebsbedingungen, unter denen die Bewegung des Objekts in keiner Weise zulässig ist. In diesem Fall entsteht die Notwendigkeit der gezielten Abschaltung der Amortisation, die durch die Einführung eines geeigneten Steuerungssubsystems realisiert wird (z.B. durch das Herausfahren von starren Verankerungen).

Es sei angemerkt, dass den Bedürfnissen der Gesellschaft die Notwendigkeit entspricht, ein Objekt in einen gewissen Zustand zu versetzen und/oder diesen beizubehalten. Die gezielte Steuerung durch ein geeignetes Subsystem ist dafür nur ein Mittel (und häufig ein erzwungenes). Um die Arbeitsfähigkeit eines TS zu gewährleisten, ist es daher notwendig, in erster Linie diejenigen Steuerungswirkungen herauszuarbeiten, ohne die das System wirklich nicht funktionieren kann.

Da die meisten TS durch einen Prozess charakterisiert werden, der ihr Funktionieren gewährleistet, gehören zu den unbedingt notwendigen Steuereinwirkungen die Operationen des Anlaufens und Anhaltens dieses Prozesses des Funktionierens. Andere notwendige Steuermaßnahmen werden durch die Besonderheiten der Funktionsweise und die Funktionsprinzipien der Teilsysteme bedingt. *Zum Beispiel kann für eine Dampfturbine das erforderliche Mindestmaß an Steuerbarkeit durch das Teilsystem gewährleistet werden, das die Dampfzulieferung gewährleistet und stoppt. Wenn die Funktion der Turbine eine Änderung und/oder Stabilisierung der Rotationsgeschwindigkeit vorsieht, so muss für die Sicherung der Arbeitsfähigkeit ein geeignetes Steuerungssystem hingefügt werden. Dasselbe Bild ist bei einer Dampfmaschine zu beobachten. Da jedoch deren Funktionsprinzip in der zyklischen Bewegung des Kolbens mit entsprechender Änderung der Ströme des Arbeits- und Abdampfes besteht, muss in der Dampfmaschine unbedingt ein Teilsystem vorhanden sein, das die Steuerung der vorgegebenen Flüsse (synchron mit der Kolbenbewegung) steuert.*

In einigen Fällen ist die besondere Dynamik einiger Parameter des Systems, die eine gezielte Steuerung erfordert, auf den Einfluss des Umfelds zurückzuführen, in dem das TS funktioniert. *Ein Überwasserschiff zum Beispiel kann sich nach allen drei Achsen bewegen und drehen. Allerdings sind sowohl die vertikalen Bewegungen als auch Rotationswinkel relativ zu den horizontalen Achsen (Rollen und Trimmen) hauptsächlich durch die Wirkungen der Wasserumwelt bestimmt und durch die Auswirkungen der Schwerkraft der Erde begrenzt. Für Drehungen und Wendungen um die vertikale Achse (Kurswinkel) gibt es keine natürlichen Einschränkungen. Daher muss auf Schiffen ein Subsystem der Kurswinkelsteuerung installiert sein.*

In der Regel sollte die Synthese des Subsystems der Steuerung mit der Bestimmung der Art der Wirkungen auf ein dynamisches Objekt oder eines Teils davon begonnen werden, mit der das Objekt in den gewünschten Zustand gebracht werden kann. Dann wird zu dieser Art der Wirkung auf das Objekt das Wirkprinzip des Steuersubsystems ausgewählt, wobei die im System und/oder in seiner Umgebung verfügbaren Ressourcen zu berücksichtigen sind. *Kehren wir noch einmal zum Beispiel des Überwasserschiffs zurück. Für eine Drehung des Schiffs auf der Kurskurve um die vertikale Achse muss auf das Schiff ein Moment in der horizontalen Ebene wirken. Für ein sich bewegendes Schiff ist eine der einfachsten Möglichkeiten, ein solches Moment zu erzeugen, die Erzeugung einer seitlichen hydrodynamischen Kraft an einem der Enden des Rumpfes (es ist effizienter, eine solche Kraft am Heck zu erzeugen). Um die erforderliche hydrodynamische Kraft zu erzeugen, wurde ein Flügel (Platte) in das Wasser gestellt, der sich relativ zur vertikalen Achse drehen kann, wodurch der erforderliche Anstellwinkel erzeugt wird und damit die erforderliche Kraft und das Drehmoment. Für das Bewegen dieses Flügels (des Ruders) muss im Steuersystem mindestens eine Zuführung eingebaut sein, die ihrerseits von einem Menschen gesteuert wird.*

Wenn sich der Zustand des Objekt auf Grund bestimmter Transformationen von Flüssen ändert, dann ist für die Steuerung der Veränderung dieser Transformation ein Strukturglied

erforderlich, durch das der Fluss verläuft und das die erforderlichen Einwirkungen auf den Fluss sichert, während dieses Strukturglied seinerseits für entsprechende zielgerichtete Steuerwirkungen empfänglich sein muss (d.h. selbst veränderbar ist).

In [17] werden als Gesetze der Konstruktion die **Gesetze der Symmetrie technischer Objekte** erwähnt, nach denen ein technisches Objekt, das eine bestimmte signifikante Einwirkung der Umwelt in Form von Stoff-, Energie- oder Informationsflüssen erfährt, eine bestimmte Art von Symmetrie aufweist, die durch die Kombination und Art dieser Ströme bedingt ist. Tatsächlich sind die meisten Transportmittel zum Beispiel symmetrisch in Bezug auf die vertikale Ebene, die entlang der Fahrtrichtung dieser Transportmittel gerichtet ist. Dies ist durch die Schwerkraft der Erde bedingt, die von oben nach unten wirkt, und das Fehlen einer solchen Stratifikation der Wirkungen in der horizontalen Ebene. Dieses Phänomen sollte allerdings **nicht als Gesetz, sondern als gesetzmäßige Tendenz** betrachtet werden, weil Ausnahmen bekannt sind, in denen gerade die Abweichung von der Symmetrie bei einer symmetrischen und homogenen Wirkung der Umgebung eine Optimierung der TS ermöglicht (siehe z.B. [25]). Dennoch verdienen die in [17] aufgeführten Regeln Aufmerksamkeit, Untersuchung und Einbeziehung in die TRIZ.

Jede Symmetrie ist faktisch eine Einschränkung von Vielfalt. D.h. im Falle der Gleichförmigkeit der Einwirkungen des Umfelds oder Funktion manifestiert sich eine entsprechende Reduktion der Vielfalt auch in der Struktur. Mit anderen Worten haben wir es auch hier mit einer Erscheinung des Gesetzes der Übereinstimmung zwischen Struktur und Funktion zu tun.

Quellen (in Russisch, Titel ins Deutsche übersetzt)

1. G.S. Altschuller. Kreativität als exakte Wissenschaft. Moskau, 1979.
2. V.M. Petrov. Das System der Gesetze der Entwicklung TS. Bericht auf dem Seminar der TRIZ-Entwickler (Petrosavodsk 1982). Leningrad, 1982.
3. V.M. Petrov. Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung technischer Systeme. In: Methodologie und Methoden technischer Kreativität. Thesen der Vorträge und Berichte an die wissenschaftlich-praktische Konferenz. Nowosibirsk, 1984. S. 52-54.
4. B.I. Goldovsky. System der Gesetzmäßigkeiten der Konstruktion und Entwicklung technischer Systeme (1981-1983).
<http://triz-summit.ru/ru/205253/203840/Gold/303251/>
5. B.I. Goldovsky. Probleme der Modellierung der Entwicklung technischer Systeme. Wissenschaftlich-praktische Regionalkonferenz „Probleme der Entwicklung der wissenschaftlich-technischen Kreativität“. Thesen der Vorträge. Gorki, 1983.
6. B.I. Goldovsky. Noch einmal zum Platz der TRIZ (2013).
<http://www.metodolog.ru/node/1593>.
7. V.M. Petrov. Die Gesetze der Systemevolution. Monographie. Tel Aviv, 2013.
8. A.L. Lubomirski, S.S. Litvin. Gesetze der Entwicklung technischer Systeme. GEN3 Partners, 2003. <http://www.metodolog.ru/00767/00767.html>.

9. L.S. Salamon. Über einige Faktoren, welche die Wahrnehmung eines neuen Wortes in der Wissenschaft bestimmen. In: Die wissenschaftliche Entdeckung und ihre Wahrnehmung. Moskau, 1971, S. 113.
10. N.A. Shpakovsky. Gesetze der Entwicklung von Systemen und Linien ihrer Entwicklung. In: Sammlung der Vorträge der 9. internationalen Konferenz „TRIZ. Praxis der Anwendung und Entwicklung der methodischen Instrumente“. Moskau, 10.-11. November 2017. Band 2, S. 177-190.
<http://trizofication.ru/conference2017>.
11. B.I. Goldovsky. Über Widersprüche in technischen Systemen. Teil 2. Nishny Nowgorod, 1999. Hinterlegt im ChOUNB 28.02.2000 Nr. 2547.
<http://www.metodolog.ru/00001/00001.html>.
12. B.I. Goldovsky. Einige Überlegungen über das Wesen der TRIZ. (2017)
<http://triz-summit.ru/205253/203840/gold/303614>
13. B.I. Goldovsky, M.I. Vainerman. Rationale Kreativität. Moskau, 1990.
14. B.I. Goldovsky. über das Gesetz der „Abstimmung technischer Systeme“. (2013)
<http://www.metodolog.ru/node/1632>
15. B.I. Goldovskiy. Über Spezialisierung, Universalisierung und Hybridisierung. Sammlung der Vorträge der 8. internationalen Konferenz „TRIZ: Praxis der Anwendung und Probleme der Entwicklung“. Moskau 11.-12. November 2016. S. 213-228.
16. B.I. Goldovsky. Über die Dynamik und Steuerbarkeit technischer Systeme. (2017)
<http://www.metodolog.ru/node/2041>;
<http://triz-summit.ru/205253/203840/Gold/303482/>
17. A.I. Polovinkin. Grundlagen der Ingenieurskreativität: Lehrbuch für Studenten höherer Bildungseinrichtungen. Moskau, 1988.
18. B.I. Goldovsky. Kann man Idealität messen? (Anmerkungen zur einer zentralen Gesetzmäßigkeit der TRIZ). (2012) <http://www.metodolog.ru/node/1484>.
19. R. Koller. Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte- und Apparatebau. Berlin, 1976. (In deutsch).
20. Yu. Khotimlyansky. Energetische Analyse technischer Systeme. Baku, 1974.
21. B.I. Goldovsky u.a. Eine komplexe Methode der Suche nach neuen technischen Lösungen. In 3 Teilen. Gorki, 1979, 1980.
22. C.M. Christensen. The Innovator's Dilemma. Warum etablierte Unternehmen den Wettbewerb um bahnbrechende Innovationen verlieren. München, 2011. (Deutsch, Englisches Original 1997)
23. Yu.M. Tschaikowsky. Aktive vernetzte Welt. Erfahrung mit der Theorie der Evolution des Lebens. Moskau, 2008.

24. I.M. Kondrakow. Die Welt erkennen lernen. Lehrbuch. St. Petersburg, 2015.
25. B.I. Goldovsky. Die originalen Flugzeuge von Burt Rutan (2016).
<http://triz-summit.ru/ru/205253/203840/Gold/302917/>.