

О ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С
РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Ткаченко В.А., Сухобрус А.А.

В последнее время, особенно в космонавтике, надежность механических систем с последовательным соединением элементов в ряде случаев оказывается недостаточной и необходимость применения параллельного резервирования становится достаточно актуальной.

Одной из таких систем, обладающей свойствами резервирования, является многосателлитный планетарный механизм, так как сателлитные узлы при постановке нескольких сателлитов k представляют собой параллельные соединения, ибо при выходе из строя любого их элемента (подшипника, вала, зубчатого колеса и т.п.) при соответствующем конструировании работоспособность всей системы сохраняется. Величина $k-1$ является кратностью резерва такого механизма. Отказ всего сателлитного блока наступит тогда, когда выйдут из строя все k его узлов, равновероятных по отказам. Общая вероятность безотказной работы всего сателлитного блока при этом

$$P_c = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^m P_i\right)^k, \quad (1)$$

где P_i - вероятность безотказной работы одного из m элементов в сателлитном узле, определяемая на участке постоянной интенсивности отказов ($\lambda_i = \text{const}$) как

$$P_i = e^{-\lambda_i t} \quad (2)$$

В силу известного свойства $1 - (1 - \alpha)^k > \alpha$ при $\alpha < 1$ многосателлитная схема имеет более высокую надежность, чем односателлитная при прочих равных условиях.

Еще более удобными оказываются дифференциальные механизмы при степени подвижности $W > 1$, обладающие свойствами суммирования движения. При этом величина $W-1$ представляет также кратность ре-

зерва. В дифференциальных механизмах предоставляется дополнительная возможность подвода движения от нескольких параллельных входных цепей с соответствующим числом электродвигателей, что также способствует повышению надежности всей электромеханической системы. При этом обязательна постановка во входных цепях устройств одностороннего движения (муфта необратимого движения МН, самотормозящихся механизмов и т.п.), обеспечивающих передачу движения при отказе одной из параллельных входных ветвей. Возможная блочная схема надежности дифференциального механизма при $W=2$ на базе простого планетарного с ведущими центральными колесами a и b и ведомом водиле H приведена на рисунке. Входные цепи двух двигателей содержат муфты МН, которые могут быть расположены на входе цепи (вход b), либо в середине или в конце входной цепи (вход a).

Анализ структурной схемы надежности дифференциала по приведенному рисунку дает

$$P_{общ}^{W=2} = [1 - (1 - P_1 P_2)(1 - P_3)] \cdot [1 - (1 - \prod_{i=1}^m P_i)^k] \cdot P_H. \quad (3)$$

При отказе одного из элементов входной цепи, включая двигатель, муфта МН срабатывает и затормаживает всю цепь, образуя механизм с $W=1$ и новой блочной схемой надежности. Параллельность входных блоков исчезает. Вся структурная схема надежности представляет последовательное соединение всех нагруженных элементов (кроме сателлитного блока P_c). При отказе в цепях входа a

$$P_{общ}^a = P_2 P_3 P_c P_H = P_2 P_3 P_H [1 - (1 - \prod_{i=1}^m P_i)^k], \quad (4)$$

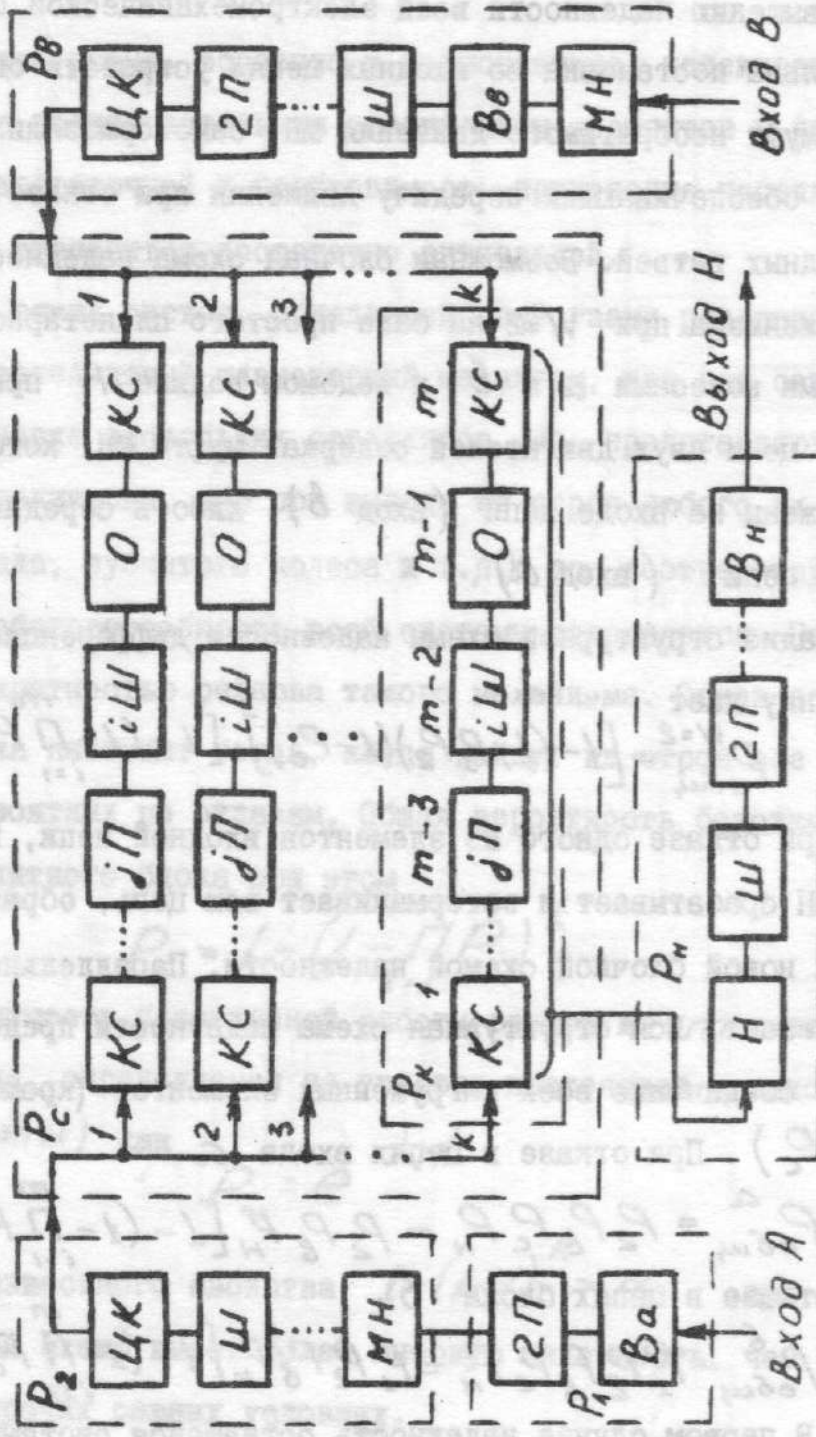
а при отказе в цепях блока b

$$P_{общ}^b = P_1 P_2 P_3 P_c P_H = P_1 P_2 P_3 P_H [1 - (1 - \prod_{i=1}^m P_i)^k]. \quad (5)$$

В первом случае надежность оставшейся системы выше, чем при постановке муфты на входе в блок, но ниже, чем при работе от двух двигателей, т.е.

$$P_{общ}^{W=2} > P_{общ}^a > P_{общ}^b \quad (6)$$

Возможная блочная схема надежности дифференциала при $W = 2$
на базе простого планетарного механизма с ведомым водилом (Н)



V_a, V_b - входные валы, V_H - выходной вал, Ш - шпонка, ЦК - центральное колесо,
Кс - колесо сателлита, П - подшипник, О - ось сателлита, МН - муфта необратимого движения

На повышении общей надежности механической системы сказывается величина вероятности безотказной работы каждого из ее элементов, характеризующаяся интенсивностью отказов λ_i . Отказы зависят от степени нагруженности звеньев и кинематических пар, от интенсивности износа в кинематических парах, мощности потерь в них и других факторов, определяющих работоспособность и надежность механизма в целом. Для планетарных механизмов одним из опасных узлов является сателлитный, оптимальное проектирование которого повышает надежность всего планетарного механизма. Критерием этой многофакторной задачи для сателлитных узлов является критерий условной мощности потерь, которую для одноступенчатого планетарного механизма (на примере $\overline{A1}$) можно выразить в виде

$$N_y = \frac{8N_H f z_c (u_{1H}^3 - 1)}{d_1 u_{1H}^3 (u_{1H}^3 - 2)}, \quad (7)$$

где N_H — мощность на выходном валу (водиле) механизма, u_{1H}^3 — передаточное отношение, d_1 — диаметр ведущего колеса, z_c — радиус оси сателлита, f — приведенный коэффициент трения в опорах сателлита.

Для многоступенчатого планетарного механизма общая мощность потерь всех сателлитных блоков при очевидных допущениях об одинаковости приведенного коэффициента трения в опорах, к.п.д. ступеней, а также диаметра ведущего центрального колеса всех ступеней может быть выражена зависимостью

$$N_{y\Sigma} = \frac{8N_H f}{d_1} \sum_{i=1}^S \frac{z_c (u_i - 1)}{u_i (u_i - 2) \eta^{s-i}}, \quad (8)$$

где u_i — передаточное отношение i -той ступени, S — число ступеней.

При подстановке зависимости $u_\Sigma = u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_S$ в (8) образуется уравнение с $S-1$ независимыми параметрами для поиска оптимального решения. Минимум такой функции определяется из системы

$$\frac{\partial N_{y\Sigma}}{\partial u_i} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, S-1) \quad (9)$$

Анализ систем (9) показывает, что для снижения общих потерь в сателлитных блоках необходимо стремиться при проектировании уменьшать количество планетарных ступеней, повышая передаточное отношение каждой из них. Это способствует снижению интенсивности отказов λ ; и повышению надежности всего механизма.

В любом передаточном механизме выходные звенья нагружены больше, чем входные и часто определяют надежность всей схемы. Поэтому применение дифференциальных механизмов на выходе системы способствует повышению надежности, если его входные цепи, рассмотренные нами раньше, будут получать движение не только от двух двигателей, но и от раздаточной ступени механизма, расположенной ближе ко входу и получающей движение от одного электродвигателя. В этом случае может возникнуть необходимость постановки муфт предельного момента в параллельных цепях или других устройств и механизмов, обеспечивающих кинематику при всех режимах работы. Раздаточным устройством может быть такой же дифференциал, как и на выходе. Параллельные кинематические цепи кроме осуществления функции передаточного числа выполняют функции резервирования и постоянства передаточного отношения при выходе из строя одной из цепей.

Таким образом, повысить надежность механических систем можно; используя при проектировании схемы с нагруженным резервированием на базе многосателлитных планетарных механизмов, оптимальной разбивкой передаточного отношения по ступеням при применении многоступенчатых планетарных механизмов, применением дифференциальных механизмов с несколькими электродвигателями при $W > I$, применением дифференциальных схем на выходе при $W = I$ с раздаточным механизмом на входе, в качестве которого также может быть использован дифференциал. В последних двух случаях обязательно применение устройств одностороннего действия. Места установки таких устройств влияют на надежность, повышая её при установке MH ближе к выходному дифференциалу.