

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА УПРАВЛЯЕМОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Родькин Д.И., д.т.н., проф., Коренькова Т.В., к.т.н., доц.*

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина*

*E-mail: [saue@polytech.poltava.ua](mailto:saue@polytech.poltava.ua)*

Рассмотрены научно-теоретические аспекты управляемости сложных систем. Доказано, что в основе оценки управляемости электромеханической системы должен лежать анализ процессов преобразования энергии во всех звеньях силового канала с использованием составляющих мгновенной мощности.

**Ключевые слова:** управляемость, электромеханическая система, мгновенная мощность.

**Введение.** Актуальность проблемы управляемости различного рода систем (технических, социальных, информационных и т.п.) в настоящее время не вызывает сомнений. Это обусловлено, с одной стороны, интенсивным развитием компьютерной техники, энергоресурсосберегающих технологий и устройств, с другой – изменением форм собственности и рыночных условий хозяйствования, принципов государственного управления, менеджмента предприятий и т. д.

Следует отметить, что технические и социальные составляющие управляемости взаимосвязаны и значительно влияют друг на друга. В последние десятилетия наблюдается пересмотр сложившихся представлений об управляемости с позиции оценки ее как наиболее важной качественной характеристики объекта.

Особого внимания заслуживает вопрос управляемости сложных систем в аварийных (нештатных) режимах, в чрезвычайных ситуациях или близких к ним. Подтверждением сказанному являются техногенные и природные катаклизмы второй половины XX века: взрыв Чернобыльской АЭС, разрывы нефте- и газопроводов, падение воздушных судов и т.п. Изношенность энергетического оборудования привела к тому, что около 80% всего оборудования в электроэнергетике выработало назначенный ресурс и работает за пределами этой наработки. Сети и электромеханическое оборудование жилищно-коммунального хозяйства достигли износа 50-60%, поэтому не удивительны «коммунальные» катастрофы в зимний период. Факты неопровержимо свидетельствуют о нарастающем количестве и масштабах последствий таких чрезвычайных ситуаций.

Подобные примеры показывают, что проблема предотвращения и управления авариями является весьма актуальной не только в практическом, но и в научно-теоретическом плане. Одним из важных критериев чрезвычайных ситуаций является их внешняя неожиданность, внезапность. Однако, по существу, они возникают как закономерный результат действия целого ряда факторов,

образующих причинно-следственную цепь событий (человеческая ошибка, технические неисправности, несвоевременная модернизация и др.), приводящих в итоге к экстремальным ситуациям. В связи с этим на первое место выносятся два наиболее важных первичных и взаимосвязанных свойства любой системы: управляемость и устойчивость, на которые при функционировании оборудования должно обращать самое пристальное внимание.

Практически любая электромеханическая система (ЭМС) функционирует в условиях воздействия различного рода факторов (возмущающих, задающих, управляющих) и характеризуется рядом параметров (технологических, энергетических и т. п.). Обычно при анализе процессов в системе, в особенности в переходных режимах, явления, происходящие в отдельных ее элементах, рассматриваются изолированно друг от друга. Однако свойства каждой из подсистем существенным образом влияют на состояние всего рассматриваемого комплекса. Для решения задач управления технологическим процессом или комплексом, повышения качества функционирования ЭМС весьма важно знать, каким уровнем управляемости обладает объект.

Подтверждением сказанному является гидротранспортный комплекс, представляющий собой сложную систему взаимосвязанного электрического, механического и гидравлического оборудования. Повышение управляемости в этом случае важно в следующих направлениях: при контроле и управлении давлением и производительностью в гидросистеме, при оптимизации энергетических режимов работы турбомеханизмов, при управлении процессами, протекающими в ходе развития последствий аварийного отключения насосов, резкого закрытия клапанов, развития кавитационных процессов и др.

Хотя термин «управляемость» в литературе встречается достаточно часто, однако разработано это понятие, по нашему мнению, весьма слабо, отсутствуют подходы к математической формализации, нет критериев оценки управляемости той или иной системы.

### Анализ предыдущих исследований.

Философско-методологический анализ проблемы управления, опирающийся на основы теории автоматического регулирования, рассматривает управляемость в качестве цели управления – объект управляем, если в смысле некоторого критерия качества, являющегося моделью цели, достигает заданных значений фиксированных параметров [1-3]. При этом управляемость зависит от целого ряда условий:

- критерия качества, в качестве которого могут использоваться свойства асимптотической устойчивости управляемой системы в окрестности заданного состояния. Требование асимптотической устойчивости – самое слабое требование к управляемой системе. Если система не будет асимптотически устойчивой, то достаточно единичного случайного импульса, чтобы система не вернулась в стационарное состояние;

- множества возможных значений входных параметров. Чем шире это множество, тем при более слабых критериях будет достигаться управляемость;

- множества возможных возмущений. Даже при введении самых слабых критериев управляемости полагалось, что все возможные возмущения, хотя и не определены по величине, но действуют кратковременно, импульсно, что оставляет систему в некоторой окрестности стационарного состояния, т.е. возмущения не меняют обратимый характер процесса.

С учетом сказанного, в самом общем случае под управляемостью понимают возможность перевода объекта при некотором управляющем воздействии в течение конечного интервала времени из заданной начальной точки (или области) в заданную конечную точку (или область) [1-4].

В сложной системе можно изучать управляемость каждого уровня. Управляемость зависит от структуры системы, состава органов управления, значений параметров.

Существует большое число видов управляемости, различающихся как условиями перехода управляемой системы из одного множества состояний в другое, так и ограничениями, накладываемыми на управление (рис. 1). Эти виды применительно к линейным стационарным, линейным нестационарным, нелинейным системам изучены в разной степени, и трудности на пути их исследования различны [5].

Управляемость системы, кроме определенных субъективных причин, связанных с выбором критерия качества и возможных значений конструктивных параметров, существенным образом зависит от объективных причин – устойчивости и обратимости, которые, в свою очередь, во многом детерминируются характером возмущений.

**Цель работы.** Обоснование энергетического подхода оценки управляемости ЭМС путем анализа

процессов преобразования энергии во всех звеньях силового канала на базе составляющих мгновенной мощности.

### Материал и результаты исследования.

Единым параметром, характеризующим любой режим сколь угодно сложной ЭМС, является мощность, которая выражается в одних и тех же метрических единицах независимо от физической природы компонент, входящих в выражения для ее определения (напряжение и ток, момент и скорость, давление жидкости и расход). Таким образом, управляемость ЭМС непосредственно связана с процессами потребления или генерации энергии.

Для анализа энергетических режимов ЭМС в работе использован метод мгновенной мощности [7-10], позволяющий наиболее полно характеризовать изменение мощности во временной области, в отличие от интегральных составляющих. Основой теоретической базы метода мгновенной мощности является баланс гармонических составляющих мгновенной мощности источника питания и элементов ЭМС или комплекса [11].

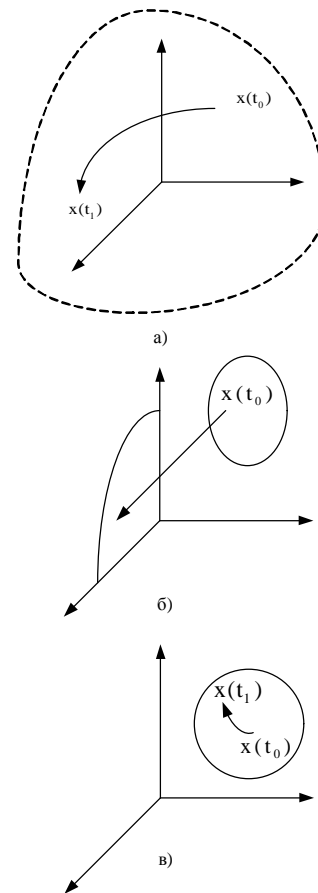


Рисунок 1 – Виды управляемости:  
а) - переход из одной точки пространства состояний в другую за конечный интервал времени;  
б) - переход из произвольной точки области пространства состояний одной размерности в произвольную точку области меньшей размерности;

в) - переход из любой точки пространства состояний в любую другую точку в пределах малой окрестности (управляемость в малом)

Представим в дальнейшем мгновенные значения сигналов напряжения и тока электромеханической системы управления, состоящими из ряда гармонических:

$$U(t) = \sum_{m=1}^M U_m \cos(m\Omega t); \quad (1)$$

$$I(t) = \sum_{n=1}^N I_n \cos(n\Omega t), \quad (2)$$

где  $m, n$  – номера гармоник напряжения и тока;  $M, N$  – число составляющих сигналов напряжения и тока, соответственно;  $\Omega$  – круговая частота.

Характеристиками сигналов напряжения и тока является их среднее

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt; \quad (3)$$

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt \quad (4)$$

или эффективное значение:

$$U_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{m=1}^M U_m \cos(m\Omega t) \right)^2 dt} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_m^2}; \quad (5)$$

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{n=1}^N I_n \cos(n\Omega t) \right)^2 dt} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}. \quad (6)$$

Эти величины являются мерами сигналов напряжения и тока, на основании которых определяется полная мощность:

$$S = U_3 I_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)^2 dt} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_m^2} \times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}. \quad (7)$$

Другой наиболее полной величиной, характеризующей параметры энергопроцессов, является мгновенная мощность, характеризующая изменение сигнала во временной области и определяемая произведением сигналов напряжения и тока:

$$P(t) = U(t)I(t) = \sum_{m=1}^M U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^N I_n \cos(n\Omega t) = P_{0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{ka} \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^K P_{kb} \sin(k\Omega t), \quad (8)$$

где  $P_{0\Sigma}$  – постоянная составляющая мгновенной мощности;  $P_{ka}$  – косинусная составляющая мгновенной мощности;  $P_{kb}$  – синусная составляющая мгновенной мощности;  $k$  – номер гармоники мощности ( $k = |m \pm n|$ );  $K$  – число знакопеременных составляющих мощности.

Мерой оценки энергопроцессов по составляющим мгновенной мощности является эффективная мощность:

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{m=1}^M U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^N I_n \cos(n\Omega t) \right)^2 dt}. \quad (9)$$

Мгновенная мощность определяется произведением временных сигналов напряжения и тока. Рассмотрение энергопроцессов при изменении их в реальном времени дает существенные преимущества при анализе, т. к. полностью сохраняется информация об исходных сигналах – напряжении и токе, которые формируют сигнал мгновенной мощности.

Полная мощность определяется произведением эффективных значений напряжения и тока. Из выражения (7) видно, что эти составляющие являются интегральными. Процесс интегрирования ведет к потере части информации о реальном изменении сигнала. Таким образом, математическая интерпретация полной мощности не отражает реального изменения энергопроцессов во временной области.

Из этого следует, что при определении показателей энергопроцессов обоснованным является комплекс действий с непосредственно исследуемым параметром, в данном случае с мощностью – произведением мгновенных значений напряжения и тока, т.е. с мгновенной мощностью  $P(t) = U(t)I(t)$ . При этом сомножители могут быть соответствующим образом интерпретированы в удобную для анализа форму, например, представлены гармоническими математическими зависимостями. По этим зависимостям всегда легко определить исходные параметры энергопроцесса; по зависимостям, характеризующим меру, восстановить картину процесса можно лишь в простейших случаях. Например, если известно выражение для эффективного тока

$I_3 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$ , являющегося мерой данного параметра, можно определить амплитуды гармонических  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , но фазы гармонических недоступны для такой или подобной операции. По этой причине полная мощность, определенная указанным выше путем, не может дать

представления о гармоническом составе, т.е. о портрете мгновенной мощности.

Как показано в [7-10], мгновенная мощность представляется постоянной и знакопеременными (синусной и косинусной) составляющими. Квадратурные компоненты при этом напрямую соответствуют известным составляющим: активной и реактивной мощности, широко используемым в обычной инженерной и научной практике.

Если принять в качестве основного положения необходимость использования составляющих мгновенной мощности, то следует особо подчеркнуть их физическую сущность:

- постоянная составляющая мгновенной мощности (принятое обозначение  $P_{k0}$ ) соответствует гармонике мощности нулевой частоты. Эта компонента определяется путем интегрирования выражения мгновенной мощности на интервале повторяемости процессов

$$P_{k0} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P(t) dt, \text{ где } T_k - \text{период знакопеременной}$$

составляющей мгновенной мощности k-ого порядка;

- косинусная знакопеременная составляющая

$$\text{мгновенной мощности } P_{ka} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P(t) \cos(k\Omega t) dt,$$

где  $\Omega$  – круговая частота первой гармоники мгновенной мощности;

- синусная знакопеременная составляющая

$$\text{мгновенной мощности } P_{kb} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P(t) \sin(k\Omega t) dt.$$

Уместно заметить, что приведенные три зависимости определенным образом используются и в существующих подходах при оценке энергопроцессов с использованием понятия полной мощности.

В первом случае, общепринято в практике, что активная мощность определяется путем интегрирования в необходимых пределах зависимости  $P(t)$  и, естественно, получается активная мощность  $P_{k0}$ . Вторая компонента определяется путем использования преобразования Гилберта в форме интеграла:

$$Q_k = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} U(t) \cdot H(I(t)) dt = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} I(t) \cdot H(U(t)) dt, \quad (10)$$

где  $H(t)$  – оператор, обозначающий преобразование Гилберта.

Очевидно, что  $P_{k0}$  и  $Q_k$  – скалярные величины, но не векторы, хотя условно считают, что эти оба параметра находятся в квадратуре.

В этой связи становится очевидным равенство:

$$S_k = \sqrt{P_{k0}^2 + Q_k^2}, \text{ подтверждающее значительную}$$

степень условности в определении полной мощности таким путем.

В другом случае, причем вполне обоснованно, можно определить мощность, получаемую в форме:

$S_k = \sqrt{P_{ka}^2 + Q_{kb}^2}$ . Это значение полной мощности двух электрических сигналов, сдвинутых друг относительно друга на угол  $\varphi$ :

$$S_k = \sqrt{P_k^2 + Q_k^2} = U_{kэ} I_{kэ},$$

где  $U_{kэ}, I_{kэ}$  – эффективные значения тока и напряжения.

Два последних выражения адекватно отражают сущность энергопроцессов и математические операции по определению геометрической суммы двух векторов  $P_k$  и  $Q_k$ , сдвинутых друг относительно друга.

Выполненный анализ следует дополнить таким положением: значения  $P_{k0}$  и  $P_{ka}$  равны друг другу во всех случаях умножения двух сигналов:

- сигналы синусоидальны; сдвиг между ними отсутствует, это соответствует активной нагрузке;

- сигналы полигармонические, без сдвига по указанной причине;

- сигналы гармонические; сдвиг между током и напряжением соответствует углу  $\varphi$  (смешанная активно-индуктивная нагрузка);

- сигналы полигармонические, сдвиг между ними определяется значениями активного и реактивного сопротивлений.

Рассмотрим простейший случай устройства преобразования энергии, включающего реверсивный усилитель с линейной характеристикой и ограничением. На вход усилителя подается управляющий сигнал синусоидальной формы (или другой какой-то сложной формы) регулируемой частоты. В качестве нагрузки подключено омическое сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  (рис. 2).

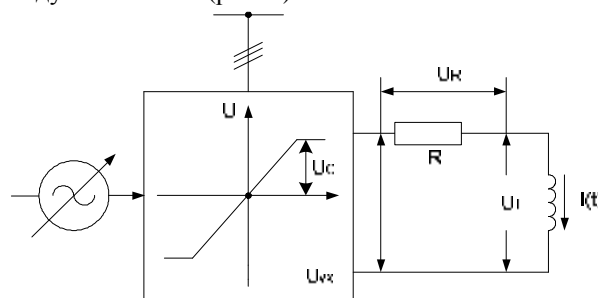


Рисунок 2 – Простейшая система преобразования энергии

Сопротивление усилителя принимаем равным нулю. Рассмотрим случай, когда усилитель работает вне зоны насыщения, нагрузка – активное сопротивление, частота входного сигнала  $\Omega$ .

Напряжение на нагрузке при этом будет:

$$U(t) = \sqrt{2}U \cos(\Omega t),$$

где  $U$  – действующее значение напряжения.

Ток нагрузки:

$$I(t) = \sqrt{2}I \cos(\Omega t),$$

где  $I$  – действующее значение тока.

Мощность нагрузки определяется произведением:

$$P(t) = U(t)I(t) = 2UI \cos^2(\Omega t) = UI + UI \cos(2\Omega t).$$

Среднее значение мощности:

$$P_0 = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P(t) dt = UI.$$

Эффективное значение мощности:

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P^2(t) dt} = UI \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} (1 + 2 \cos(2\Omega t) + \cos^2(2\Omega t)) dt} = UI \sqrt{\frac{3}{2}}.$$

Если учесть то, что напряжение на выходе пропорционально входному сигналу, то из приведенной зависимости следует, что мощность на выходе системы не зависит от частоты заданного напряжения. В этой связи приведенный пример можно рассматривать как некоторое устройство идеального типа с абсолютной управляемостью. На практике реализовать подобное устройство практически невозможно, однако его можно рассматривать как некоторый эталон, с помощью которого можно оценивать параметр, характеризующий управляемость других подобных устройств. Примем управляемость идеального устройства для регулирования энергетического режима за единицу, а сам параметр обозначим через  $k_y$ .

Изменим условия анализа, полагая, что регулировочная характеристика усилителя нелинейная, причем выходное напряжение его является некоторой функциональной зависимостью от входного напряжения:  $U = F(U_{вх})$ . Упомянутая зависимость может быть как кусочно-линейной, так и сложной полиномиальной степенной зависимостью от входного сигнала. При этом могут использоваться различные подходы при анализе процессов. В частности, достаточно перспективным может оказаться метод гармонической линеаризации, использующийся в теории автоматического регулирования.

Пусть  $U_{вх} = U_B \cos(\Omega t)$ . Представим выходное напряжение в форме полинома:

$$U = \alpha_1 U_{вх} + \alpha_2 U_{вх}^2 + \alpha_3 U_{вх}^3 + \dots + \alpha_n U_{вх}^n.$$

Тогда:

$$U(t) = \alpha_1 U_B \cos(\Omega t) + \alpha_2 U_B^2 \cos^2(\Omega t) + \dots + \alpha_n U_B^n \cos^n(\Omega t).$$

Ток нагрузки определяется соответствующим образом:

$$I(t) = I_1 \cos(\Omega t) + I_2 \cos^2(\Omega t) + \dots + I_n \cos^n(\Omega t).$$

Представив сигналы напряжения и тока в общей форме записи (1), (2), в выражении (8) для определения мгновенной мощности можно выделить две суммы:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t),$$

где  $P_1(t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) + \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t)$  – сумма одночастотных компонент напряжения и тока

( $n = m$ );  $P_2(t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) + \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t)$  – сумма разночастотных компонент напряжения и тока ( $n \neq m$ ).

Именно  $P_1(t)$  определяет постоянную составляющую мощности. Формально постоянная составляющая мощности может быть определена зависимостью:

$$P_0 = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P(t) dt = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} (P_1(t) + P_2(t)) dt = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P_1(t) dt = \sum_{m=n=1}^{m=n=\infty} \frac{U_m I_n}{2}. \quad (11)$$

Временная зависимость  $P_1(t)$  определяется произведениями соответствующих выражений для напряжения и тока:

$$P_1(t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m I_n \cos(m\Omega t) \cos(n\Omega t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m I_n \cos^2(m\Omega t) = \sum_{m=n=1}^{m=n=\infty} \frac{U_m I_n}{2} + \sum_{m=n=1}^{m=n=\infty} \frac{U_m I_n}{2} \cos(2n\Omega t). \quad (12)$$

Анализ последней зависимости показывает формирование мощности нагрузки в форме отдельных независимых составляющих, которые можно рассматривать, исходя их принципа суперпозиции, как независимое действие каждой из составляющих напряжения на одну и ту же активную нагрузку. Это можно представить в виде блок-схемы (рис. 3).

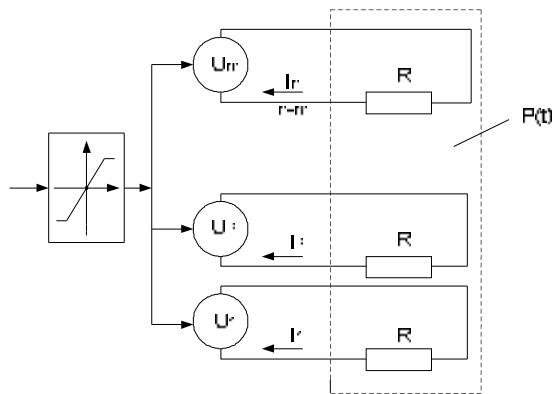


Рисунок 3 – Система формирования мощности нагрузки в форме отдельных независимых составляющих

В соответствии с ранее изложенным положением, каждую из цепей электропитания можно рассматривать как цепь с идеальной управляемостью. Тогда эффективная мощность нагрузки в целом будет выражаться зависимостью:

$$P_{13} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} P_1^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} (U_1 I_1 \cos(\Omega t) + \dots + U_m I_m \cos(m\Omega t))^2 dt} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{m=n=1}^{m=n=\infty} U_m^2 I_n^2}.$$

Дополнительно отметим, что зависимость  $P_1(t)$  определяет мощность нагрузки в предположении независимого действия каждого из источников напряжения  $U_m$ . Такое же действие будет в том случае, если анализируемая цепь включает последовательно включенные источники напряжения. Тогда, в соответствии с принципом суперпозиции, от каждого из них в цепи проходит ток, равный:  $I_n = \frac{U_m}{R_n}$ . Сказанное можно иллюстрировать рис. 4.

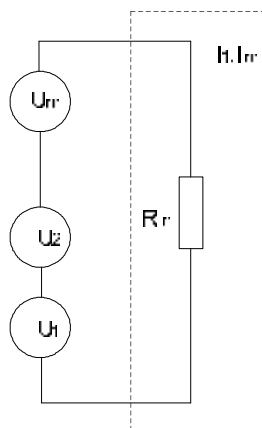


Рисунок 4 – Схема включения элементарных

источников на общую нагрузку

Хотя энергетическая сторона вопроса в одном и втором случаях соответствует закону сохранения в плане активных потерь, однако имеется существенное отличие, заключающееся в том, что в первом случае каждый источник можно рассматривать идеальным по управлению, в то время как во втором – мгновенная мощность определяется другим путем.

Для идеального по управлению случая:

$$P(t)_{\Sigma и} = \sum_{m=n=1}^{m=n=\infty} U_m(t) I_n(t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t).$$

Для реального случая:

$$P(t)_{\Sigma p} = \sum_{m=n=1}^{m=n=\infty} U_m(t) I_n(t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t).$$

Анализ приведенной зависимости показал, что первая составляющая равна мгновенной мощности идеального устройства электропотребления.

Мерой, отражающей характер энергопотребления, как уже говорилось, является эффективная мощность:

- для идеальной системы

$$P_{3n} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} \left( \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t) \right)^2 dt};$$

- для реальной системы

$$P_{3p} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} \left( \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t) \right)^2 + 2 \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t) + \left( \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cos(m\Omega t) \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \cos(n\Omega t) \right)^2} dt.$$

Зная эффективную мощность в идеальной системе (при отсутствии наиболее характерных нелинейностей) и в системе при наличии нелинейностей, отражающих специфику работы электропривода технологического механизма, можно выполнить анализ управляемости ЭМС. При

этом задающие воздействия в идеальной и нелинейной системах должны быть одинаковы по амплитуде постоянной составляющей, а также по амплитуде и частоте переменной составляющей.

С учетом сказанного, показатель управляемости ЭМС может быть записан в виде:

$$k_y = \frac{P_{\Sigma n}}{P_{\Sigma p}}. \quad (18)$$

Последнее выражение учитывает потери энергии в силовом тракте, влияние факторов, снижающих энергетическую эффективность (сдвиг фазы тока относительно напряжения из-за наличия реактивных элементов), появление переменных составляющих мощности, загружающих силовой тракт дополнительными компонентами.

Снижение управляемости сопровождается энергетическими процессами с высшими гармоническими в спектре мощности и ростом значения эффективной мощности системы. Очевидно, если система полностью управляема, то коэффициент управляемости  $k_y = 1.0$ ; при неуправляемой системе –  $k_y$  стремится к нулю.

Подтверждением сказанному является анализ энергетических процессов в ЭМС на базе модели тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д) с отрицательной обратной связью по скорости, структурная схема которой приведена на рис. 5.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения описан линеаризованной математической

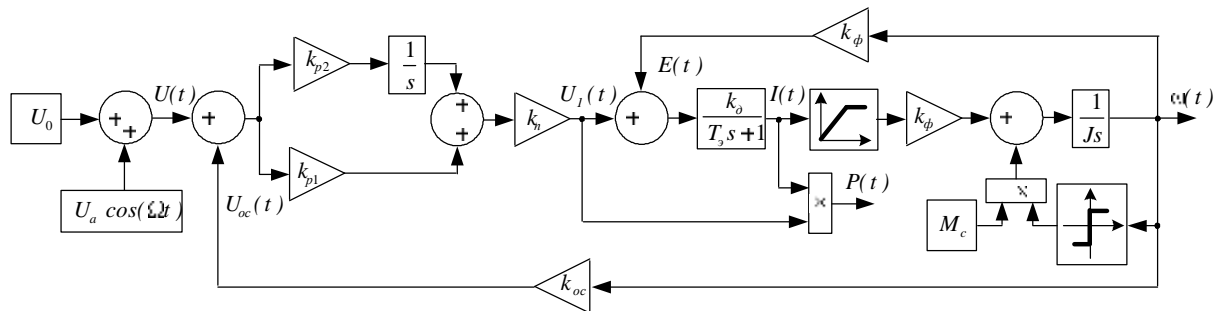


Рисунок 5 – Структурная схема модели электромеханической системы

Параметры моделируемой системы:  $P_n = 75$  кВт;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 340,9$  А;  $n_0 = 1500$  об/мин;  $k_d = 31,25$ ;  $k_\phi = 1,33$ ;  $J = 2,896$  кгм<sup>2</sup>;  $R_\Sigma = 0,032$  Ом;  $L_\Sigma = 0,00082$  Гн;  $T_\gamma = 0,026$  с;  $M_c = 477,8$  Нм;  $k_n = 22$ ;  $k_{p1} = 2,89$ ;  $k_{p2} = 27,78$ ,  $k_{oc} = 55$ .

На рис. 6 приведены спектры амплитудных значений мгновенной мощности в линейной и фактической (при наличии нелинейного элемента) системах для  $U(t) = 5 + 3\cos(\Omega t)$  с частотой  $f = 2$  Гц.

Анализ показал, что в спектре мгновенной мощности имеют место гармоники высшего порядка

моделью, где  $k_d = \frac{1}{R_\Sigma}$  – коэффициент передачи;

$T_e = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma}$  – электромагнитная постоянная времени;

$R_\Sigma$  – суммарное активное сопротивление двигателя;  $L_\Sigma$  – суммарная индуктивность;  $J$  – момент инерции двигателя.

Работа однонаправленного ТП представлена нелинейностью типа «насыщение».

Задающее воздействие, подаваемое на вход системы, имеет вид  $U(t) = U_0 + U_a \cos(\Omega t)$ , где  $U_0$  – постоянная составляющая напряжения;  $U_a \cos(\Omega t)$  – переменная составляющая входного напряжения. В системе протекает электрический ток, который может быть представлен в виде ряда (2). Используя выражения (8), (9), определяем мгновенную мощность и эффективное значение мощности в ЭМС, соответственно, при отсутствии нелинейного элемента и при его наличии.

– 3, 4, 5 и т.д. Полученный спектр мощности подтверждает тезис о влиянии нелинейных свойств элементов системы на энергетические процессы, протекающие в ней. Очевидно, что при снижении амплитуды переменной составляющей напряжения спектр мгновенной мощности ЭМС приближается к

виду спектра в идеальной системе – амплитудные значения высших гармоник значительно снижаются.

На рис. 7, 8 приведены кривые изменения эффективной мощности в идеальной  $P_{эи}$  и фактической  $P_{эп}$  системах и коэффициент управляемости ЭМС  $k_y$  при изменении амплитуды  $U_a$  и частоты  $f$  переменной составляющей подаваемого напряжения соответственно.

Из анализа полученных кривых видно, что в области малых значений переменной составляющей сигнала напряжения коэффициент управляемости практически не изменяется – наблюдается равенство значений эффективной мощности в линейной и нелинейной системах. В этом случае ЭМС нечувствительна к входному нелинейному элементу.

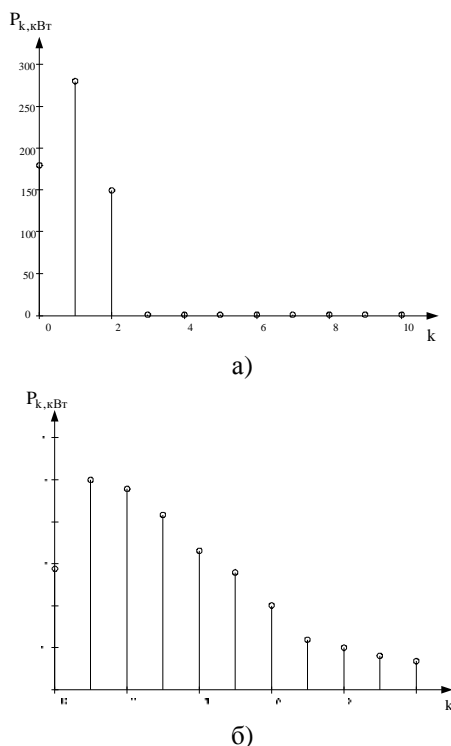


Рисунок 6 – Спектры мгновенной мощности в идеальной (а) и реальной (б) системах

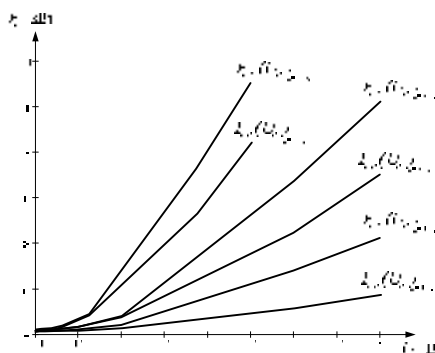


Рисунок 7 – Зависимость эффективной мощности системы от амплитуды переменной составляющей напряжения

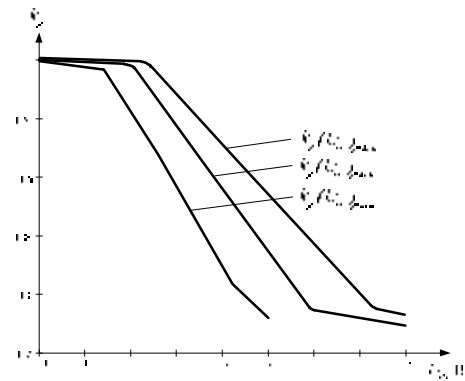


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента управляемости системы от амплитуды переменной составляющей напряжения

**Выводы.** Выполненный анализ существующих подходов к оценке управляемости сложных систем показал, что на сегодняшний момент отсутствует общая научно-теоретическая платформа математической формализации управляемости системы того или иного рода.

Доказано, что в основе оценки управляемости ЭМС должен лежать анализ процессов преобразования энергии во всех звеньях силового канала технологического комплекса. Единым параметром, связывающим любой режим сколь угодно сложной ЭМС, является мгновенная мощность.

Предложенный энергетический подход к оценке управляемости систем с использованием метода мгновенной мощности позволяет анализировать энергопроцессы при изменении их в реальном времени с сохранением полной информации об исходных сигналах, формирующих мощность, учитывать проявление специфических свойств электромеханического оборудования, появление переменных составляющих мощности, загружающих силовой тракт дополнительными компонентами.

Показано, что нелинейные свойства элементов ЭМС приводят к снижению управляемости, что сопровождается энергетическими процессами с высшими гармоническими в спектре мощности и ростом значения эффективной мощности системы.

Основными выражениями, отражающими процессы энергопреобразования в ЭМС, являются уравнения баланса мгновенных мощностей, составляемые по эквивалентным схемам замещения распределения потерь энергии в рассматриваемой системе, которые могут быть трансформированы на более сложные режимы ЭМС различных технологических комплексов, в частности, на процессы аварийного характера.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдбаум А. А. Методы теории автоматического управления / А. А. Фельдбаум, А. Г. Бутковский. – М.: Наука, 1971. – 743 с.
2. Основы автоматического регулирования и управления / [Каргу Л. И., Литвинов А. П., Майборода Л. А. и др.]. – М.: Высшая школа, 1974. – 440 с.
3. Сю Д. Современная теория автоматического управления и ее применение / Д. Сю, А. Мейер. – М.: Машиностроение, 1972. – 552 с.
4. Системы управления электроприводами: Учеб. пособие / [Голубь А. П., Кузнецов Б. И., Опрышко И. А., Соляник В. П.]. – К.: УМК ВО. – 1992. – 376 с.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
6. Солодка М. С. Сущность управления и проблема управляемости / Солодка М. С. // Теоретический философский журнал *Credo*, №3/97.
7. Родькин Д. И. Составляющие мгновенной мощности полигармонических сигналов / Родькин Д. И. // – М.: Электротехника., 2003. – №3. – С.38-42.
8. Родькин Д. И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов / Родькин Д. И. // Вісник КДПУ. – Кременчук: Кременчуцький державний політехнічний університет, 2007. – Вип. 3/2007 (44). – Ч.1. – С. 66-77.
9. Родькин Д. И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии / Родькин Д. И. // Вісник КДПУ. – Кременчук: Кременчуцький державний політехнічний університет, 2003. – Вип. 1 (18). – С. 89-91.
10. Родькин Д. И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами / Родькин Д. И. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, 2004. – Вип.15. – С. 10-18.
11. Тонкаль В. Е. Баланс энергий в силовых цепях / Тонкаль В. Е., Новосельцев А. Е., Денисюк С. П. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ КЕРОВАНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

*Родькин Д.И., д.т.н., проф., Коренькова Т.В., к.т.н., доц.*

*Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна*

*E-mail: [sau@polytech.poltava.ua](mailto:sau@polytech.poltava.ua)*

Розглянуто науково-теоретичні аспекти керованості складних систем. Доведено, що в основі оцінки керованості електромеханічної системи повинен лежати аналіз процесів перетворення енергії у всіх ланках силового каналу з використанням складових миттєвої потужності.

**Ключові слова:** керованість, електромеханічна система, миттєва потужність.

## ENERGY METHOD ANALYSIS OF CONTROLLABILITY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

*Rodkin D., Doc. of Sc. (Tech.), Prof., Korenkova T., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

*Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskiy State University*

*Pershotravneva St., 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine*

*E-mail: [sau@polytech.poltava.ua](mailto:sau@polytech.poltava.ua)*

The scientific theoretical aspects controllability of the difficult systems are considered. It is well-proven that estimation of controllability of the electromechanical system the analysis of processes of transformation energy must be underlaid in all links of power channel with the use of constituents of instantaneous power.

**Key words:** controllability, electromechanical system, instantaneous power.

