

УДК 621.313.323

## ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В СИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

- ЗИНОВКИН В.В.** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: zvv@zntu.edu.ua*;
- АНТОНОВ Н.Л.** канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: nick@nickanto.info*;
- КРИСАН Ю.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: krisan@mail.com*.

**Цель работы.** Исследование влияния резкопеременной электрической нагрузки на нестационарные электромагнитные явления и электромеханические процессы в синхронном электроприводе.

**Методы исследования.** Теоретические и экспериментальные методики исследований и анализа совокупности параметров резкопеременных нагрузок электротехнологических комплексов и электромагнитных процессов в электрооборудовании; физико-аналитические методики для получения зависимостей влияния электротехнологических нагрузок на техническое состояние, аварийность электрооборудования, добавочные потери и нестационарных электромагнитных явлений в системах и оборудовании.

**Полученные результаты.** Выполнены расчеты превышения колебательных процессов вала синхронного электропривода, которые возбуждаются резкопеременными нагрузками, относительно нормированных государственными стандартами. Исходя из первостепенных требований электропривода и обеспечения нормируемых колебаний вала двигателя и возрастающих требований к надежности, эффективности и снижения энергозатрат на единицу вырабатываемой продукции было исследовано влияние нестационарных электромагнитных процессов на электромеханические параметры электропривода.

**Научна новизна.** Предложена математическая методика нестационарных электромагнитных процессов в синхронном электроприводе, которая позволяет исследовать влияние несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений на электромеханические параметры. Приведена инженерная методика оценки колебательной функции вала в зависимости от характера нестационарных электромагнитных процессов в синхронном электродвигателе.

**Практическая ценность.** Предложена инженерная методика оценки колебаний вала синхронного электропривода при нестационарных электромагнитных процессах, приводящих к увеличению показателей нормативно-технической документации.

**Ключевые слова:** нестационарные электромагнитные процессы; синхронный электропривод; резкопеременная нагрузка математическая модель; механические колебания; нормируемые показатели.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Электроприводы широко используются в технологических установках общего и специального назначения. При их помощи достигается высокая точность, оперативность и обеспечиваются директивные электромеханические процессы промышленных установок. Их эффективность существенно зависит от соблюдения нормированных показателей качества электрической энергии и условий эксплуатации [1]-[3]. Ввиду особенностей электротехнологических режимов энергоемких технологических комплексов таких как приводы прокатных станов и дуговые сталеплавильные печи, вставки и линии передачи постоянного тока, электролиза и нефтеперерабатывающей промышленности и др. ток и напряжение изменяются во времени по резкопеременному вероятностному закону [4]-[6]. Это приводит к существенному превышению нормируемых показателей качества электрической энергии и, как следствие, формированию нестационарных электромагнитных явлений в электроприводах и смежном электротехническом оборудовании [7], [8]. Последние являются причиной ухудшения технико-экономических показателей энергоемких промышленных предприятий в результате следующих явлений и последствий:

нарных электромагнитных явлений в электроприводах и смежном электротехническом оборудовании [7], [8]. Последние являются причиной ухудшения технико-экономических показателей энергоемких промышленных предприятий в результате следующих явлений и последствий:

- увеличения добавочных потерь в электроприводе и технологической линии;
- развития релаксационных электромеханических процессов;
- развития релаксационных явлений в охлаждающих узлах;
- сокращения сроков службы отдельных узлов, активных и неактивных деталей электроприводов;
- снижения эффективности функционирования электропривода, смежного электротехнического оборудования и технологической линии;
- перегрева обмоток и питающих кабелей;
- ухудшения диэлектрических свойств и уско-

ренного «старения» изоляционных материалов;

- обугливания изоляции системы возбуждения электромагнитного поля электродвигателя и электропривода в целом;

- увеличения общего фона акустических шумов и в спектре октавных частот;

- развития магнитострикционных явлений в магнитной системе и отдельных деталях конструкции;

- резонансных ферромагнитных и механических явлений;

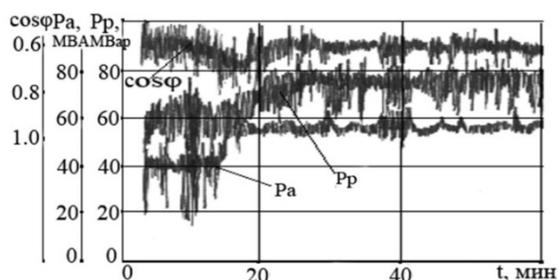
- возрастания энергозатрат на единицу вырабатываемой продукции.

Очевидно, что для повышения эффективности электроприводов целесообразно выполнить комплексные исследования электромагнитных и электро-механических процессов с учетом реальных условий эксплуатации, режимов нагрузки двигателя и условий эксплуатации.

## II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

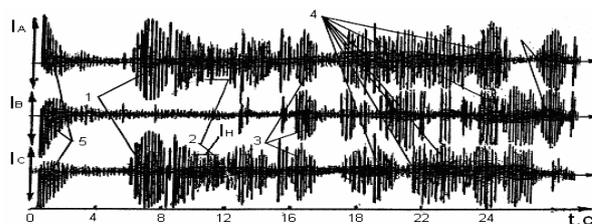
В многочисленных литературных источниках отмечается, что даже в системах общего назначения в возбуждающих токах содержатся высшие гармоники. Значительное влияние оказывают гармоники до пятого порядка, а остальные не превышают 4,5% от первой [9]-[17]. Определяющее влияние на электромагнитные процессы в электротехническом оборудовании оказывают высшие гармоники, а также несимметрия возбуждающих токов и напряжений.

В системах электроснабжения энергоемких электротехнологических комплексов последние существенно превышают нормированные показатели качества электрической энергии и ужесточают условия работы электроприводов. В качестве примера на рис.1 и рис.2 приведены фрагменты регистрограммы мощности и токов технологических коротких замыкания (т.к.з.) в системе электроснабжения энергоемкого электрометаллургического промышленного предприятия [18].



**Рисунок 1.** Регистрограмма мощности в системе электроснабжения электрометаллургического предприятия при работе ДСП.

На рис.1 приняты следующие обозначения: ( $P_a$ ) и ( $P_p$ ) – активная и реактивная мощности, соответственно; ( $\cos\phi$ ) – коэффициента мощности.



**Рисунок 2.** Фрагмент осциллограммы фоновых токов в режиме технологического короткого замыкания (т.к.з.) дуговой сталеплавильной печи.

На рис.2 приняты следующие обозначения: (1 и 2) – двухфазное т.к.з., (3) – трехфазное т.к.з., (4) – чередующиеся т.к.з., (5) – токи включения электропечного трансформатора,  $I_n$  – номинальный ток технологического режима.

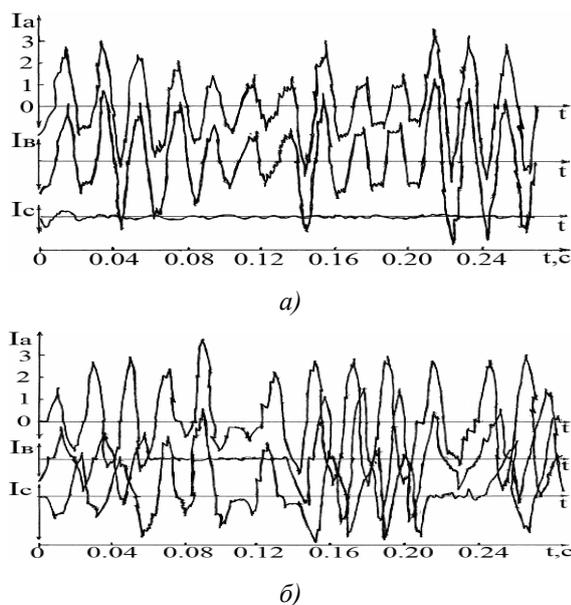
Из приведенных осциллограмм видно, что в отдельные моменты времени и в совокупности электрические параметры нагрузки изменяются и превышают нормируемых показателей качества электрической энергии. Такие режимы называют резкопеременными [3], [4], [10]. Наиболее неблагоприятными и, практически не контролируемые, являются механические качания ротора электроприводов. Это приводит к усложнению соблюдения директивного управления технологическими процессами, отрицательно сказывается на соблюдении автоматизированного управления и технико-экономических показателей технологических объектов.

В литературных источниках приведены результаты исследований режимов синхронных машин [18]-[23]. Однако влияние резкопеременных нагрузок на электромагнитные и электромеханические процессы в синхронном электроприводе практически не исследованы.

Известно, что внешние электрические параметры возбуждают в электрооборудовании соответствующие электромагнитные процессы. Последние, в свою очередь, определяют механические режимы электропривода, которые осуществляют регулировку исполнительных механизмов энергоемких технологических комплексов и отдельных установок с целью поддержания директивного задания. На рис.3 приведены осциллограммы мгновенных токов формы.

На рис.3 приняты следующие обозначения: а) – фрагмент двухфазного т.к.з.; б) – трехфазные т.к.з.

Очевидно, что при таком характере питания в электродвигателе протекают нестационарные электромагнитные явления, которые оказывают влияние на механические параметры на валу и, следовательно, на приводные механизмы технологической установки. Если при стационарном питании вращение вала будет равномерным ввиду постоянного действия по фазам возбуждающего электромагнитного поля и собственной инерционности, то при несимметрии возбуждающего тока электромеханические процессы имеют довольно сложный характер.



**Рисунок 3.** Осциллограммы мгновенных токов в процессе т.к.з. работе энергоемкого электротехнологического комплекса.

В момент больших кратностей тока возрастают электродинамические усилия, а при отсутствии тока механические усилия обеспечиваются за счет инерционности механической системы. При этом в отдельных фазах токи чередуются, а в отдельные моменты времени практически отсутствуют. Кроме этого несинусоидальность тока приводит к усложнению исследования и инженерных расчетов нестационарных электромагнитных и электромеханических процессов. Такой характер режимов приводит к ускоренному износу подшипников, релаксационным процессам, образованию уравнительных токов и потоков, возрастанию местных потерь и нагревов и др.

Исходя из первостепенных требований электропривода и обеспечения нормируемых колебаний вала двигателя и возрастающих требований к надежности, эффективности и снижения энергозатрат на единицу вырабатываемой продукции актуально исследовать:

- влияние нестационарных электромагнитных процессов на электромеханические параметры электропривода;
- разработать математическую модель нестационарных электромагнитных явлений и на ее основе, электромеханических процессов;
- сформировать технические требования и технические условия;
- предложить инженерные методы оценки колебаний вала синхронного электропривода при резкопеременных электрических нагрузках и реальных условиях эксплуатации.

### III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является исследование влияния резкопеременной электрической нагрузки на нестационарные электромагнитные явления и элек-

тродинамические процессы в синхронном приводе.

### IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При стационарном нагружении и установившемся режиме синхронного электропривода взаимная индуктивность  $L_{12}$  удобно представить в виде периодической функции. При резкопеременных нагрузках взаимные индуктивности отдельных фаз будут отличаться и с течением времени представляют периодические функции сложной формы. Это позволяет решение поставленной задачи упростить с достаточной для инженерной практики точностью.

#### Построение идеализированной модели синхронного электропривода

Решение поставленной цели удобно исследовать на идеализированной модели синхронного электропривода без демпферных обмоток в следующем виде [13]:

$$L_{11} \frac{dI}{dt} + r_1 I + \frac{d(L_{12}i)}{dt} = u_1; \quad (1)$$

$$\frac{d(L_{12}I)}{dt} + r_2 i + L_{22} \frac{di}{dt} = u_2; \quad (2)$$

$$J_{in} \frac{d^2 \theta^{gm}}{dt^2} - \frac{dL_{12}}{d\theta^{gm}} \cdot i \cdot I = M_{mh}, \quad (3)$$

где  $L_{11}$  и  $L_{22}$  – индуктивности обмоток статора и ротора;

$I$  и  $i$  – мгновенные значения токов статора и ротора;

$r_1$  и  $r_2$  – активные сопротивления статорной и роторной обмоток;

$u_1$  и  $u_2$  – напряжения статора и ротора исследуемой машины;

$L_{12}$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;

$J_{in}$  – момент инерции ротора;

$\theta^{gm}$  – угол поворота ротора относительно статора;

$M_{mh}$  – момент механических сил на валу ротора.

Для повышения эффективности исследований необходимо учесть нелинейные взаимосвязи между электромагнитными и механическими параметрами электропривода. Это приводит к существенному усложнению математической модели. Поэтому на первом этапе решения поставленной задачи рассмотрим ее в линейном представлении, а параметры  $L_{11}$ ,  $L_{22}$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  будем считать постоянными. При этом, в динамическом режиме, при питании резкопеременными токами и напряжениями, необходимо учитывать, что при вращении ротора, взаимная индуктивность  $L_{12}$  будет изменяться во времени в виде периодической функции. Очевидно, при инженерных исследованиях одновременный учет таких процессов не представляется возможным. Поэтому на первом этапе исследуем однофазную модель с учетом влияния высших гармоник

и изменяющихся кратностях возбуждающего тока. При этом, взаимную индуктивность запишем в следующем виде:

$$L_{12} = \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cdot \cos \cdot k\rho\theta^{gm}, \quad (4)$$

где  $M_k$  – амплитуда гармоники  $k$ -го порядка;

$\rho$  – число пар полюсов электродвигателя.

#### Физическое представление электромеханических процессов

Исходя из физического представления электромеханических параметров, сомножитель  $\rho\theta^{gm}$  выражаем посредством угловой скорости ротора двигателя ( $\omega_{el}$ ) и функции ( $v(t)$ ), которая характеризует колебания ротора при механическом нагружении, относительно синхронного режима, в следующем виде:

$$\rho\theta^{gm} = \omega_{el} \cdot t + v(t). \quad (5)$$

В соответствие условиям постановки задачи  $u_1 = U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha_1)$ ;  $u_2 = \text{const}$ ;  $U_{1m}$ ,  $\omega_1$  – амплитуда и круговая частота подведенного к статору напряжения;  $\alpha_1$  – начальная фаза напряжения  $u_1$ . В силу режима синхронной машины ( $\omega_{el} = \omega_1$ ) последний параметр одновременно характеризует угол опережения напряжения, подведенного к статору. Поэтому электромагнитный момент на валу ротора удобно представить в следующем виде:

$$M^{em} = \frac{dL_{12}}{d\theta^{gm}} \cdot i \cdot I. \quad (6)$$

Очевидно, что даже при синусоидальном изменении во времени взаимной индукции ( $L_{12}$ ) в зависимости от угла ( $\theta^{gm}$ ) и токов ротора и статора ( $i$ ,  $I$ , соответственно) вращающий момент ( $M^{em}$ ) будет изменяться во времени по периодическому закону. При этом из уравнения (3) следует, что даже при постоянном моменте приложенных механических сил на валу ротора ( $M_{mi}$ ) угловая скорость изменяется (не может быть постоянной). Из приведенного анализа электромагнитных и электромеханических процессов в синхронном электроприводе очевидно, что даже при приложенном синусоидальном напряжении, имеют место колебания ротора. При изменении возбуждающих параметров по периодическому несинусоидальному закону взаимосвязи между электромагнитными и электромеханическими параметрами существенно усложняются. Превышение нормируемых государственными стандартами показателей качества электрической энергии приводит к тому, что взаимная индуктивность ( $L_{12}$ ) в зависимости от изменения угла ( $\theta^{gm}$ ) изменяется по более сложному периодическому несинусоидальному закону. Это приводит к увеличению механических колебаний ротора синхронного электропривода. Нелинейные зависимости между электромагнитными параметрами электропривода, а также несинусоидальные и резкопеременные возбуждающие токи и напряжения приводят к существенному ус-

ложнению рассматриваемой задачи. В этом случае математическая модель будет представлять собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений. Точность решения этих уравнений существенно зависит от степени линейризации отдельных параметров и зависимостей (индукции, потока, магнитострикции в магнитной системе, нагрева обмоток и деталей, высших гармоник в токах и напряжениях). Усложнение решения поставленной задачи приводит к существенному возрастанию вычислений, а также разработке отдельных математических и компьютерных моделей. Большое количество решаемых вариантов и точность приводят к усложнению использования на практике. Это поясняется отсутствием высококвалифицированных исследователей, вычислительных устройств и средств автоматизации, необходимости срочной разработки технических условий и технических требований в зависимости от условий и режимов работы электропривода, а также учета влияния смежных энергоемких электротехнологий (дуговые сталеплавильные печи, приводы прокатных станов, вставки и преобразователи, электролиз и др.)

На основании выше изложенного усматривается, что для решения практических задач целесообразно разрабатывать упрощенные модели, которые удовлетворяют техническим требованиям и обладают достаточной для инженерной практики точностью.

#### Взаимные связи между электромагнитными и механическими процессами

В первом приближении инженерное решение можно получить полагая, что второе слагаемое ( $v(t)$ ) в (5), которое характеризует колебания ротора, относительно синхронного режима, постоянным  $v^1(t) = 0$ . После преобразований и сохраняя физическую сущность взаимосвязей между электромагнитными и механическими процессами приходим к следующему равенству:

$$\rho\theta^{gm} = \omega_1 t. \quad (7)$$

При этом условии периодическое решение исходных уравнений (1) – (2) получаем, решая соответствующие системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. При этом искомые периодические функции  $i$  и  $I$  следует представить в следующем виде:

$$I = I_0 \sum_{n=1}^{\infty} (I'_n \cdot \sin \cdot n \cdot \omega_1 t + I''_n \cdot \cos \cdot n \cdot \omega_1 t); \quad (8)$$

$$i = i_0 \sum_{n=1}^{\infty} (i'_n \cdot \sin \cdot n \cdot \omega_1 t + i''_n \cdot \cos \cdot n \cdot \omega_1 t). \quad (9)$$

Дальнейшее исследование состоит в анализе физической сущности произведений ( $i \cdot L_{12}$ ) и ( $I \cdot L_{12}$ ). В математическом представлении первый сомножитель представляем в следующем виде:

$$\begin{aligned}
iL_{12} &= \sum_{k=1}^{\infty} i_0 M_k \cdot \cos k\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cdot \cos k\omega t \cdot (i_0'' \cdot \cos n\omega t) = \\
&= u_1' \cdot \sin \omega t + u_1'' \cdot \cos \omega t + \sum_{j=1}^{\infty} j\omega_1 (P_j' \cdot \cos j\omega t - P_j'' \cdot \sin j\omega t) \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} i_0 M_k \cdot \cos k\omega t + \frac{1}{2} n_1 \sum_{k=1}^{\infty} M_k i_0' [\sin(n+k) \cdot \omega t + \sin(n-k) \cdot \\
&\cdot \omega t] + \frac{1}{2} n_1 \sum_{k=1}^{\infty} M_k i_0'' [\cos(n+k) \cdot \omega t + \cos(n-k) \cdot \omega t]. \\
&+ r_2 \sum_{j=1}^{\infty} (i_1' \cdot \sin j\omega t + i_1'' \cdot \cos j\omega t) + \\
&+ L_{22} \sum_{j=1}^{\infty} j\omega_1 (i_1' \cdot \cos j\omega t + i_1'' \cdot \sin j\omega t) = u_2,
\end{aligned} \tag{14}$$

После преобразований и упрощений приходим к следующему равенству:

$$iL_{12} = i_0 L_{12} + \sum_{j=1}^{\infty} (K_j' \cdot \sin j\omega t + K_j'' \cdot \cos j\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} M_n i_n'' \tag{10}$$

$$K_j' = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot i_n';$$

где

$$K_j'' = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot i_n'' \tag{11}$$

Следует отметить, что здесь коэффициенты  $M$  с отрицательными и нулевыми индексами представляют бесконечно малые значения. Это необходимо для получения инженерного решения с сохранением взаимных связей между электромагнитными и механическими процессами в синхронном электроприводе.

Аналогично получаем выражение для  $IL_{12}$

$$IL_{12} = i_0 L_{12} + \sum_{j=1}^{\infty} (P_j' \cdot \sin j\omega t + P_j'' \cdot \cos j\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} M_n I_n'' \tag{12}$$

$$\text{где } P_j' = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot I_n'; \tag{13}$$

$$P_j'' = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot I_n''$$

Математическую модель электромагнитных и электромеханических процессов получаем путем подстановки полученных выражений в дифференциальные уравнения (1) – (2). При этом необходимым условием является строгое соблюдение режима синхронной машины ( $\omega_{el} = \omega_1$ ), а взаимной индуктивности преобразуем к следующему виду:

$$\begin{aligned}
L_{11} &= \sum_{j=1}^{\infty} j\omega_1 (I_j' \cdot \cos j\omega t + I_j'' \cdot \sin j\omega t) + \\
&+ r_1 \sum_{j=1}^{\infty} (I_j' \cdot \sin j\omega t + I_j'' \cdot \cos j\omega t) + \\
&+ \sum_{j=1}^{\infty} [-i_0 M_j \cdot j\omega t + j\omega_1 (K_j' \cdot \cos j\omega t - K_j'' \cdot \sin j\omega t)] =
\end{aligned}$$

где приняты следующие обозначения:

$$u_1' = U_{1m} \cdot \cos \alpha_1; \quad u_1'' = U_{1m} \cdot \sin \alpha_1.$$

Дальнейшее преобразование заключается в том, что коэффициенты при тригонометрических функциях с одинаковыми индексами  $j$  приравняем и после преобразований, приходим к системе уравнений для определения токов статора и ротора при следующих начальных условиях.

$$\text{При } j=0 \quad r_1 I_0 = 0; \quad r_2 i_0 = U_2,$$

$$I_0 = 0; \quad i_0 = \frac{U_2}{r_2}. \tag{15}$$

$$\text{При } j=1 \quad \omega_1 L_{11} I_1' + r_1 I_1'' + \omega_1 K_1' = u_1';$$

$$r_1 I_1' - \omega_1 L_{11} I_1'' - \omega_1 K_1'' = u_1'' + \omega_1 M_1 i_0; \tag{16}$$

$$\omega_1 L_{22} i_1' + r_2 i_1'' + \omega_1 P_1' = 0;$$

$$r_2 i_1' - \omega_1 L_{22} i_1'' - \omega_1 P_1'' = 0.$$

$$\text{При } j \geq 2 \quad j\omega_1 L_{11} I_j' - r_1 I_j'' = j\omega_1 K_1' = 0;$$

$$r_1 I_j' - j\omega_1 L_{11} I_j'' - j\omega_1 K_1'' = j\omega_1 M_j i_0; \tag{17}$$

$$j\omega_1 L_{22} i_j' + r_2 i_j'' = j\omega_1 P_j' = 0;$$

$$r_2 i_j' - j\omega_1 L_{22} i_j'' - j\omega_1 P_j'' = 0.$$

### Влияние высших гармоник на электромагнитные и электромеханические процессы

Выполним анализ влияния высших гармоник на электромагнитные процессы в синхронном электроприводе. Решение уравнений отыскиваем с учетом гармоник до четвертого порядка. При указанных условиях, согласно формуле (4), только коэффициенты  $M_1$  и  $M_3$  не равны нулю, а в выражениях (11) и (13), в силу физической сущности процессов, они отображают только постоянные  $K_1', K_1'', K_2', K_2'', K_3', K_3'', P_1', P_1'', P_2', P_2'', P_3', P_3''$ .

Эти постоянные, для приведенных выше начальных условий и соответствующих гармоник, принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} K'_1 &= \frac{1}{2}(M_1 - M_3)i'_2; & I_3 &= a_2 i'_2 - b_2 i''_2 + c'_2 i_0; \\ K''_1 &= \frac{1}{2}(M_1 + M_3)i''_2; & I''_3 &= b_2 i'_2 - a_2 i''_2 + c'_2 i_0, \end{aligned} \quad (20)$$

где приняты обозначения

$$\begin{aligned} K'_2 &= \frac{1}{2}[(M_1 - M_3)i'_2 + M_1 i'_3]; & a_2 &= \frac{3\omega_1 M_1}{2} \cdot \frac{3\omega_1 L_{11}}{z_{1(3)}^2}; & b_2 &= \frac{3\omega_1 M_1}{2} \cdot \frac{r_1}{z_{1(3)}^2}; \\ K''_2 &= \frac{1}{2}[(M_1 + M_3)i''_2 + M_1 i''_3]; & c'_2 &= 3\omega_1 M_3 \cdot \frac{3\omega_1 L_{11}}{z_{1(3)}^2}; & c''_2 &= 3\omega_1 M_3 \cdot \frac{r_1}{z_{1(3)}^2}; \\ K'_3 &= \frac{1}{2}M_1 i'_2; & K''_3 &= \frac{1}{2}M_1 i''_2. \end{aligned} \quad (18)$$

$$z_{1(3)}^2 = r_1^2 + 9\omega_1^2 L_{11}^2. \quad (21)$$

Постоянные  $P'_1, P''_1, P'_2, P''_2, P'_3, P''_3$  получаем путем замены  $i'_n, i''_n$  на  $I'_n, I''_n$ .

Очевидно, что в левых частях уравнений системы (16) – (17), (в которых не равные нулю правые части) входят только  $I'_j, I''_j$  (с нечетными индексами), и  $i'_2, i''_2$ . В уравнениях с нечетными индексами  $I'_2, I''_2$  и  $i'_j, i''_j$ , правые части равными нулю. Отсюда следует, что при принятых идеализированных условиях и сохранении физического смысла электромагнитных процессов в синхронном электроприводе

$$i'_1 = i''_1 = I'_2 = I''_2 = i'_3 = i''_3 = 0,$$

$$\text{и} \quad K'_2 = K''_2 = P'_1 = P''_1 = P'_3 = P''_3 = 0.$$

Таким образом, для определения шести неизвестных  $I'_1, I''_1, i'_2, i''_2, I'_3, I''_3$  в уравнениях (16) – (17) и их взаимных связей необходимо выполнить анализ с соблюдением физической сущности электромагнитных процессов в электроприводе. С этой целью, на основании выше приведенных исследований, воспользуемся следующей математической моделью:

$$\begin{aligned} \omega_1 L_{11} I'_1 + r_1 I''_1 + \frac{\omega_1}{2} (M_1 - M_3) \cdot i'_2 &= u''_1; \\ r_1 I'_1 - \omega_1 L_{11} I''_1 - \frac{\omega_1}{2} (M_1 - M_3) \cdot i''_2 &= u'_1 + \omega_1 M_1 i_0; \\ r_2 i'_2 - 2\omega_1 L_{22} i''_2 - \frac{2\omega_1}{2} [(M_1 - M_3) \cdot I'_1 + M_1 I''_3] &= 0; \\ 3\omega_1 L_{11} I'_3 + r_1 I''_3 + \frac{3\omega_1}{2} M_1 i'_2 &= 0; \\ r_1 I'_2 - 3\omega_1 L_{11} I''_3 - \frac{3\omega_1}{2} M_1 i''_2 &= 3\omega_1 M_3 i_0. \end{aligned} \quad (19)$$

На первом этапе отыскиваем  $I'_3, I''_3$  путем представления их через  $i'_2, i''_2$  при помощи двух последних уравнений. В результате преобразований приходим к следующей системе уравнений:

Для установления аналитической связи между электромагнитными и электромеханическими процессами, подставляя значения токов  $I'_3, I''_3$  в два предыдущих уравнения рассматриваемой системы, приходим к следующим равенствам:

$$\begin{aligned} 2\omega_1 \left( L_{22} + \frac{M_1}{2} a_2 \right) i'_2 + \left( r_2 + \frac{2\omega_1 M_1}{2} b_2 \right) i''_2 &= \\ = -\frac{2\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} I'_2 - \frac{2\omega_1 M_1}{2} c'_2 i_0; \\ \left( r_2 + \frac{2\omega_1 M_1}{2} b_2 \right) i'_2 - 2\omega_1 \left( L_{22} + \frac{M_1}{2} a_2 \right) i''_2 &= -\frac{2\omega_1 M_1}{2} c'_2 i_0. \end{aligned}$$

Принимая, что

$$L_{22} \frac{M_1}{2} a_2 = L_{22(2)} \quad \text{и} \quad r_2 - \frac{2\omega_1 M_1}{2} b_2 = r_{2(2)}, \quad (22)$$

получим

$$\begin{aligned} i'_2 &= a'_1 I'_1 - b'_1 I''_1 + c'_1 i_0 \\ i''_2 &= a''_1 I'_1 - b''_1 I''_1 + c''_1 i_0, \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} a'_1 &= -\frac{2\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} \cdot \frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2}; \\ b'_1 &= -\frac{2\omega_1 (M_1 + M_3)}{2} \cdot \frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2}; \\ a''_1 &= -\frac{2\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} \cdot \frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2}; \\ b''_1 &= -\frac{2\omega_1 (M_1 + M_3)}{2} \cdot \frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2}; \end{aligned} \quad (24)$$

$$c'_1 = -\frac{2\omega_1 M_1}{2} \cdot \left( \frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2} c''_1 + \frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2} c'_2 \right);$$

$$c_1'' = -\frac{2\omega_1 M_1}{2} \cdot \left( \frac{r_2(2)}{Z_{2(2)}^2} c_1'' - \frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2} c_1' \right);$$

$$Z_{2(2)}^2 = r_2^2(2) + 4\omega_1^2 L_{22(2)}^2.$$

Подставим (23) в первые два уравнения и выполнив соответствующие преобразования с сохранением физической сущности электромагнитных процессов, получаем следующее решение:

$$\omega_1 \left( L_{11} - \frac{M_1 - M_3}{2} a_1' \right) I_1' + \left( r_1 - \frac{\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} b_1' \right) I_1'' =$$

$$= -\frac{\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} c_1' i_0 + u_1'';$$

$$\left( r_1 - \omega_1 \frac{M_1 + M_3}{2} a_1'' \right) I_1' - \omega_1 \left( L_{11} + \frac{M_1 - M_3}{2} b_1'' \right) I_1'' =$$

$$= \left[ \frac{\omega_1 (M_1 + M_3)}{2} c_1'' + \omega_1 M_1 \right] i_0 + u_1'.$$

С целью приведения полученных результатов исследований математических моделей к инженерному решению принимаем, что

$$L_{11} + \frac{M_1 - M_3}{2} a_1' = L_{11(1)}'; \quad L_{11} + \frac{M_1 + M_3}{2} b_1'' = L_{11(1)}'';$$

$$r_1 - \omega_1 \frac{M_1 - M_3}{2} b_1' = r_{1(1)}''; \quad r_1 - \omega_1 \frac{M_1 + M_3}{2} a_1'' = r_{1(1)}'.$$
 (25)

Полученные результаты в полной мере отображают взаимные связи между электромагнитными параметрами синхронного электропривода. Здесь

$$\left. \begin{aligned} I_1' &= \frac{r_{1(1)}'}{Z_{1(1)}^2} u_1' + \frac{\omega_1 L_{11(1)}''}{Z_{1(1)}^2} u_1'' + m_1' i_0; \\ I_1'' &= \frac{\omega_1 L_{11(1)}'}{Z_{1(1)}^2} u_1' + \frac{r_{1(1)}''}{Z_{1(1)}^2} u_1'' + m_1'' i_0, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где

$$m_1' = \frac{-\omega_1 L_{11}'' c_{1(1)}' + r_{1(1)}' \cdot c_{1(1)}''}{\omega_1^2 L_{11(1)}' \cdot L_{11(1)}'' + r_{1(1)}' \cdot r_{1(1)}''};$$

$$m_1'' = \frac{r_{1(1)}' \cdot c_{1(1)}' + \omega_1 L_{11}'' c_{1(1)}''}{\omega_1^2 L_{11(1)}' \cdot L_{11(1)}'' + r_{1(1)}' \cdot r_{1(1)}''};$$

$$Z_{1(1)}^2 = r_{1(1)}' \cdot r_{1(1)}'' + \omega_1^2 L_{11(1)}' \cdot \omega_1^2 L_{11(1)}''. \quad (27)$$

### Влияние первой гармоники статорного тока

Влияние первой гармоники статорного тока через напряжения, подведенные к статору и ротору, можно оценить по формулам (20) и (23). При этом

вторую гармонику роторного и третью гармонику статорного тока можно определить путем задания соответствующих напряжений согласно следующей системе:

$$\left. \begin{aligned} i_2' &= B_1' u_1' + B_1'' u_1'' + A_1 i_0; \\ i_2'' &= B_2' u_1' + B_2'' u_1'' + A_2 i_0. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

При этом целесообразно воспользоваться следующими обозначениями:

$$B_1' = a_1' \frac{r_{1(1)}''}{Z_{1(1)}^2} + b_1' \frac{\omega_1 L_{11(1)}'}{Z_{1(1)}^2}; \quad B_1'' = a_1'' \frac{\omega_1 L_{11(1)}''}{Z_{1(1)}^2} - b_1'' \frac{r_{1(1)}'}{Z_{1(1)}^2};$$

$$B_2' = a_1'' \frac{r_{1(1)}'}{Z_{1(1)}^2} - b_1'' \frac{\omega_1 L_{11(1)}'}{Z_{1(1)}^2}; \quad B_2'' = a_1' \frac{\omega_1 L_{11(1)}''}{Z_{1(1)}^2} + b_1' \frac{r_{1(1)}''}{Z_{1(1)}^2};$$

$$A_1 = a_1' m_1' + b_1' m_1' + c_1'; \quad A_2 = a_1'' m_1' + b_1'' m_1' + c_1'', \quad (29)$$

и

$$I_3' = (a_2 B_1' - b_2 B_2') u_1' + (a_2 B_1'' - b_2 B_2'') u_1'' + (a_2 A_1 - b_2 A_2 + c_2'') i_0; \quad (30)$$

$$I_3'' = (b_2 B_1' - a_2 B_2') u_1' + (b_2 B_1'' + a_2 B_2'') u_1'' + (b_2 A_1 + a_2 A_2 - c_2') i_0.$$

Следует отметить, что полученные результаты инженерных расчетов и анализа электромагнитных и электромеханических параметров синхронного электропривода определяются с точностью, удовлетворяющей инженерной практике. Для научных исследований необходимо воспользоваться математическими и компьютерными моделями. В первом приближении токи в статоре и роторе, целесообразно определить, воспользовавшись формулами (8)-(9), а электромагнитный момент по следующему уравнению:

$$M^{lem} = -\frac{\rho}{2} \left\{ M_1 \left[ i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \frac{i_2'}{2} (I_1'' - I_3'') \right] + \right.$$

$$+ 3M_3 \left[ i_0 I_3' + \frac{i_2' I_1' + i_2'' I_1''}{2} \right] - \frac{\rho}{2} \left\{ M_1 \left[ i_0 (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1' - I_3') + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{i_2' I_1' + i_2'' I_3''}{2} \right] + 3M_3 \left[ \frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') + \frac{I_1''}{2} (i_0 + i_2'') + \frac{i_0 I_1'' + i_2' I_3''}{2} \right] \right\} \times$$

$$\times \sin 2\omega_1 t + \frac{\rho}{2} \left\{ M_1 \left[ i_0 (I_1' - I_3') - \frac{I_2''}{2} (I_1' - I_3') - \frac{i_2' I_1' + i_2'' I_3''}{2} \right] - \right.$$

$$\left. - 3M_3 \left[ \frac{I_1'}{2} (i_0 - i_2'') - \frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') + \frac{i_0 I_1' + i_2'' I_3''}{2} \right] \right\} \cdot \cos 2\omega_1 t. \quad (31)$$

Причем, для получения более точного решения для составляющих токов, целесообразно воспользоваться совокупностью выражений (26) – (30).

### Влияние нестационарных электромагнитных процессов на колебательные процессы вала

Приведем анализ механического колебательного параметра  $v(t)$  во втором приближении. При этом будем учитывать, что этот параметр в значительной степени зависит от нестационарных электромагнитных процессов и от геометрических размеров электроприбора согласно следующим равенствам:

$$\theta^{gm} = \omega_{gm} \cdot t + \frac{v^{11}(t)}{p}; \quad (32)$$

$$\frac{d^2 \theta^{gm}}{dt^2} = \frac{1}{p} \cdot \frac{d^2 v^{11}(t)}{dt^2}. \quad (33)$$

Подставляя значение  $\frac{d^2 \theta^{gm}}{dt^2}$  из (33), токи  $i, I$  первого приближения и  $M^{lem}$  из формулы (31) в уравнение моментов (3), получаем

$$\begin{aligned} \frac{I}{p} \cdot \frac{d^2 v^{11}(t)}{dt^2} = & M^{lem} - \frac{\rho}{2} \left\{ M_I \left[ i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2} (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1'' - I_3') \right] + \right. \\ & + 3M_3 \left[ i_0 I_3' + \frac{i_2' I_1' + i_2' I_1''}{2} \right] \left. \right\} - \frac{\rho}{2} \left\{ M_I \left[ i_0 (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1' - I_3') + \right. \right. \\ & + \left. \frac{i_2' I_1' + i_2' I_3'}{2} \right] + 3M_3 \left[ \frac{i_2''}{2} (I_1' + I_3') + \frac{I_1''}{2} (i_0 + i_2'') + \frac{i_0 I_1' + i_2' I_3'}{2} \right] \left. \right\} \times \\ & \times \sin 2\omega t + \frac{\rho}{2} \left\{ M_I \left[ i_0 (I_1' - I_3') - \frac{I_2''}{2} (I_1' - I_3') - \frac{i_2' I_1' + i_2' I_3'}{2} \right] - \right. \\ & \left. - 3M_3 \left[ \frac{I_1'}{2} (i_0 - i_2'') - \frac{i_2''}{2} (I_1' + I_3') + \frac{i_0 I_1' + i_2' I_3'}{2} \right] \right\} \cdot \cos 2\omega t. \quad (34) \end{aligned}$$

Приравнивая постоянную часть электромагнитного момента моменту механических сил на валу ротора  $M_{meh}$  (который его уравновешивает), определяем начальную фазу подведенного напряжения  $\alpha_1$ . (Следует отметить, что при дальнейших исследованиях его второе приближение целесообразно обозначить  $\alpha_1^{II}$ ).

$$\begin{aligned} M_{meh} = & \frac{\rho}{2} \left\{ M_I \left[ i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2} (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1'' - I_3') \right] + \right. \\ & \left. + 3M_3 \left[ i_0 I_3' + \frac{i_2' I_1' + i_2' I_1''}{2} \right] \right\}. \quad (35) \end{aligned}$$

Здесь, в первом приближении составляющие токов статора и ротора, удобно выражать через  $i_1', i_1''$  в которых автоматически учитывается параметр  $\alpha_1$  (см. формулу (14) и др.).

Переменная часть электромагнитного момента определяет значение колебательной функции  $v(t)$  во втором приближении с точностью до третьей гармоники включительно, т. е.  $v^{11}(t)$ :

$$\begin{aligned} v^{11}(t) = & \frac{\rho^2}{8\omega_1^2 I_{in}} \left\{ M_I \left[ i_0 (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1' - I_3') + \frac{i_2' I_1' + i_2' I_3''}{2} \right] + \right. \\ & + 3M_3 \left[ \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \frac{I_1''}{2} (i_0 + i_2'') + \frac{i_0 I_1' + i_2' I_3'}{2} \right] \left. \right\} \sin 2\omega t - \\ & - \frac{\rho^2}{8\omega_1^2 I_{in}} \left\{ M_I \left[ i_0 (I_1' - I_3') - \frac{i_2''}{2} (I_1'' - I_3'') - \frac{i_2' I_1' + i_2' I_3'}{2} \right] - \right. \\ & \left. - 3M_3 \left[ \frac{I_1'}{2} (i_0 - i_2'') - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \frac{i_0 I_1' + i_2' I_3'}{2} \right] \right\} \cos 2\omega t. \quad (36) \end{aligned}$$

В частном случае, когда пространственное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре ( $M_3=0$ ) представляется в виде периодической синусоидальной функции, колебательная функция во втором приближении преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} v^{11}(t) = & \frac{M_I \rho^2}{8\omega_1^2 J_{in}} \left\{ i_0 (I_1'' - I_3'') + i_2' \left( I_1' - \frac{I_3'}{2} \right) + \frac{i_2' I_3''}{2} \right\} \sin 2\omega t - \\ & - \left[ i_0 (I_1' - I_3') - i_2'' \left( I_1' - \frac{I_3'}{2} \right) - \frac{i_2' I_3'}{2} \right] \cos 2\omega t. \quad (37) \end{aligned}$$

### Инженерная методика оценки колебаний вала

В качестве примера возьмем синхронный двигатель со следующими параметрами: мощность  $P_{2N}=4,5$ кВт; напряжение  $U_N=380$  В; частота  $f=50$  Гц; частота вращения  $n_N=1500$  об/мин.

Определим величину колебательной функции  $v^{11}(t)$  для случаев синусоидального (1) и несинусоидального (2) распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

### Классическое распределение магнитного поля в пространстве электродвигателя

В случае синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре значение колебательной функции  $v^{11}(t)$  определится из формулы (37), причем  $M_I = \frac{8}{\pi^2} \frac{\omega_1 \omega_2 p}{R_M} \cdot k_{\omega_1} \cdot k_{\omega_2}$ , остальные параметры для расчета колебательной функции приведены в табл.1.

Порядок вычисления колебательной функции  $v^{11}(t)$  следующий. Определяем коэффициенты  $a_2, b_2, c_2', c_2'', a_1', b_1', a_1'', b_1'', a', c_1', m_1', m_1'', B_1', B_1'', B_2', B_2'', A_2, A_1$  по формулам (21), (24), (27), (29). Вычис-

ляем токи  $I_1', I_1'', i_2', i_2'', I_3', I_3''$  по формулам (26), (28), (30). Находим значение колебательной функции  $v^{11}(t)$  по формуле (37).

Сделав соответствующие вычисления, получим числовое значение колебательной функции  $v^{11}(t)$ :

$$v^{11}(t) = -3,1 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(2\omega_1 t - \gamma_1);$$

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = 0,3.$$

**Таблица 1.** Параметры колебательной функции

Обозначение	Параметр	Величина
$w_1$	число витков на пару полюсов в статоре	196
$w_2$	число витков на пару полюсов в роторе	244
$p$	число пар полюсов	2
$R_M$	сопротивление магнитопровода на пару полюсов, В·сек	$F_0/\Phi$
$\Phi$	магнитный поток основной частоты, Вб	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$F_0$	суммарная м.д.с холостого хода на пару полюсов, А	219
$kw_1$	обмоточный коэффициент статора	0,934
$kw_2$	обмоточный коэффициент ротора	1
$\omega_2$	угловая скорость вращения ротора, с <sup>-1</sup>	314
$r_2$	активное сопротивление обмотки ротора, Ом	0,54
$\omega_2 L_{11}$	индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом	18,84
$r_1$	активное сопротивление обмотки статора, Ом	0,91
$\omega_1 L_{22}$	индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом	44
$J_{in}$	момент инерции ротора, кгм <sup>2</sup>	2,7
$I_{cm.н}$	ток нагрузки статора, А	22,8
$i_{BN}$	ток возбуждения (номинальный) ротора, А	$i_0 = i_{BN} = 18$
$i_{в.х.х.}$	ток возбуждения холостого хода ротора, А	9

#### Несинусоидальное распределение магнитного поля в пространстве электродвигателя

В случае несинусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре значение колебательной функции определяется из формулы (36), причем  $M_3 = 1/4 \cdot M_1$ :

$$v^{11}(t) = -8 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(2\omega_1 t - \gamma_2); \operatorname{tg} \gamma_2 = 0,1.$$

Аналогично находятся колебания ротора для явнорольной синхронной машины, т. е. когда коэффициент самоиндукции статора является не постоянной величиной, а функцией времени. В этом случае последовательность электромагнитных процессов сохраняется, но все математические выкладки и соответствующие результаты будут более громоздкими, что может быть объектом дальнейших исследований

#### V. ВЫВОДЫ

Предложенная методика исследований нестационарных электромагнитных и электромеханических процессов, которые возбуждаются резкопеременными токами, в обобщенном синхронном электроприводе позволяет:

- оценить влияние высших гармоник в возбуждающем токе на электромагнитные процессы и электромеханические параметры, не прибегая к рассмотрению решения бегущего электромагнитного поля в пространстве двигателя;

- решить инженерные задачи и осуществлять контроль колебаний вала электрической машины относительно нормированных показателей государственными стандартами и нормативно-технической документацией.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Постников И.М. Проектирование электрических машин. / И.М. Постников; Гостехиздат УССР. – К., 1960. – 234с.
- [2]. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии. / Д. Уайт, Г. Вудсон; – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240с.
- [3]. Зиновкин В.В. Нестационарные электромагнитные процессы в электрооборудовании энергоёмких электротехнологических комплексов с резкопеременным характером нагрузки / В.В. Зиновкин // Радиоэлектроника, Информатика, Управление. – 2005. – №2. – С. 142 – 148.
- [4]. Зиновкин В.В. Вероятностные параметры резкопеременных нагрузок энергоёмких электротехнологических комплексов / В.В. Зиновкин // ИЕД НАН України. – 2005. – №1(10). – С. 136 – 144.
- [5]. Зиновкин В.В. Исследование электротермических процессов в контактах переключающих устройств при резкопеременной нагрузке / В.В. Зиновкин, О.Г. Волкова, В.В. Карпенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2006. – №2. – С.52 – 57.
- [6]. Computer optimization on energy- and save resource expert system parameters of management electrosteel-smelting / I. Trufanov; V. Metelskiy; L. Bogdanova; Y. Krisan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE Cat. No.02EX542). Year: 2002. – p.207.
- [7]. Заболотный А.П. Усовершенствованный метод потенциальной функции для формирования оптимальной структуры распределительных сетей /

- А.П. Заболотный, Д.В. Федоша, А.А. Яценко, Н.Л. Криворученко // Электротехника и электроэнергетика. – 2008. - № 1. – С. 74 – 80.
- [8]. Безотосный В.Ф. Учет энергетических факторов при расчете намагниченности ферромагнитных материалов / В.Ф. Безотосный, Э. В. Власенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2004. - № 1 – С. 13–17.
- [9]. Зиновкин В.В. Имитационное моделирование нестационарных электромагнитных процессов и их характерных особенностей с использованием TOOL BOX POWER SYSTEM пакета MATLAB / В.В. Зиновкин, М.Ю. Залужный // Труды Междунаучн. – техн. конф.: «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». – Севастополь. СНТУ. – 2003. С. 75 – 80.
- [10]. Залужный М.Ю. Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в системе электроснабжения энергоёмких электротехнологических комплексов / М.Ю. Залужный // Электротехніка та електроенергетика. – 2009. – №2. – С.70 – 73.
- [11]. Антонов Н.Л. Прогнозирующее релейно-векторное регулирование статорного тока в асинхронном электроприводе с упрощенным двухзвенным непосредственным преобразователем частоты/ Н.Л. Антонов // Электротехніка та електроенергетика. – 2008. – №1. – С.37 – 48.
- [12]. Коцур М.И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков [Текст] / М.И. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2014. – №1. – С. 32–36. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-5.
- [13]. Ярымбаш С.Т. Особенности определения параметров эклектической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока. / С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш // Электротехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С.36 – 43.
- [14]. Лазарев В.И. О причине уменьшения сил осевой прессовки обмоток трансформаторов при коротких замыканиях / В.И. Лазарев, ИВ Лазарев // Электротехніка та електроенергетика, 2005 - №1 – С.18-22
- [15]. Зиновкин В.В. Моделирование автоматизированного электропривода дозатора технологической линии приготовления газобетона / В.В. Зиновкин, Э.М. Кулинич // Электротехніка та електроенергетика. – 2009. – №2. – С.49 – 53.
- [16]. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5 – 12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.
- [17]. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2016. – № 2. – С. 43–50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5.
- [18]. Постников И.М. Результаты и задачи исследования электромагнитных и тепловых явлений в концевых частях мощных турбогенераторов / И.М. Постников, Г.Г. Счастливый // Вестник АН УССР. Наукова думка. – 1972. – №8. – С.59-71.
- [19]. Sugimoto H., Tamai S. Secondary resistance identification of an induction motor applied model reference adaptive system and its characteristics / H.Sugimoto, S. Tamai // IEEE Trans. Ind. Appl., 1987. – P.296 – 303. DOI: 10.1109/TIA.1987.4504905
- [20]. Islam M. S. Experimental Verification of Design Techniques of Permanent-Magnet Synchronous Motors for Low-Torque-Ripple Applications // IEEE Transactions on Industry Applications, Year: 2011, Volume: 47, Issue: 1; P. 88 - 95. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316068
- [21]. Islam M. S. Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet Machines for low-torque-ripple applications / M.S. Islam; S. Mir; T. Sebastian; S. Underwood // IEEE Transactions on Industry Applications; Year: 2005, Volume: 41, Issue: 4 P.955 - 962. DOI: 10.1109/TIA.2005.851026
- [22]. Steven R.E. An experimental effective value of the quadratureaxis synchronous reactance of synchronous machine. The Institution of electrical endiners. paper №3750 s. dec., 1961. – p. 54-58. DOI: 10.1049/pi-a.1961.0108
- [23]. Павлюк К. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей. / К. Павлюк, С. Беднарк. – М.: Энергия, 1971. – 270 с

*Стаття надійшла до редакції 31.07.2017*

## ВПЛИВ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ У СИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

ЗИНОВКІН В.В.

д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: zvv@zntu.edu.ua;

- АНТОНОВ М.Л. канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: nick@nickanto.info;
- КРИСАН Ю.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: krisan@mail.com.

**Мета роботи.** Дослідження впливу різкозмінного електричного навантаження на нестационарні електромагнітні явища та електромеханічні процеси у синхронному електроприводі.

**Методи дослідження.** Теоретичні та експериментальні методи дослідження і аналізу сукупності параметрів різкозмінних навантажень електротехнологічних комплексів і електромагнітних процесів в електрообладнанні; фізико-аналітичні методи для отримання залежності впливу електротехнологічних навантажень на технічний стан, аварійність електрообладнання, додаткові втрати та нестационарних електромагнітних явищ в системах і обладнанні.

**Отримані результати.** Виконано розрахунки перевищення коливальних процесів валу синхронного електроприводу, які збуджуються різкозмінними навантаженнями, відносно нормованих державними стандартами. Виходячи з першорядних вимог електроприводу і забезпечення нормованих коливань валу двигуна і зростаючих вимог до надійності, ефективності та зниження енерговитрат на одиницю вироблюваної продукції було досліджено вплив нестационарних електромагнітних процесів на електромеханічні параметри електроприводу.

**Наукова новизна.** Запропоновано математичну методику нестационарних електромагнітних процесів в синхронному електроприводі, яка дозволяє досліджувати вплив несинусоїдальності і несиметрії струмів і напруг на електромеханічні параметри. Наведено інженерну методику оцінки коливальної функції валу залежно від характеру нестационарних електромагнітних процесів в синхронному електродвигуні.

**Практична цінність.** Запропоновано інженерну методику оцінки коливань валу синхронного електроприводу при нестационарних електромагнітних процесах, що призводять до збільшення показників нормативно-технічної документації.

**Ключові слова:** нестационарні електромагнітні процеси; синхронний електропривод; різкозмінне навантаження; математична модель; механічні коливання; нормуючі показники.

## INFLUENCE OF NON-STATIONARY ELECTROMAGNETIC PROCESSES ON ELECTROMECHANICAL PARAMETERS IN A SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

- ZINOVKIN V. Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, e-mail: zvv@zntu.edu.ua;
- ANTONOV N. Ph.D, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, e-mail: nick@nickanto.info;
- KRYSAN YU. Ph.D, Associate professor, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, e-mail: krisan@mail.com.

**Purpose.** Investigation of the influence of sharply variable electric load on non-stationary electromagnetic phenomena and electromechanical processes in a synchronous electric drive.

**Methodology.** Theoretical and experimental methods of research and analysis of a set of parameters of sharply varying loads of electrotechnological complexes and electromagnetic processes in electrical equipment; physical and analytical methods for obtaining dependencies of the influence of electrotechnical loads on the technical condition, the breakdown of electrical equipment, additional losses and non-stationary electromagnetic phenomena in systems and equipment.

**Findings.** The calculations of the excess of the oscillatory processes of the synchronous electric drive shaft are performed, which are excited by sharply varying loads, relative to the norms standardized by state standards. Proceeding from the primary requirements of the electric drive and providing normalized oscillations of the motor shaft and increasing requirements to reliability, efficiency and energy consumption per unit of output, the effect of non-stationary electromagnetic processes on the electromechanical parameters of the electric drive was investigated.

**Originality.** A mathematical technique is proposed for non-stationary electromagnetic processes in a synchronous electric drive, which allows one to investigate the effect of non-sinusoidal and unbalanced currents and voltages on electromechanical parameters. An engineering technique for estimating the oscillatory function of a shaft is given, depending on the nature of non-stationary electromagnetic processes in a synchronous motor.

**Practical value.** An engineering technique for estimating the oscillations of a synchronous electric drive shaft is proposed for non-stationary electromagnetic processes, which lead to an increase in the parameters of normative and technical documentation.

**Keywords:** non-stationary electromagnetic processes; synchronous electric drive; sharply varying load; mathematical model; mechanical vibrations; normalized indicators.

## REFERENCES

- [1]. Postnikov I.M. (1960). Proektirovanie elektricheskikh mashin. Kiev: Gostehizdat, 234.
- [2]. Uajt D.(1964). Elektromehaničeskoe preobrazovanie energii. M.-L.: Jenerģija, 240.
- [3]. Zinovkin V.V. (2005). Nestacionarnye elektromagnitnye processy v elektrooborudovanii energoemkikh elektrotehnologicheskikh kompleksov s rezkopere-mennym karakterom nagruzki. *Radioelektronika, Informatika, Upravlinnja*, 2, 142 – 148. (in Russian.)
- [4]. Zinovkin V.V. (2005). Veroyatnostnye parametry rezkoperemennykh nagruzok energoemkikh jelektrotehnologicheskikh kompleksov. *Praci IED NAN*, 1(10), 136–144. (in Russian.)
- [5]. Zinovkin, V., Volkova, O., & Karpenko, V. (2006). Investigation of electrothermic processes in contacts of switching devices under a current load. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 52-57 (in Russian.)
- [6]. Trufanov I.; Metelskiy V.; Bogdanova L.; Krisan Y.; Shabliy M. (2002). Computer optimization on energy- and save resource expert system parameters of management electrosteel-smelting. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science IEEE Cat. 02*, 542, 207. doi: 10.1109/TCSET.2002.1015924.
- [7]. Zabolotnyi, A., Fedosha, D., Yatsenko, A., & Kryvoruchenko, N. (2008). Improved method for forming potential of optimal structure of the distribution network. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1. 74-80.
- [8]. Bezotosnyy, V.F., Vlasenko, E.V. (2004). Uchet energeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnykh materialov. *Electrical Engineering And Power Engineering*. 1. 13–17.
- [9]. Zinovkin V.V., Zaluzhnyj M.Yu. (2003). Simulation modeling of non-stationary electromagnetic processes and their characteristics using the BOX POWER SISTEM BOX POWER SISTEM of the MATLAB package. *Problemy povyshenija jeffektivnosti jelektromehaničeskikh preobrazovatelej v jelektrojenerģeticheskikh sistemah*, 75 – 80. (in Russian.)
- [10]. Zaluzhnyi, M. (2009). Simulation of non-stationary electromagnetic processes in the system of electrical supply of ergoemic electrotechnological complexes. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 70-73.
- [11]. Antonov, N. (2008). Predicts ladder vector control stator current in the asynchronous electric drive with a simplified two-tier direct frequency converter. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1.37-48.
- [12]. Kotsur, M. (2014). Features of the of thermal effect impact on the asynchronous motor with the modified pulse control system in conditions of frequent starts. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 32-36. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-5
- [13]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2010). Specific determination of equivalent circuit parameters in the furnace loop of the AC graphitizing furnace. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 36-43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6
- [14]. Lazarev V., Lazarev I. (2005). O prichine umen'shenija sil osevoj pressovki obmotok transformatorov pri korotkikh замыkanijah. [About the reason of reduction of forces of axial pressing of windings of transformers at short circuits] *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1. 18-22 (in Russian.)
- [15]. Zinovkin V. & Kulinich E. (2009). Modeling of the automated electric drive of the doseter of the technological line of preparation of the gazobeton. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 49-53.
- [16]. Milyih, V. I., Polyakova N. V. (2013) An analysis of harmonic composition the AC magnetic field associated with a rotating rotor turbine generator, at idle speed and short circuit modes, *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.
- [17]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5
- [18]. Postnikov I.M., Schastlivyj G.G. (1972). Rezul'taty i zadachi issledovanija elektromagnitnykh i teplovykh javlenij v koncevykh chastjah mashhnykh turbogeneratorov. *Vestnik AN USSR. Naukova dumka*. 8, 59-71. (in Russian.)
- [19]. Sugimoto H., Tamai S. (1987). Secondary resistance identification of an induction motor applied model reference adaptive system and its characteristics. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 296 – 303. DOI: 10.1109/TIA.1987.4504905
- [20]. Islam, M. S., Islam, R., Sebastian, T. (2011). Experimental Verification of Design Techniques of Permanent-Magnet Synchronous Motors for Low-Torque-Ripple Applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 88 – 95. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316068
- [21]. Islam, M.S., Mir, S., Sebastian, T., Underwood, S. (2005). Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet Machines for low-torque-ripple applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 955 – 962. DOI: 10.1109/TIA.2005.851026
- [22]. Steven R. E. (1961). An experimental effective value of the quadratureaxis synchronous reactance of sunchronous machine. *The Institution of electrical endiners*. Paper, 3750, 54-58. DOI: 10.1049/pi-a.1961.0108
- [23]. Pavljuk K., Bednarek S. (1971). Pusk i asinhronnye rezhimy sinhronnykh dvigatelej. M.: Energija, 270.