

УДК. 378.162.33.001.5:(534.831+537.531)

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. П. Черный, В. В. Никифоров

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: apch@kdu.edu.ua, v-nik@kdu.edu.ua

Обосновывается проблема необходимости оценки электромагнитного воздействия электромеханических преобразователей энергии на биологические объекты. Акцент исследований перенесен на электроприводы переменного тока с асинхронными двигателями, которые получают питание от полупроводниковых преобразователей энергии с широтно-импульсной модуляцией. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженности магнитного поля вокруг асинхронных двигателей при питании их от преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией и при несимметрии питающего напряжения. Для рассматриваемых случаев предпринята первая попытка определения предельно допустимого уровня электромагнитного излучения, являющегося тератогеном (мутагеном) для биологического тест-объекта *Drosophila melanogaster*.

Ключевые слова: преобразование энергии, электропривод переменного тока, электромагнитное излучение, предельно допустимый уровень, биотестирование, тест-объект, тератогенез, мутации.

ЩОДО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

О. П. Чорний, В. В. Никифоров

Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: apch@kdu.edu.ua, v-nik@kdu.edu.ua

Обґрунтовується проблема необхідності оцінки електромагнітного впливу електромеханічних перетворювачів енергії на біологічні об'єкти. Акцент досліджень перенесено на електроприводи змінного струму з асинхронними двигунами, що отримують живлення від напівпровідникових перетворювачів енергії з широтно-імпульсною модуляцією. Наведено результати експериментальних досліджень напруженості електромагнітного поля навколо асинхронних двигунів при живленні їх від перетворювачів частоти з широтно-імпульсною модуляцією й при несиметрії напруги живлення. Для розглянутих випадків зроблено першу спробу визначення гранично допустимого рівня електромагнітного випромінювання, що є мутагеном (тератогеном) для біологічного тест-об'єкту *Drosophila melanogaster*.

Ключові слова: перетворення енергії, електропривод змінного струму, електромагнітне випромінювання, гранично допустимий рівень, біотестування, тест-об'єкт, тератогенез, мутації.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Говоря об электромагнитной совместимости электромеханических (ЭМС) и биологических систем (БС), можно сразу сказать: они несовместимы. Всем хорошо знакомы утверждения, что электромагнитное излучение (ЭМИ), в том числе промышленной частоты [1], приводит к возникновению у человека онкологических заболеваний. Действительно, влияние рентгеновского и ионизированного излучения, а также излучения от источников высокой частоты свыше 10^6 Гц: радиолокационных систем противовоздушной обороны, радио- и телетрансляторов, космической и мобильной связи – приводит к пагубным последствиям [2–4].

Уровни ЭМИ промышленной частоты наиболее полно учитываются сейчас лишь при проектировании электротехнических объектов, связанных с передачей и транспортированием электрической энергии [5, 6]. ЭМС являются преобразователями электрической энергии промышленной частоты, сопровождающейся ЭМИ с другими частотами и характеристиками. Ранее установлено [8], что вредными для организма человека являются электромагнитные поля (ЭМП) напряженностью свыше 0,2 мкТл. Это значение принято Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) в качестве предельно допустимого уровня (ПДУ). В России эта нормативная величина составляет 10 мкТл, а в Украине она до сих пор законодательно не установлена.

Механизм воздействия ЭМИ на БС до сих пор окончательно не изучен. Существует несколько рабочих гипотез, объясняющих биологическое влияние ЭМП на молекулярном, клеточном и органно-тканевом уровнях организации живого вещества. Как правило, они основаны на постулате индицирования токов в тканях и непосредственном действии поля на клетки (главным образом, на мембранные структуры в результате нарушений К–Na насоса). Предполагается, что ЭМП изменяет скорость диффузии веществ через плазмалемму и другие биомембраны, конформацию биополимеров, электронную структуру радикалов. Длительное воздействие ЭМП низкой интенсивности вызывает вегетативные (периферические) нарушения в результате астении нервной системы и нарушений функций эндокринных желез. При этом гиперфункция гипофиза и надпочечников сменяется гипофункцией. Повидимому, механизмы действия ЭМС на БС носят неспецифический характер и связаны с изменением активности гипоталамо-гипофизарной системы, обеспечивающей нейрогуморальную регуляцию.

Окружающая нас среда всегда находилась под влиянием ЭМП. Эти поля являются фоновым излучением, поскольку имеют природное происхождение. С развитием науки и техники фоновое излучение значительно усилилось, поэтому электромагнитные поля, которые можно отнести к антропогенным, существенно превышают естественный фон и в последнее время превратились в опасный экологический фактор. С каждым годом во всех странах мира растут энергетические мощности, вследствие чего ЭМП антропогенного происхождения стало значительным экологическим фактором с высокой биологической активностью. Отрицательное воздействие ЭМП на человека и на другие компоненты экосистем прямо пропорционально мощности поля и времени облучения. Неблагоприятное воздействие ЭМП, создаваемого линиями электропередач (ЛЭП), проявляется уже при напряженности поля, равной 1 кВ/м². В 1995 году ВОЗ даже был введен термин «глобальное электромагнитное загрязнение окружающей среды».

В настоящее время ПДУ для оценки воздействия ЭМП биогеоценозы (экосистемы) в целом не разработаны ни в одной стране. В литературе существуют разрозненные данные отдельных исследований воздействия ЭМП на некоторые компоненты экосистем. Наиболее проработанными и внедренными во многих государствах являются нормативы ПДУ ЭМИ для человека.

Для различных ЭМС электрифицированного транспорта, металлургии, бытовых приборов экспериментально определены уровни излучения [9]: электроприводы постоянного тока троллейбусов и трамваев – 30 мкТл, пылесосов – до 100 мкТл и т.п. Но это только для электродвигателей (ЭД), параметры и характеристики которых соответствуют паспортным. Между тем, парк ЭД ЭМС в большинстве своем составляют двигатели, длительно находящиеся в эксплуатации, прошедшие различные стадии ремонта с различными отклонениями в конструкции или параметрах. Любые же приобретенные отклонения делают ЭД существенно нелинейной системой и приводят к появлению несинусоидальных токов, дополнительных электромагнитных моментов, в том числе пульсирующих. Указанные моменты являются результатом взаимодействия разных временных гармоник основного поля

и полей от временных гармоник токов статора и ротора, возникших в силу новых приобретенных нелинейных характеристик ЭМС. Формируются сложные энергообменные процессы, приводящие к появлению внешних электромагнитных полей со сложной пространственной структурой. Безусловно, воздействие таких полей на БС будет иным, в связи с чем должны быть пересмотрены нормы ПДУ излучения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В общем случае магнитное поле вокруг ЭМС является трехмерным, носит сложный характер и, наряду с основной гармоникой, содержит большое количество высших гармонических. Стационарное магнитное поле описывается следующими известными уравнениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= J ; \\ \operatorname{div} B &= 0 ; \\ B &= \mu_0 H . \end{aligned} \quad (1)$$

Провести расчет такого поля путем решения системы уравнений (1) тем или иным методом является достаточно сложной задачей. В большинстве случаев, когда осуществляется оценка воздействия поля на биологические системы и величину электромагнитного загрязнения в целом, авторы используют упрощенные математические модели [10–12], позволяющие определить возникающие магнитные моменты, а также приближенно рассчитать напряженность поля на поверхности объекта и на определенном расстоянии от него. Тем не менее, влияние поля на БС может быть оценено только экспериментальным путем.

Экспериментальные измерения электромагнитного поля. Измерение электромагнитного поля асинхронного двигателя (АД) с параметрами, приведенными в табл. 1, производилось в цилиндрической системе координат (рис. 1) непосредственно на корпусе электродвигателя и на расстоянии через каждые 0,1 до 0,5 м. Питание АД от трехфазной сети 220 В, от преобразователя частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения и при несимметрии напряжения питания.

Таблица 1 – Номинальные данные асинхронного двигателя

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Тип	АОЛ22-43ф	ККД (η)	70 %
Частота питающей сети, Гц	50	Скорость вращения, об/мин	1400
Мощность, Вт	400	Номинальный ток, А	1,05
$\cos \varphi$	0,7	Номинальное напряжение, В	380

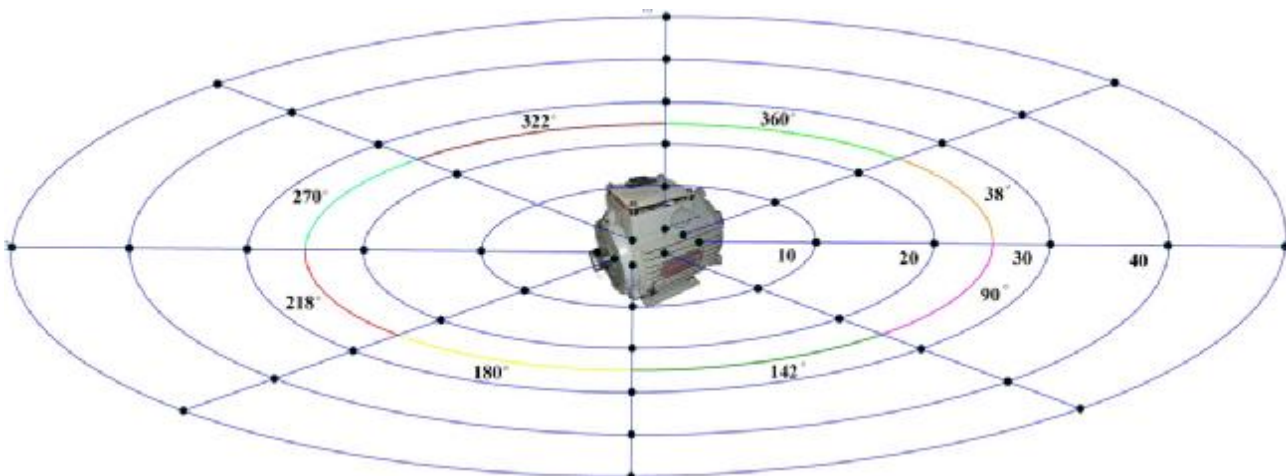


Рисунок 1 – Схема измерений параметров напряженности электромагнитного поля асинхронного двигателя

Фиксирование результатов осуществлялось с помощью тестера электромагнитного поля EM-191 с параметрами: диапазон измерений 200...2000 mG, 20...200 μ T; рабочая частота измерения 30...300 Гц; ошибка $\pm 2,5$ % в диапазоне 50...60 Гц (табл. 2).

Таблица 2 – Напряженность электромагнитного поля вокруг асинхронного двигателя

Расстояние от корпуса АД, см	Напряженность, μ T								
	0°	38°	90°	142°	180°	218°	270°	322°	360°
При питании от преобразователя частоты									
0	2,6	40	12,4	28	12,7	4,4	5	10	2,6
10	0,2	2,4	1,15	1,8	1,7	0,7	0,16	1,7	0,2
20	0,07	0,6	0,14	0,35	0,2	0,15	0,06	0,47	0,07
30	0,02	0,2	0,01	0,22	0,08	0,02	0,01	0,12	0,02
40	0,01	0,06	0,01	0,13	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01
50	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
При питании от промышленной трехфазной сети 220 В									
0	2,8	6,3	12,5	42,5	15,5	44,7	5,5	13,5	2,8
10	1,3	1,2	1,8	0,85	1,9	2,6	2,2	2,7	1,3
20	1,1	0,6	1,36	0,5	0,8	0,45	0,84	1,4	1,1
30	0,8	0,3	1,1	0,3	0,3	0,12	0,56	1,13	0,8
40	0,5	0,1	0,9	0,08	0,01	0,1	0,47	1	0,5
50	0,1	0,02	0,5	0,02	0,01	0,09	0,38	0,9	0,1
При несимметрии напряжения питания									
0	1,7	3	8,7	15	6,5	22,5	5,7	4,8	1,7
10	0,08	0,4	0,8	1	0,3	1,3	1	0,7	0,08
20	0,53	0,25	0,7	0,7	0,15	1,1	0,36	0,51	0,53
30	0,21	0,13	0,5	0,5	0,09	0,8	0,26	0,46	0,21
40	0,1	0,09	0,3	0,32	0,07	0,52	0,1	0,25	0,1
50	0,09	0,05	0,18	0,1	0,05	0,36	0,08	0,15	0,09

Полученные результаты свидетельствуют о выраженной неравномерности напряженности электромагнитного поля. Характер линий напряженности указывает на различное электромагнитное взаимодействие между обмотками двигателя на промышленной частоте и с учетом высших гармоник от частоты модуляции ШИМ (рис. 2,а,б). При несимметрии питания хорошо видно слабое действие поля фазы с низким напряжением (рис. 2,в).

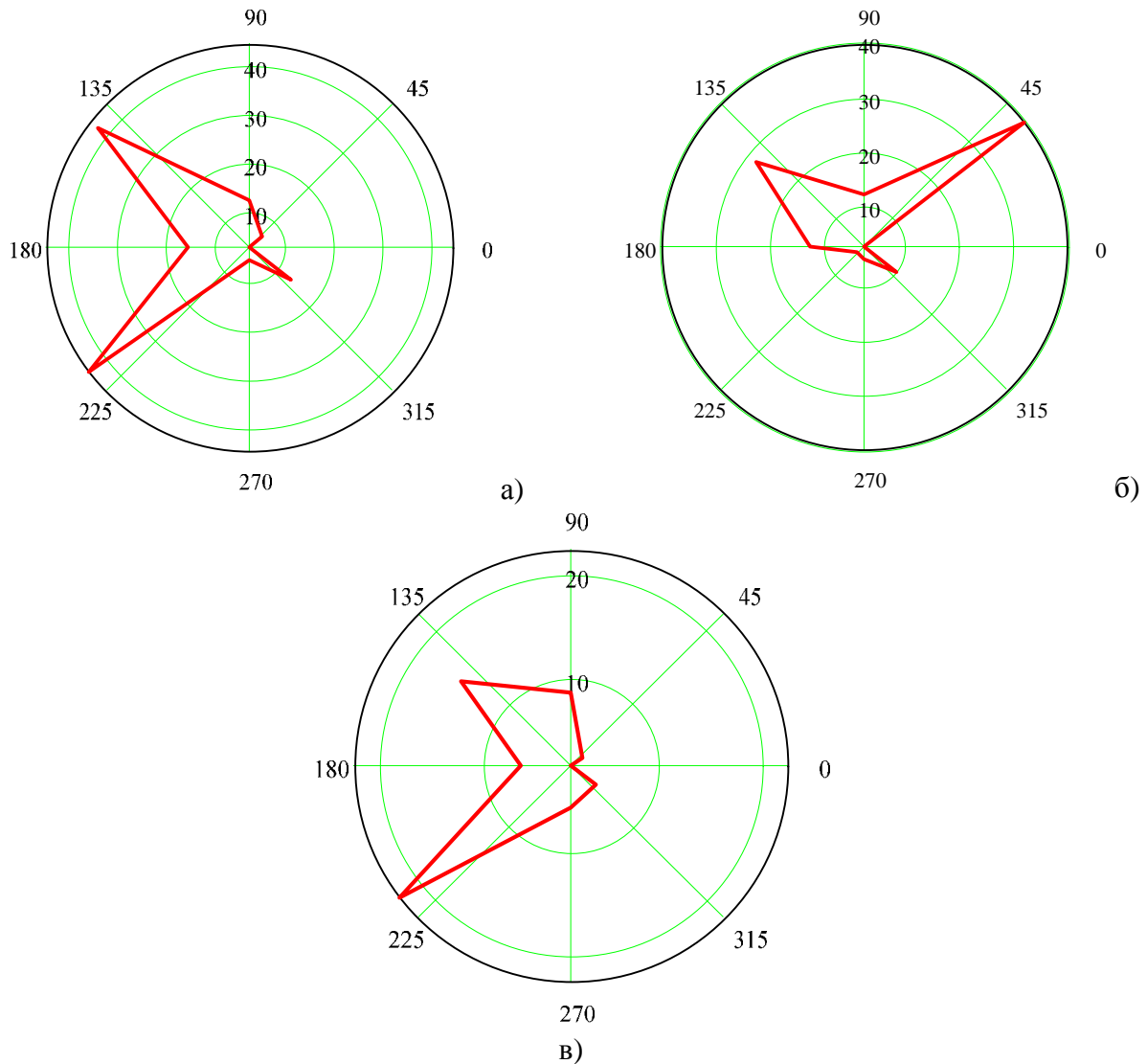


Рисунок 2 – Напряженність електромагнітного поля навколо асинхронного двигача:
а) при живленні від перетворювача частоти; б) при живленні від промислової трифазної
сети 220 В; в) при несиметрії напруги живлення

Експериментальні дослідження впливу електромагнітного поля на біологічний тест-об'єкт. В даній роботі, в отличие від інших досліджень, здійснений комплексний експериментальний підхід до оцінки впливу ЕМП на БС – тест-об'єкт, в якості якого використана плодова мушка (*Drosophila melanogaster Meigen, 1830*). Целью настоящих досліджень являється визначення результатів впливу ЕМП на живі організми. Використання мух-дрозофил обумовлено не тільки зручними для експерименту життєвими циклами, але і адекватною реактивністю цих комах на негативний вплив ЕМІ. На наш погляд, поширення постулатів теорії стресу Ганса Сельє на результати оригінальних досліджень обумовлює можливість їх адаптації по відношенню до здоров'я і психоемоційної сфери людини.

Камеральні дослідження проводились таким чином, що одна з двох експериментальних ліній дрозофил знаходилась під постійним впливом ЕМП в час їх розвитку (росту і розмноження) на протязі трьох поколінь (30 днів). При цьому реєструвалися всі фенотипічні зміни, викликані, головним чином,

тератогенними мутациями в каждом из наблюдаемых поколений тест-объекта. Вторая линия является контрольной (без патогенных влияний). Дрозофилы имеют красные глаза и желто-коричневую окраску с черными кольцами поперек живота. У них ярко выражен половой диморфизм: длина самки – около 2,5 мм, самцы заметно меньше, их брюшко темнее (рис. 3).

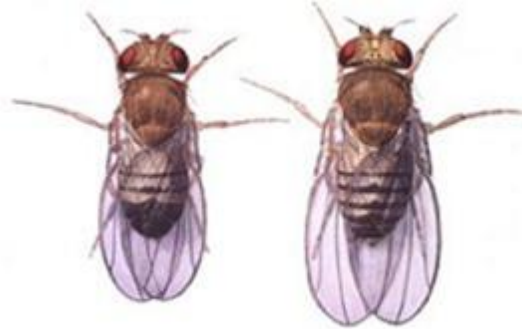


Рисунок 3 – Внешний вид плодовой мухи (*Drosophila melanogaster*): самец слева

На экспериментальную линию тест-объекта воздействовали ЭМП компрессора холодильника (электродвигатель) мощностью 0,2 кВт ч, работающего периодически (включается каждые полчаса) в течение смены трех поколений (рис. 4). После появления личинок старые насекомые отселялись, чтобы избежать последующего скрещивания с мухами первой генерацией (F_1), родившимися и выросшими таким образом под влиянием ЭМП. В соответствии с результатами внешнего осмотра гибридов первого поколения зарегистрированы четыре фенотипические формы тератологий, вызванных, по-видимому, определенными мутациями: 1) бескрылые особи; 2) с редуцированными (недоразвитыми) крыльями; 3) с деформированным брюшком; 4) с непропорциональными частями тела; 5) особи без аномалий.

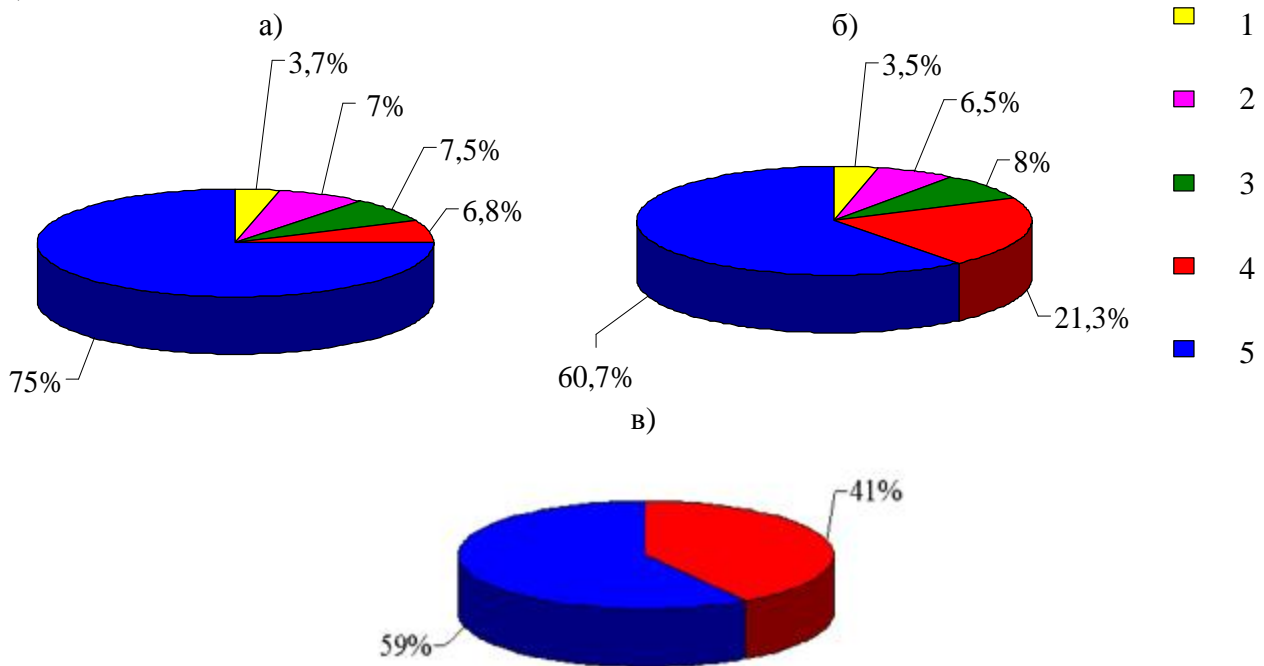







Рисунок 4 – Соотношение фенотипических групп *Drosophila melanogaster* F_1 (а), F_2 (б) и F_3 (в) (обозначения в тексте)

На основании полученных данных определено, что 74,4 % мушек первого поколения являются здоровыми, а 25,6 % имеют отклонения в развитии, что соответствует второму закону Грегора Менделя (табл. 3). В результате исследований дрозофил второй генерации установлено, что большой процент насекомых имеет непропорциональные части тела. Бескрылых форм и насекомых с редуцированными крыльями, а также особей с деформированным брюшком обнаружено не много. Доказано, что по сравнению с контрольной группой дрозофил, на которых не действовали никакими факторами в процессе их развития и размножения, получено небольшое количество потомства. Главным признаком дрозофил третьего поколения является то, что бескрылых, особей с редуцированными крыльями и насекомых с деформированным брюшком не выявлено. Преобладали здоровые мушки, а также особи с непропорциональными частями тела. Таким образом, детальный анализ результатов оригинальных экспериментальных исследований позволяет сделать вывод об увеличении частоты мутаций в каждом из последующих поколений тест-объекта, подверженных ЭМИ.

Таблица 3 – Соотношение фенотипических форм гибридов первого, второго и третьего поколений, подверженных ЭМИ

Фенотипические группы	Фото	F ₁		F ₂		F ₃	
		число	%	число	%	число	%
бескрылые		74	3,8	129	3,3	–	–
редуцированные крылья		136	7,1	261	6,6	–	–
деформированное брюшко		151	7,8	314	8,1	–	–
непропорциональные части тела		134	6,9	825	21,2	2565	41,1
всего:		495	25,6	1529	39,2	2565	41,1
без аномалий		1442	74,4	2370	60,8	3675	58,9
всего:		1937	100,0	3899	100,0	6240	100,0

ВЫВОДЫ. Необходимость в рассмотрении поставленной авторами проблемы оценки влияния изношенного или подвергавшегося ремонту электромеханического оборудования на биологические объекты получила экспериментальное подтверждение. Полученные в результате измерений картины электромагнитного поля вокруг асинхронных двигателей имеют резко выраженную неравномерность, что, с одной стороны, несет информацию о

техническом состоянии двигателя, а с другой – не может не оказывать локального воздействия на биологические объекты. Подтверждением тому являются экспериментальные результаты первой попытки определения фенотипических изменений, вызванных, главным образом, электромагнитным излучением, являющимся тератогеном (мутагеном) для биологического тест-объекта *Drosophila melanogaster*, которые получены на первом этапе – исследовании воздействия электромагнитного излучения от исправных симметричных двигателей. Результаты дальнейших исследований будут развиты авторами в направлении изучения воздействия на биологические объекты электромагнитного излучения от электромеханических систем с преобразователями энергии, а также на объекты, имеющие приобретенную параметрическую несимметрию и физическую изношенность. Указанное позволит устанавливать предельно допустимые уровни электромагнитного излучения в каждом конкретном случае.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Б.И., Пелевин Д.Е., Бовдуй И.В. и др. Компенсация искажений магнитного поля промышленной частоты // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика»*. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 135–136.
2. Дунаев В.Н. Электромагнитные излучения и риск популяционному здоровью при использовании средств сотовой связи // *Гигиена и санитария*. – 2007, № 6. – С. 56–57.
3. ПДУ магнитных полей частотой 50 Гц. – Харьков, 1986. – СН–3206–85.2.
4. Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П. Основы электромагнитной экологии. – М.: Радио и связь, 2000. – 240 с.
5. Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты СН № 2971–84. – М.: Минздрав СССР, 1984.
6. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. Сан-ПиН 2.1.2.1002–00. – М.: Минздрав России, 2001.
7. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Электромагнитные поля в производственных условиях. Сан-ПиН 2.2.4.1191–03. – М.: Минздрав России, 2003.
8. Магнитное поле и биологический организм. – Режим доступа: <http://metamir.wpdm.com/emf.php?mmm=emf>
9. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография. – Самара: ООО ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.
10. Степанов А.Н. Моделирование внешнего магнитного поля трехфазной электрической машины. – Режим доступа: <http://www.uzknastu.ru/files/pdf/2011-7-1/13-20.pdf>
11. Развитие теории внешнего магнитного поля асинхронных двигателей, способов его снижения и измерения. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/razvitie-teorii-vneshnego-magnitnogo-polya-asinkhronnykh-dvigatellei-sposobov-ego-snizheniya->
12. Влияние электромагнитного излучения на живые организмы. – Режим доступа: <http://study.sfu-kras.ru/mod/resource/view.php?id=1695>

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ELECTROMECHANICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS

O. Cherniy, V. Nykyforov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University



ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: apch@kdu.edu.ua, v-nik@kdu.edu.ua

The authors have substantiated the urgency of assessment of electromagnetic impact of the electromechanical energy converters on biological objects. The article is focused on the AC electric drives equipped with induction motors, which are the load of the semiconductor PWM-controlled energy converters supplying. The experimental research results, obtained by the authors, are presented for the magnetic field intensity around the induction motors that are supplied by the PWM-controlled frequency converters with the supply asymmetry. The first attempt was made to determine the maximum permissible level of electromagnetic radiation, which is the teratogen, e.g. mutagen, for the *Drosophila melanogaster* biological test-objects.

Key words: energy conversion, AC electric drive, electromagnetic radiation, maximum permissible level, bioassay, test-objects, teratogenesis, mutations.

REFERENCES

1. Kuznetsov B.I., Pelevin D.E., Bovdvi I.V. and oth. Compensation of distortions of a power-frequency magnetic field // *Electromechanical and energy-saving systems. Special issue «Problems of automated electric. Theory and Practic»*. – Kremenchuk: KrNU, 2012. – Iss. 19/3 (2012). – PP. 135–136. [in Russian]
2. Dunaev B.N. Electromagnetic radiation and people health risk when using cellular communications // *Hygiene and sanitation*. – 2007. – № 6. – PP. 56–57. [in Russian]
3. *Maximum permissible level of 50 Hz magnetic fields*. – Kharkiv, 1986. – SN–3206–85,2. [in Russian]
4. Spodobaev Yu.M., Kubanov V.P. *Fundamentals of electromagnetic ecology*. – Moscow: Radio i sviaz, 2000. – 240 p. [in Russian]
5. *Health and safety regulations for people EMI protection from the fields produced by AC overhead transmission lines of industrial frequency SN № 2971–84*. – Moscow, Minzdrav SSSR, 1984. [in Russian]
6. *Sanitary and epidemiological standards and regulations. Sanitary and epidemiological requirements for residential buildings and facilities. San–PiN 2.1.2.1002–00*. – Moscow, Minzdrav Rossii, 2001. [in Russian]
7. *Sanitary and epidemiological standards and regulations. Electromagnetic fields in production environment. San–PiN 2.2.4.1191-03*. – Moscow: Minzdrav Rossii, 2003. [in Russian]
8. *Magnetic field and biological organism*. – Access mode: <http://metamir.wpdom.com>. [in Russian]
9. Dovbysh V.N., Maslov M.Yu., Spodobaev Yu.M. *Electromagnetic safety of elements in power systems: Monograph*. – Samara: OOO IPK “Sodruzhestvo”, 2009. – 198 p. [in Russian]
10. Stepanov A.N. *Modelling of an external magnetic field of a three-phase electric machine*. – Access mode: <http://www.uzknastu.ru/files/pdf/2011-7-1/13-20.pdf>. [in Russian]
11. *The development of theory of an external magnetic field of induction motors, ways for its reduction and measuring*. – Access mode: <http://www.dissercat.com/content/razvitie-teorii-vneshnego-magnitnogo-polya-asinkhronnykh-dvigateli-sposobov-ego-snizheniya>. [in Russian]
12. *EMI impact on living organisms*. – Access mode: <http://study.sfu-kras.ru/mod/resource/view.php?id=1695>. [in Russian]

	<p>Черный Алексей Петрович, доктор технических наук, профессор, директор Института электромеханики, энергосбережения и систем управления КрНУ, тел. (05366) 2-45-86, e-mail: apch@kdu.edu.ua, achernyj@rambler.ru</p>
	<p>Никифоров Владимир Валентинович, доктор биологических наук, профессор, начальник научно-исследовательской части, заведующий кафедрой естественных дисциплин КрНУ, директор регионального ландшафтного парка «Кременчугские плавни», тел. (05366) 3-62-17, e-mail: v-nik@kdu.edu.ua</p>

Стаття надійшла 06.02.2013
Рекомендовано до друку
д.х.н., проф. Підліснюк В.В.